

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEINEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

MEMOIRE

Présenté au

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN MICROELECTRONIQUE

Option : Technologie des composants semiconducteurs

et dispositifs photovoltaïques

Par

Brahim LAKEHAL

Ingénieur, département d'Electronique-Université de Batna

Intitulé

Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky

Devant le jury :

Dr. MAHAMDI Ramdane	M. C. U. Batna	Président
Dr. BENHAYA Abdelhamid	M. C. U. Batna	Rapporteur
Dr. BOURIDAH Hachemi	M. C. U. Jijel	Examineur
Dr. DIBI Zohir	M. C. U. Batna	Examineur
Dr. Djefal Fayçal	M. C. U. Batna	Examineur

Remerciements

Merci !

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de travail, Monsieur Abdeshamid Benhaya, maître de conférence 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.

Je tiens également à remercier monsieur, Mahamdi Ramdane maître de conférences à l'université de Batna d'avoir accepté de juger ce travail et pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ce mémoire.

Je suis très reconnaissant à :

**Monsieur Djeflal Fayçal, maître de conférences à l'université de Batna.*

**Monsieur, Didi Zohir maître de conférences à l'université de Batna.*

** et Monsieur Hachemi BOURGDAH, maître de conférences à l'université de Jijel.*

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

J'aimerais également exprimer ma gratitude à mon ami Nacereddine Lakhdar de m'avoir initié à la théorie des algorithmes génétiques.

À toute ma famille et mes collègues qui m'ont encouragé je dis merci.

Sommaire

Table des matières

Introduction générale

Chapitre I: Généralités sur l'effet photovoltaïque

I.1 Introduction.....	1
I.2 Le spectre solaire	1
I.3 Principe de l'effet photovoltaïque.....	4
I.4 Structure des cellules photovoltaïques.....	6
I.5 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque	7
I.5.1 Passivation des faces avant et arrière.....	8
I.5.2 Couche antireflet.....	8
I.5.3 Texturation de la surface	8
I.5.4 Contacts face avant et arrière.....	9
I.5.5 BSF	9
I.6 Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL).....	10
I.7 Structure de cellules photovoltaïques industrielles.....	11
I.8 Cellule solaire de type Schottky	13
I.9 Photopiles en films minces	14
I.10 Cellule à BSF.....	15
I.11 Cellule solaire de type structure MIS	16
I.12 Tandem solaire.....	16
I.13 Cellules photovoltaïques avec contacts arrières interdigités	17
I.13.1 Structure et principe de fonctionnement de cellules photovoltaïques avec contacts arrières interdigités	17
I.13.2 Les avantages des cellules PV interdigitées	18
I.13.3 Les inconvénients des cellules PV interdigitées	19
I.14 Le coût des cellules photovoltaïques	19
I.15 Conclusion	20

Chapitre II: Structure métal semi-conducteur

II.1 Introduction	21
II.2 La structure Métal-Semi-conducteur	21
II.3 Travail de sortie	21
II.4 Affinité électronique	22
II.5 Effet Schottky	23
II.6 États de surface	25
II.7 Le contact Métal-Semi-conducteur	26
II.8 Caractéristiques électriques de la cellule SCHOTTKY	30
II.9 Courant d'obscurité	32
II.10 Mécanisme de transport du courant	33
II.10.1 Emission thermoïonique (TE)	33
II.10.2 Courant tunnel	34
II.10.3 Courant de diffusion	35
II.10.4 L'injection des porteurs minoritaire	36
II.10.5 Courant total d'obscurité	37
II.11 courant d'éclairement	37
II.12 La réponse spectrale	37
II.13 Circuit équivalent	38
II.14 Effet de la température sur les paramètres physiques de la cellule solaire.....	39
II.14.1 Le gap énergétique	39
II.14.2 La concentration intrinsèque	39
II.14.3 Les masses effectives	40
II.14.4 Les durées de vie des porteurs	40
II.14.5 La mobilité.....	40
II.14.6 La constante de diffusion.....	41
II.14.7 Le coefficient d'absorption.....	42
II.14.8 Le coefficient de réflexion.....	43

II.15 Conclusion.....	44
-----------------------	----

Chapitre III: Algorithmes Génétiques

III.1 Introduction.....	45
III.2 Algorithmes génétiques.....	46
III.3 Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques.....	47
III.4 Description détaillée.....	48
III.4.1 Codage.....	48
III.4.2 Sélection.....	50
III.4.2.1 La roulette.....	50
III.4.2.2 Le tournoi.....	51
III.4.3 Croisement.....	51
III.4.4 Mutation.....	51
III.4.5 Elitisme.....	51
III.5 Fonction d'évaluation (fitness) et le hasard.....	52
III.6 Les grandes étapes de l'algorithme génétique.....	52
III.7 Caractéristiques de l'optimisation génétique.....	53
III.8 Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques.....	54
III.8.1 Avantages des GAs.....	54
III.8.2 Inconvénient des GAs.....	54
III.9 Conclusion.....	55

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.1 Introduction.....	56
IV.2. Extraction des paramètres.....	56
IV.3 Application des étapes.....	57
IV.4. Etude sous obscurité.....	59
IV.5 Application du modèle optimisé sur une cellule solaire de type Schottky.....	62
IV.5.1. Description des paramètres de la cellule étudiée.....	62

IV.5.2. Résultats sous éclairement	63
IV.5.2.1. Caractéristique I(V).....	63
IV.5.2.2. Courant de court circuit.....	64
IV.5.2.3. Tension de circuit ouvert.....	66
IV.5.2.4. Facteur de forme.....	66
IV.5.2.5. Rendement.....	66
IV.6 Conclusion.....	68
Conclusion générale.....	69
Bibliographie	

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les besoins croissants en énergie et la multiplication des dispositifs électriques ont conduit à diversifier les sources d'approvisionnement. L'utilisation d'une énergie dépend de sa disponibilité et de sa facilité de mise en œuvre. Le soleil est une énergie propre, silencieuse et inépuisable. La conversion électrique de ce formidable potentiel énergétique s'obtient en utilisant des matériaux semi-conducteurs. Ces matériaux devront conduire à un bon rendement et à un faible coût du kW. La difficulté principale étant de trouver un équilibre entre une technologie efficace et un prix raisonnable, tout en contrôlant l'impact environnemental du procédé de fabrication. La recherche dans ce domaine a débuté dans les années 50, relativement timide au départ, les bons résultats s'enchaînent et se développent ensuite sous l'impact principal du Japon, de l'Allemagne et des Etats-Unis.

Les activités principalement axées sur la réalisation des photodiodes ne cessent de se développer grâce à la généralisation de nouvelles techniques de production et à l'utilisation de matériaux peu chers

Le fonctionnement des composants à semi-conducteurs fonctionnant à haute température et à des fréquences élevées tels que les diodes PN et Schottky 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 modèle des paramètres fondamentaux de la diode Schottky ; à savoir la hauteur de la barrière, le facteur d'idéalité, et la résistance série joue un rôle important dans la conception et la fabrication des dispositifs semi-conducteurs telles que les photopiles.

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 divisé en quatre chapitres :

Dans le chapitre I, après avoir rappelé quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil, et son application dans le domaine photovoltaïque, nous aborderons le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales, et les limites du modèle théorique. Une dernière partie portera sur les problématiques d'élaboration et de passivation de ces cellules.

Le chapitre II, présentera les notions de base concernant la structure et les phénomènes physiques du contact métal semi-conducteur. On insistera sur la présentation des grandeurs physiques et mécanismes de transport du courant qui permettent d'évaluer les performances et la caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque de type Schottky. On s'est intéressé également à l'effet de la température sur les caractéristiques photovoltaïques en se basant sur la variation des différents paramètres physiques du matériau.

Le but fixé dans le troisième chapitre est la description et l'évolution du processus d'optimisation, par les algorithmes génétiques, ainsi que les avantages et les inconvénients de ce processus.

Enfin, le chapitre IV consiste à utiliser la technique d'optimisation AG pour rechercher les paramètres optimaux de la hauteur de la barrière, facteur d'idéalité et la résistance série en fonction de la température pour une fonction fitness minimale. Ces paramètres sont enfin exploités pour présenter les caractéristiques électriques de la photopile étudiée.

Chapitre I

Généralités sur l'effet photovoltaïque

I.1 Introduction

L'énergie électrique peut être obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques. Nous aborderons dans ce chapitre, en premier lieu, quelques notions sur la source d'énergie qui est le soleil, et les différentes applications associées à l'énergie solaire.

Nous décrirons, ensuite, le principe de l'effet photovoltaïque, le fonctionnement des cellules chargées de la conversion photovoltaïque et leurs caractéristiques principales. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de différents types de cellules photovoltaïques et de leurs performances.

I.2 Le spectre solaire

Le Soleil est une étoile – notre étoile – située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène, son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète. La Lune est 400 fois plus petite que le Soleil, mais 400 fois plus près de la Terre, ce qui explique la taille apparente similaire des deux astres dans le ciel, ce dont on peut se rendre compte en particulier lors des éclipses de Soleil.

L'énergie émise par le Soleil l'est d'abord sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière c ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère.

La théorie « corpusculaire » de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence f peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire est directement proportionnelle à cette fréquence. De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques.

La densité spectrale d'éclairement énergétique du rayonnement solaire hors de l'atmosphère est représentée sur la figure I.1 (elle est exprimée en $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$).

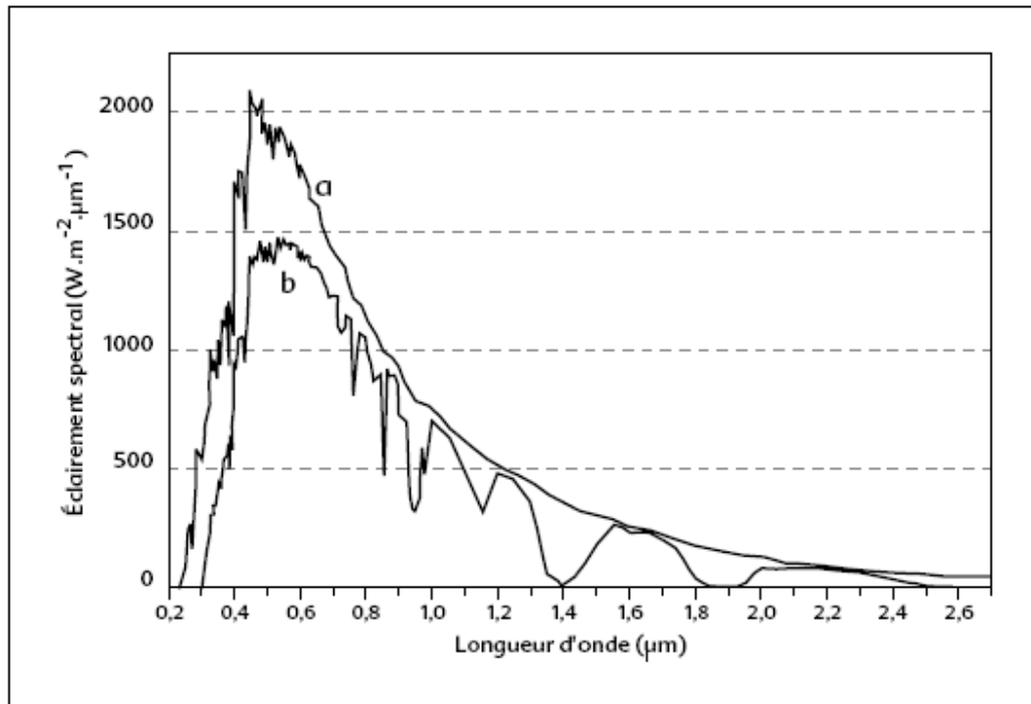


Figure I.1: Densité spectrale de l'éclairement énergétique du rayonnement solaire direct. 1a. Rayonnement solaire hors de l'atmosphère. 1b. Rayonnement solaire direct au sol pour une hauteur du Soleil de 65 degrés et sous une atmosphère claire standard [4].

La répartition de cet éclairement énergétique dans les divers domaines de longueur d'onde est résumée dans le tableau I.1.

Région spectral	Longueurs d'onde (um)	Eclairement Energétique W.m ²)	Pourcentage (%)
Infrarouge	>0.70	695	50.8
Visible	0.40 à 0.70	559	40.9
UV-A	0.32 à 0.40	86	6.3
UV-B	0.28 à 0.32	21	1.5
UV-C	<0.28	6	0.4

Tableau I.1 L'éclairement énergétique du rayonnement solaire hors de l'atmosphère dans les divers domaines de longueur d'onde [4].

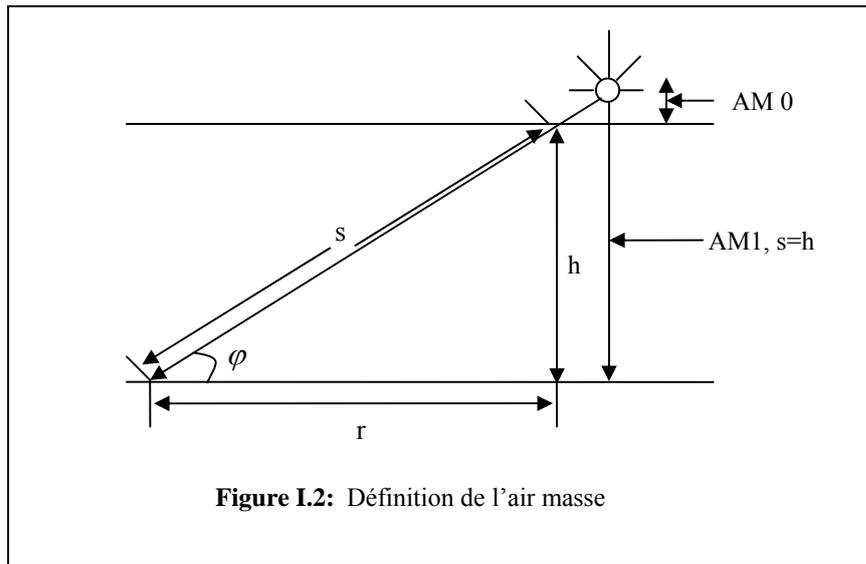
Il est intéressant de noter que, du point de vue de l'émission de rayonnement, le Soleil et la surface terrestre se comportent de façon similaire à un corps noir (mais pas aux mêmes longueurs d'onde).

Le corps noir a été défini de façon théorique afin de faciliter la description des phénomènes liés au rayonnement. Il présente des propriétés remarquables, entre autres:

- d'absorber totalement tout le rayonnement qu'il reçoit;
- d'émettre un rayonnement dont l'énergie totale est proportionnelle à la surface du corps noir et à la quatrième puissance de sa température absolue;
- d'émettre une énergie maximale pour une longueur d'onde inversement proportionnelle à sa température absolue.

Cette dernière particularité explique que la surface terrestre (et l'atmosphère), compte tenu de leurs températures beaucoup plus basses que celle du Soleil, émettent essentiellement dans l'infrarouge, entre 4 et 80 μm . La valeur 4 μm marque ainsi une frontière assez nette entre le rayonnement solaire et le rayonnement émis par l'atmosphère et la surface terrestre. La Terre et son atmosphère jouent ainsi le rôle de transformateurs de l'énergie solaire, qu'elles reçoivent principalement sous forme de rayonnement de courtes longueurs d'onde et qu'elles réémettent vers l'espace essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge [1, 2 et 3].

Le spectre solaire en dehors de l'atmosphère de la terre est l'état de l'air de masse « 0 » - (AM0). Une irradiation de (AM1) est trouvée seulement dans les régions équatoriales où le soleil arrive à être vertical à la terre. Même en Algérie, ce n'est possible qu'au plus sud du pays, jusqu'à une latitude terrestre de 23°. Si le soleil ne se trouve pas en direction verticale au dessus de la terre, la lumière doit suivre un chemin plus long que la hauteur de l'atmosphère.



$$m = \frac{s}{h} = \sqrt{\frac{r^2 + h^2}{h^2}} = \sqrt{1 + \frac{r^2}{h^2}} \quad \text{I.1}$$

Tel que :

- S- Longueur de parcours dans l'atmosphère
- φ - Angle d'altitude solaire
- h- Distance au dessus de l'atmosphère
- r- Projection de la longueur S sur la surface de la terre

La condition $S = 2h$ (AM2) définit l'intensité d'irradiation qui reste après avoir passé deux fois l'atmosphère. De la même façon, on définit les intensités AM3,...AM10.

I.3 Principe de l'effet 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:

- 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 [5].

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption des photons donnant lieu à la création de paires électron-trou. Un champ électrique permanent, au sein du matériau, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison [6]. Ce champ peut être généré de plusieurs manières: par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonctions), soit par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diodes Schottky), ou encore à l'interface de zones d'un même semi-conducteur dont les concentrations en électrons libres sont différentes (homojonctions ou jonction p-n).

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 diodes Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I-3 :

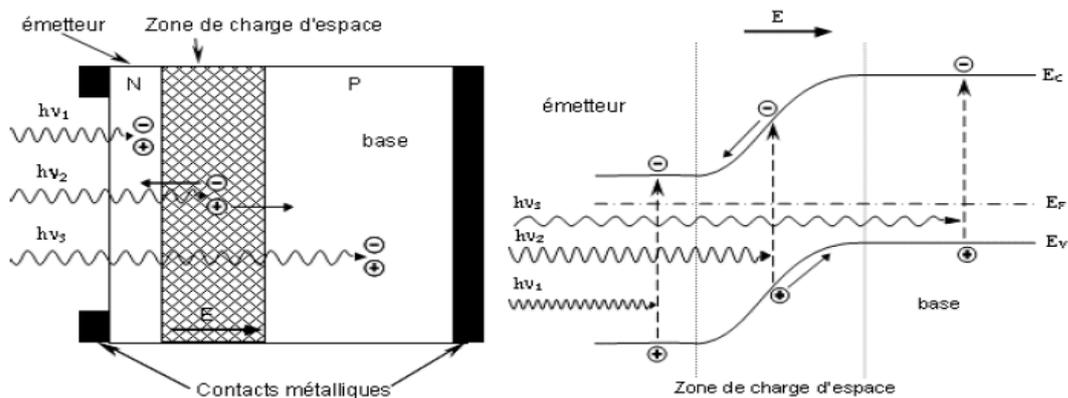


Figure I.3: Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule Photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région:

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires.

On aura un photocourant de diffusion;

- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

I.4 Structure des cellules photovoltaïques

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% [11] sur l'utilisation du silicium comme matériau de base (figure I-4). Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages: il est abondant à la surface du globe, car facilement extrait à partir du sable; il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V; il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct: pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium, alors que seulement 1 μm de GaAs suffit. De plus, la largeur de la bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés.

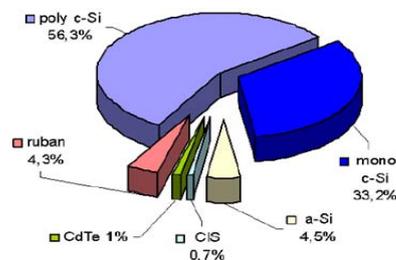


Figure I.4: Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003 [11]

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque (figure I.4). Il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czochralski) [12]. Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. La part de silicium monocristallin est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multicristallin.

Le silicium multicristallin est quant à lui fabriqué à partir de sources de matériau moins raffinées, mais convient aux processus de l'industrie photovoltaïque: il constitue 56,4% des modules fabriqués en 2003 [11]. La majeure partie de ce matériau est produit par des procédés de solidification unidirectionnelle. C'est le matériau qui conduit au coût le plus faible au Wc, en comparaison avec d'autres procédés (2,12 \$/Wc contre 2,43 \$/Wc pour les modules en silicium monocristallin [12]). D'autres méthodes de production se développent, tel que le silicium en ruban EFG (pour Edge defined film Fed Growth), qui est produit directement sous forme de plaques minces, mais qui présente des rendements de conversion inférieurs à ceux des lingots traditionnels [13].

I.5 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure I-5.

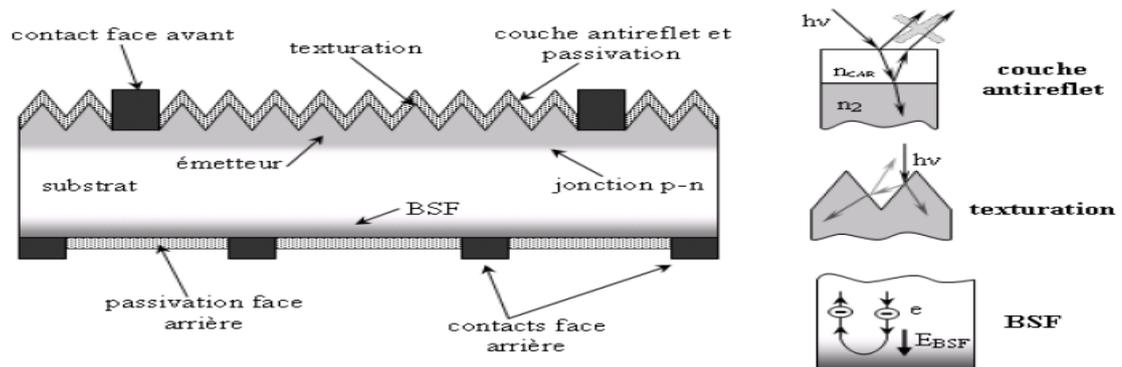


Figure I 5: Composition d'une cellule photovoltaïque

I.5.1 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 ($\text{SiN}_x\text{:H}$).

I.5.2 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 I.5). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

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

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semiconducteur. 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 [14].

I.5.3 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 I-5 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, [15] acides [16]), texturation mécanique [17] (laminage à froid sous un peigne dentelé), texturation laser [18].

I.5.4 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 [19].

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.

I.5.5 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 I.5). 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 porteurs minoritaires élevés (environ $200 \mu\text{m}$ pour le Polix).

I.6 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 I-6. Cette cellule a été élaborée en laboratoire avec des procédés de la microélectronique en utilisant la technologie PERL (Passivated Emitter with Rear Locally diffused) [14, 20].

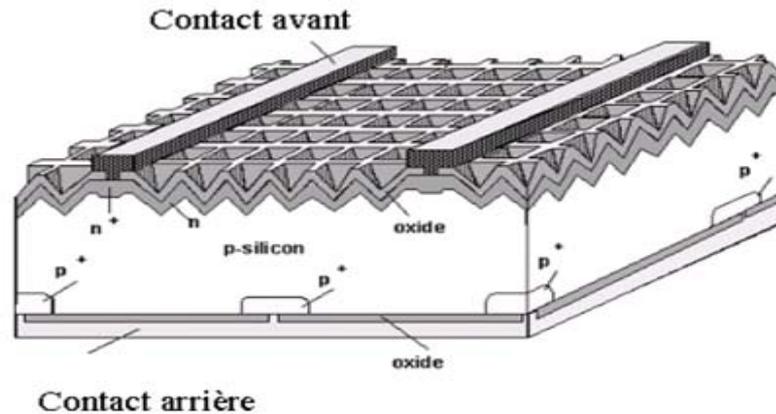


Figure I.6: Structure d'une cellule photovoltaïque en Si monocristallin à haut rendement (24.7%)

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'ombrage de la cellule. Pour obtenir un contact ohmique, la région sous le contact avant est surdopée n⁺ (émetteur sélectif, [21]).

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 [20]. Cette valeur est à comparer à la limite théorique du rendement de 28.8% pour les cellules PV en silicium d'épaisseur 80 μm 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 [22]

I.7 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 I.7. 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 antiréfléchissante en SiN. De même, le champ électrique face arrière est obtenu par recuit d'une couche en Al déposée par sérigraphie.

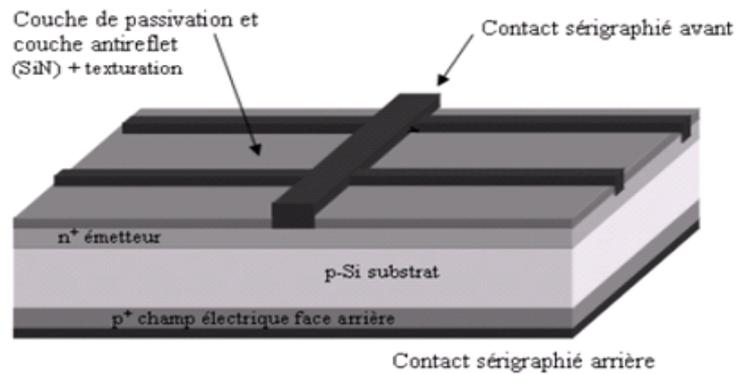


Figure I.7: Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin

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 [23].

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 [24].

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 surdoper la zone sous les contacts (afin d'assurer l'ohmicité) 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 [25] ou une double sérigraphie (une pour la zone surdopée de l'émetteur, une pour la métallisation) avec l'alignement de la sérigraphie des contacts sur celle de la zone déjà dopée [26].

I.8 Cellule solaire de type Schottky [27]

Le dépôt d'un métal convenablement choisi en couche mince sur le silicium conduit à des cellules de type Schottky. Le diagramme énergétique de ce type de cellules sous illumination est montré sur la figure suivante :

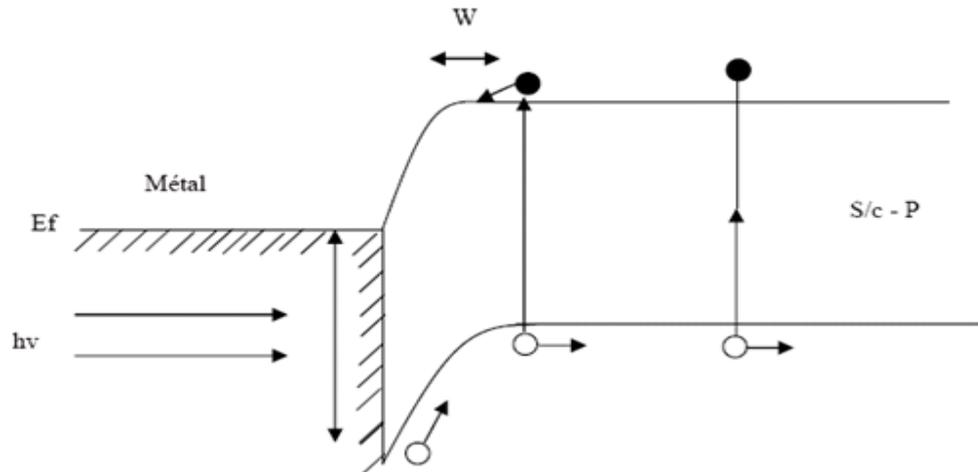


Figure I.8: Cellule solaire de type Schottky

La couche métallique doit être très mince pour permettre à la lumière de pénétrer dans le semi-conducteur. Le photo-courant résultant a trois composantes. En effet, la lumière d'énergie « $h\nu > \phi_B$ » peut être absorbée dans le métal et excite 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 longues 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 aux piles solaires en couches minces.
- résistance élevée aux radiations due au champ électrique élevé près de la surface.
- Fort courant de charge et bonne réponse spectrale.

I.9 Photopiles en films minces

La faible consommation de matière, l'élaboration directe du matériau par les techniques de dépôt usuelles sur un matériaux support de faible coût comme le verre, l'acier, céramique, silicium métallurgique ou un polymère sans avoir besoin d'autres étapes de mise en forme coûteuse comme le sciage, font de la technologie en couche mince une solution particulièrement attractive pour les cellules photovoltaïques.

Pour avoir une cellule couche mince, il faut de préférence utiliser des semiconducteurs ayant une bande électronique interdite directe et de valeur adaptée au spectre solaire de l'ordre de 1.5 [ev]. Si l'épaisseur de la couche semi-conductrice est plus grande que l'inverse du coefficient d'absorption, la plupart de la lumière incidente sera absorbée. Si la longueur de diffusion est plus grande que l'épaisseur du film, la plupart des porteurs photo générés seront rassemblés.

De très nombreux efforts de recherche ont donc été entrepris sur un assez grand nombre de matériaux, depuis une quarantaine d'années, afin d'arriver à des cellules photovoltaïques en couche mince possédant à la fois, un bon rendement de conversion et un faible coût.

Historiquement deux matériaux ont été particulièrement étudié et ont fait l'objet d'une industrialisation : le silicium amorphe et le tellure de cadmium (CdTe), tous deux déposés sur verre. Le rendement maximum de ce type de cellules pour des tailles significatives, reste malheureusement limité. Ceci tient à la difficulté d'obtenir ce type de matériaux avec une faible densité de défauts et, par là, de bonnes propriétés électroniques.

Le silicium amorphe souffre de plus d'un effet de vieillissement lié à l'instabilité de l'hydrogène dans sa structure due aux effets de surface et aux réactions chimiques avec le milieu extérieur (H₂O, CO₂,...).

Pour le (CdTe), la présence du cadmium qui est un métal lourd de toxicité comparable à celle du mercure, rend le (CdTe) relativement inapproprié à une application grand public.

Récemment, des avancées remarquables ont été obtenues sur un autre type de matériaux, les chalcopyrites, avec comme référence le diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe₂) ou (CIS). Cette filière est devenue donc rapidement la filière couche mince de référence.

Le champ de recherche sur ces matériaux couches minces reste relativement ouvert. Toute la gamme des matériaux possibles n'a pas été étudiée en détail. De nombreux efforts sont encore nécessaires pour obtenir une mise en œuvre assurant à la fois le coût minimum et le rendement maximum [27].

I.10 Cellule à BSF [28]

L'interface joue un rôle très important dans la détermination des propriétés optoélectroniques des cellules solaires, parmi ces interfaces le contact face arrière, est un contact ohmique ayant une grande vitesse de recombinaison.

Afin de collecter les paires électron-trou créées par les radiations des grandes longueurs d'onde du spectre solaire, la configuration à champ arrière « BSF » « Back Surface Field ». (Figure I-9) a été proposée. Ce champ améliore les caractéristiques électriques de la cellule solaire, en particulier, la tension en circuit ouvert V_{co} par réduction du courant d'obscurité I_{obs} . En effet, les porteurs devenus minoritaires après leurs injection dans la zone arrière s'éloignent de la zone de déplétion, le champ électrique arrière « BSF » les repousse vers la jonction.

Dans une cellule solaire « BSF » au silicium, la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs minoritaires en excès dans les régions de base sont augmentées.

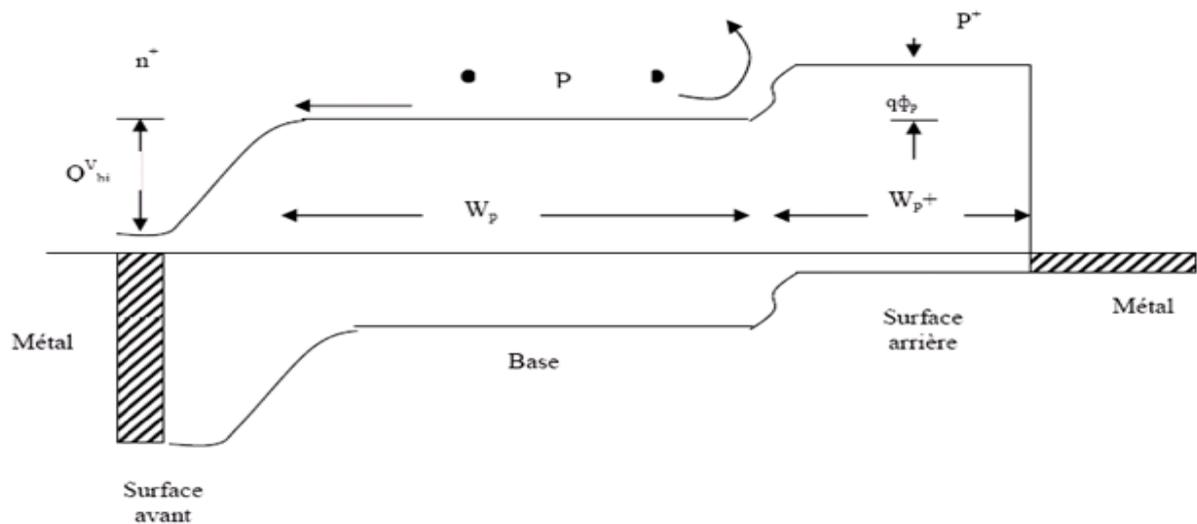


Figure I.9: Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF [28]

I.11 Cellule solaire de type structure MIS

Dans ce type de cellule, un film isolant très mince ($\approx 20\text{\AA}$) 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 [27]. Un rendement de 18% est obtenu par cette structure dans la condition AM1

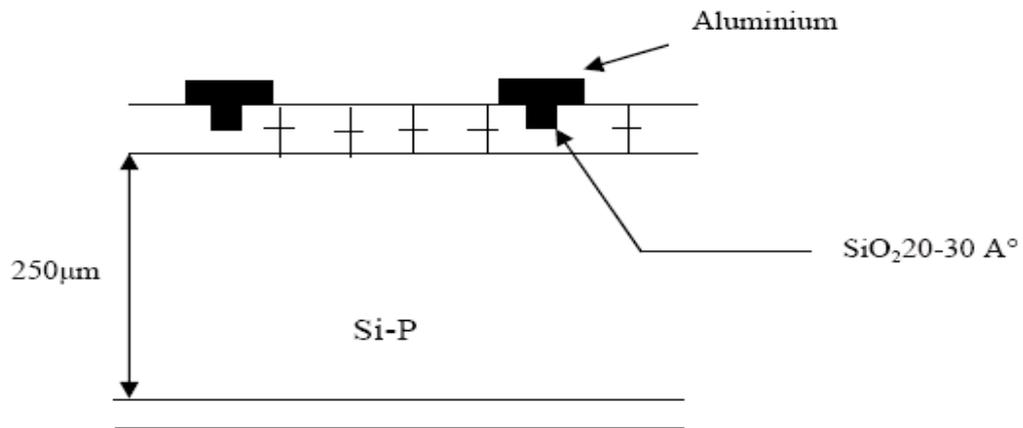


Figure I.10: Cellule solaire de type MIS

I.12 Tandem solaire

Les cellules solaires à une seule jonction ne permettent pas d'exploiter convenablement le spectre solaire, le spectre solaire est très large, et comme plusieurs matériaux solaires ayant une faible absorption dans le bleu et dans l'infrarouge ; il faut empiler plusieurs cellules dans l'ordre décroissant du gap. La réponse spectrale dans les tandems s'élargit le long du spectre de l'infrarouge vers le bleu et même le violet. La tension de circuit ouvert V_{co} des tandems solaires atteint des valeurs très optimisées, par exemple le tandem à trois jonctions de InGaP/GaAs/Ge a une tension de 2,1v, il peut exploiter de 300 vers 1900 nm. Citons quelques tandems qui offrent des rendements élevés, AlGaAs/GaAs, GaAs/Ge, AlGaAs/Si et InP/InGaAs [29]. Généralement, les structures tandems sont déposées par MBE, OMVPE et CBE [30].

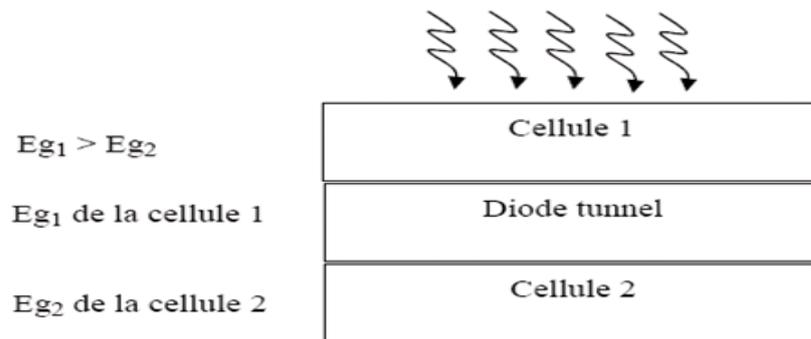


Figure I-11 Tandem solaire à deux jonctions [29]

I.13 Cellules photovoltaïques avec des contacts arrières interdigités

I.13.1 Structure et principe de fonctionnement de cellules photovoltaïques avec des contacts arrières interdigités

Dans le cas de cellules PV conventionnelles (classiques), la jonction p-n est placée sur la face avant (illuminée) de la cellule et les contacts à l'émetteur et au substrat sont sur les faces opposées (cf. figure I-8). Ce genre de structure est simple, c'est pourquoi elle est utilisée dans l'industrie depuis longtemps. Par contre, elle présente les inconvénients suivants :

- Ombrage partiel de la cellule par la grille de métallisation face avant ;
- la zone fortement dopée (émetteur) est placée sur la face avant, où le taux de génération est maximal. Donc, la recombinaison dans l'émetteur est importante ;
- Pour réaliser la cellule, il est nécessaire d'avoir accès aux deux faces.

Ces problèmes sont évités dans les cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités. La structure d'une cellule interdigitée est présentée sur la figure I-12.

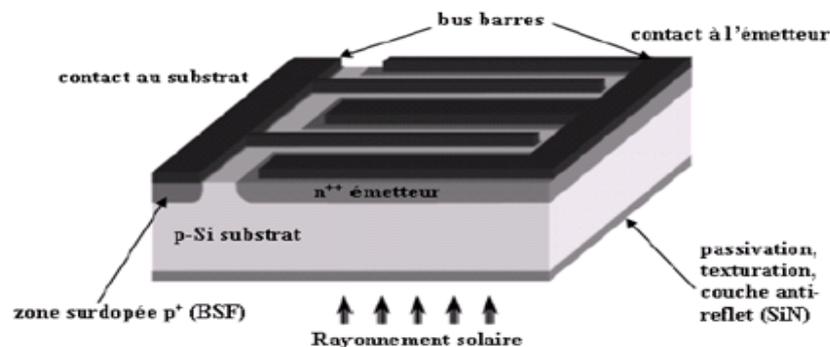


Figure I 12: Cellule PV à contacts arrières interdigités

Cette cellule est réalisée sur un substrat de silicium de bonne qualité, c'est-à-dire avec une longueur de diffusion plus importante que l'épaisseur du substrat. La jonction p-n est élaborée en forme de peigne et est située sur la face arrière (non exposée) du substrat.

Les contacts ohmiques à l'émetteur et au substrat sont réalisés en forme de peignes interpénétrés. Une zone dopée p+ est formée sous le contact au substrat pour assurer l'ohmicité du contact et réduire la recombinaison des porteurs minoritaires sur le contact.

La face avant de la cellule est texturisée puis on dépose une couche de passivation et antireflet (habituellement le nitrure de silicium).

La cellule interdigitée est éclairée du côté où il n'y a pas de métallisation. La lumière génère des paires électron - trou dans le substrat et ils diffusent vers les contacts correspondants (les électrons vers l'émetteur et les trous vers le BSF). Les paramètres géométriques de la cellule doivent satisfaire la condition suivante : la distance qui doit être parcourue par les porteurs minoritaires entre la génération et le contact, doit être plus petite que la longueur de la diffusion. Dans le cas contraire, le rendement de la cellule va se dégrader en raison des recombinaisons en volume.

I.13.2 Les cellules PV interdigitées ont les avantages suivants

- Il n'y a pas de taux d'ombre des contacts.
- Les contacts étant réalisés sur la face arrière, ils peuvent être larges ce qui réduit la résistance série de la cellule et améliore le confinement optique car les contacts métalliques servent de réflecteur arrière.
- Le courant d'obscurité de la cellule (courant de diode) est réduit car la surface de la jonction p-n est plus petite.
- La recombinaison dans l'émetteur est diminuée puisqu'il est situé sur la face non illuminée.
- Grâce à la faible recombinaison dans l'émetteur, celui-ci peut être fortement dopé. L'avantage d'un émetteur fortement dopé est l'augmentation de la barrière de potentiel de la jonction p - n. Pour conséquent, la tension de circuit ouvert augmente et la recombinaison sur le contact à l'émetteur est réduite
- L'assemblage des cellules PV interdigitées est simplifié car tous les contacts sont situés sur une face de la cellule.

- Pour réaliser la cellule interdigitée, l'accès à une seule face du substrat suffit, sauf pour le dépôt de la couche antireflet. Mais ce dépôt est une opération «moins critique» puisqu'elle se passe à basse température (200-400°C).

I.13.3 Les inconvénients des cellules PV interdigitées sont :

- La complexité de la structure (pour réaliser des cellules interdigitées, la lithographie ou la sérigraphie alignée est nécessaire).
- La longueur de diffusion des porteurs minoritaires doit être nettement plus grande que l'épaisseur de la cellule. Donc, la qualité du substrat doit être bonne.
- Les cellules PV interdigitées sont très sensibles à la recombinaison en surface. Donc, la passivation de la face avant doit être très bonne

I.14 Le coût des cellules photovoltaïques.

En 1974, le prix d'un module photovoltaïque en silicium était de 30 \$/Wc [31], et il est actuellement de 1,3 \$/Wc [10]. A partir de ces chiffres, on voit que d'énormes progrès ont été réalisés pour réduire le coût des cellules photovoltaïques. Néanmoins, l'énergie photovoltaïque reste trop coûteuse pour pouvoir être compétitive par rapport aux énergies fossiles et nucléaires.

Pour réduire le coût des cellules photovoltaïques, différentes approches peuvent être adoptées. Tout d'abord, la taille des cellules en silicium cristallin est passée de 10x10 cm² à 12,5 x 12,5 cm² puis à 15x15 cm² en production. Plusieurs travaux ont également été menés pour implanter les recuits rapides thermiques à toutes les étapes où des cuissons sont nécessaires lors de l'élaboration des cellules PV (émetteur, BSF, croissance de l'oxyde de passivation, recuit des contacts et des interfaces) [26]. En effet, les temps de cuissons, la contamination et les coûts sont nettement réduits. Néanmoins, les recuits thermiques rapides sont essentiellement utilisés pour la cuisson des contacts et la formation du BSF.

La figure I-13 représente la répartition du prix du module photovoltaïque constitué de cellules PV en silicium multicristallin [33].

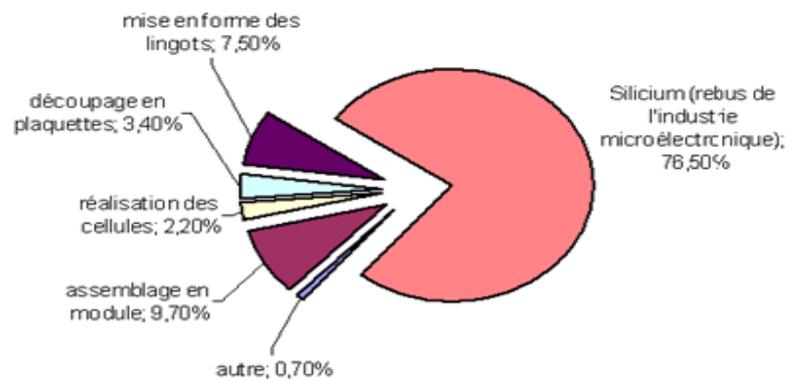


Figure I.13 : Répartition du prix du module photovoltaïque à base de silicium multicristallin [34].

Le prix des plaques de silicium (c'est à dire le prix de la matière première, de la mise en forme des lingots et de la découpe des lingots) constitue la part la plus importante du prix des cellules photovoltaïques. Il est donc clair que la réduction du coût du module nécessite de réduire le coût de l'élaboration du substrat. La méthode la plus accessible pour les industriels est la réduction de l'épaisseur des plaques de silicium tout en améliorant la passivation des surfaces et le confinement optique [34]. Il est cependant difficile de descendre en dessous de 150 μm d'épaisseur sur des plaques de grande surface car il y a de risque de casse lors de la réalisation de la cellule.

I.15 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 son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. Puis nous avons abordé les cellules photovoltaïques sur couches minces de silicium et nous avons montré l'intérêt de la technologie à contacts arrière interdigités.

Chapitre II

Structure métal semi-conducteur

II.1 Introduction

Le but de ce chapitre de présenter les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons ainsi, en premier lieu, quelques notions sur la structure métal semi-conducteur et les phénomènes physiques du contact métal semi-conducteur. Nous présentons ensuite les grandeurs physiques et mécanismes de transport du courant qui permettant d'évaluer les performances et la caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque de type Schottky.

La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à l'effet de la température sur les caractéristiques photovoltaïques en se basant sur la variation des différents paramètres physiques du matériau.

II.2 La structure Métal-Semi-conducteur

La structure Métal-Semi-conducteur (M-SC) est le dispositif *unipolaire* le plus simple. Il est à la base d'un grand nombre de structures plus complexes. Le *dispositif unipolaire* veut dire qu'on a un seul type de porteurs (électrons ou trous) qui participe de façon importante à la conduction du courant et détermine les conditions de fonctionnement du dispositif.

Souvent, l'application d'une tension sur une structure (M-SC) produit une caractéristique $I(V)$ non symétrique, la structure se comporte comme un redresseur : c'est une diode SCHOTTKY

Certaines structures (M-SC) peuvent présenter des caractéristiques $I(V)$ très symétriques, ce sont alors des contacts ohmiques. La maîtrise des contacts ohmiques est capitale pour réaliser les connexions entre les différentes structures d'un circuit intégré.

Les structures (M-SC) sont particulièrement bien adaptées à la technologie silicium. Elles sont souvent réalisées en ouvrant une fenêtre dans une couche d'oxyde et en déposant sous vide un film métallique qui entre en contact intime avec le semi-conducteur.

II.3 Travail de sortie :

Dans le métal, l'électron de conduction est soumis à un ensemble de forces d'interaction dont la résultante est nulle. Il en résulte que cet électron est libre de se déplacer, sous l'action d'un champ appliqué par exemple. Quand l'électron atteint la surface du métal, la compensation des forces d'interaction entre-elles n'est plus totale, l'électron est retenu à l'intérieur du métal. Pour extraire cet électron, il faut lui fournir de l'énergie.

Au zéro degré absolu, tous les électrons libres sont situés dans la bande de conduction au-dessous du niveau de Fermi. Il en résulte que l'énergie minimum qu'il faut fournir pour extraire un électron du métal, est l'énergie nécessaire à l'extraction d'un électron du niveau de Fermi

pour l'amener au niveau du vide NV. Cette quantité est appelée travail de sortie du métal et est notée Φ_m . Le tableau (II.1) donne le travail de sortie de certains métaux utilisés en microélectronique ou optoélectronique.

Elément	Travail de Sortie (eV)
Ag	4.33
Al	4.33
Au	5.10
Cr	4.5
Sn	4.4
Mo	4.63
Ni	5.15
Pd	5.12
Pt	5.65
Ti	4.33
W	4.63

Tableau II.1 : Travaux de sortie, d'après [32]

Le travail de sortie d'un métal (figure II.1) est donc donné par l'expression:

$$q \Phi_m = NV - E_F \quad \text{II.1}$$

où NV représente l'énergie d'un électron extrait du corps et sans vitesse initiale. C'est l'énergie potentielle de l'électron dans le vide au voisinage du corps étudié.

II.4 Affinité électronique :

Dans les semi-conducteurs et les isolants, le travail de sortie $q\Phi_s$ est défini de la même manière. Cependant, pour les semi-conducteurs, la position du niveau de Fermi dépend du dopage et $q\Phi_s$ n'est pas une constante physique du matériau. Sauf pour les semi-conducteurs dégénérés, il n'y a pas d'électron au niveau de Fermi. On définit alors l'affinité χ_s électronique comme l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé au bas de la bande de conduction pour l'amener au niveau du vide. Cette grandeur est une constante physique du semi-conducteur: et est donnée par l'expression :

$$q\chi_s = NV - E_C \quad \text{II.2}$$

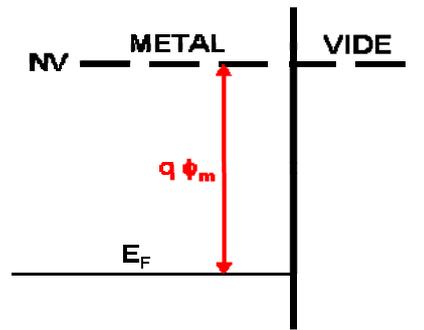


Figure II-1: Travail de sortie d'un métal

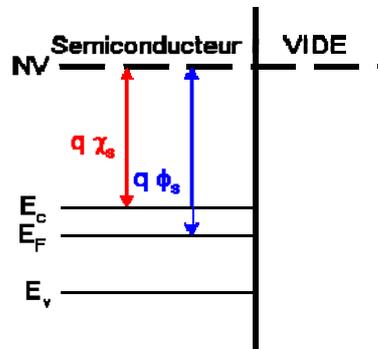


Figure II-2 : L'affinité électronique

Le tableau (II.2) donne les affinités électroniques de quelques semi-conducteurs utilisés en microélectronique.

Elément	L'affinité électronique (eV)	Elément	L'affinité électronique (eV)
Ge	4.13	GaAs	4.07
Si	4.01	AlAs	3.5

Tableau II.2 : L'affinité électronique (χ_s).d'après [32]

II.5 Effet Schottky.

Lorsqu'un électron est extrait d'un métal, il induit une charge $+q$ à l'intérieur : charge image. En électrostatique, on montre que les lignes de champ établies entre la charge $(-q)$ et la charge image $(+q)$ espacées de la distance $2x$ sont perpendiculaires à la surface conductrice

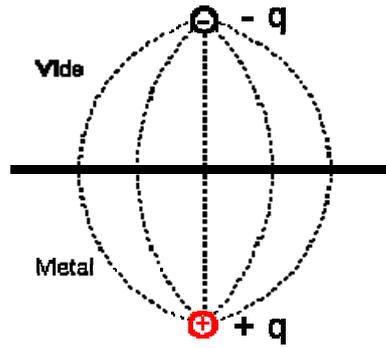


Figure II-3 : Effet Schottky

La force de coulomb exercée par le conducteur sur l'électron dans le vide est :

$$F = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{(2x)^2} \tag{II.3}$$

ϵ_0 : Permittivité du vide

A la distance (x) du matériau, son énergie potentielle est égale au travail, changé de signe, qu'il faut pour l'amener à l'infini.

$$W(x) = -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} \tag{II.4}$$

Pour des raisons de continuité, cette énergie potentielle tend vers E_F à la surface du matériau.

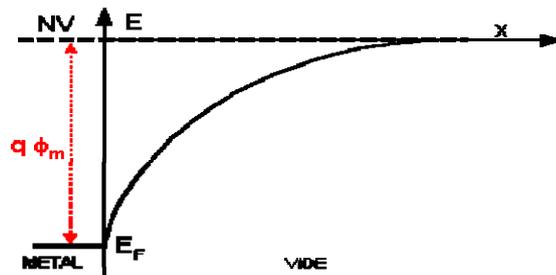


Figure II-4: Potentiel image

L'énergie de la barrière de potentiel à la sortie du métal ne passe pas brutalement de $q\Phi_m$ à 0 mais est de la forme :

$$qV_b(x) = q\Phi_m - \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} \tag{II.5}$$

II.6 États de surface

En pratique, la surface provoque une modification des états électroniques par divers phénomènes à savoir :

- phénomènes intrinsèques : la rupture de la périodicité du réseau génère des liaisons pendantes. Il en résulte des états électroniques différents de ceux existants à l'intérieur du semi-conducteur.
- phénomènes extrinsèques : quoique l'on fasse, des atomes étrangers vont venir à la surface et créer des niveaux d'énergie inexistant dans le volume cristallin. Ce sont des molécules de solvant utilisés dans les traitements de surface et surtout des atomes d'oxygène de l'air (création d'une couche d'oxyde natif de quelques Å°)

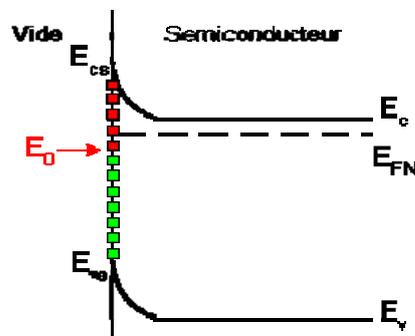


Figure II-5 : Effet des états de surface

Ces états d'énergie, appelés états de surface, sont situés dans la bande interdite et sont généralement régulièrement distribués entre E_C et E_V . Ils sont caractérisés par un niveau de neutralité E_0 tel que si tous les états situés au dessous sont occupés par un électron, tous les états en dessus sont vides de façon que la surface est électriquement neutre. Expérimentalement, le niveau E_0 se trouve aux environs de $E_g/3$ pour la plupart des semi-conducteurs. En d'autres termes, les états de surface vides situés au dessus de E_0 , seront chargés positivement et considérés comme des atomes donneurs ionisés, alors que les états de surface occupés situés en dessous de E_0 seront chargés négativement et seront considérés comme des atomes accepteurs ionisés. Si au voisinage de la surface du cristal semi-conducteur, la densité des électrons libres est inférieure à celle existant à l'intérieur, la bande de conduction s'incurve vers le haut pour s'écarter du niveau de FERMI. Il en résulte un potentiel de surface tel que :

$$V_s = - (E_{CS} - E_C) / q = - (E_{VS} - E_V) / q \text{ (V)} \quad \text{II.6}$$

II.7 Le contact Métal-Semi-conducteur

Quand un métal et un semi-conducteur sont en contact, la structure des bandes d'énergie à l'interface est conditionnée par la différence éventuelle entre le travail de sortie du métal : $q\Phi_m$ et le travail de sortie du semi-conducteur : $q\Phi_s$. Il existe à l'interface une barrière de potentiel donnée par :

$$\Phi_b = q\Phi_m - q\chi_s \quad \text{II.7}$$

Dans toute l'étude, on considérera le contact entre un métal et un semi-conducteur de type "N"

- Cas où $q\Phi_m = q\chi_s$

Si on prend le niveau de l'électron dans le vide comme niveau de référence NV, le diagramme énergétique dans chacun des matériaux est représenté sur la figure (II-6). Les niveaux de FERMI du métal E_{Fm} et du semi-conducteur E_{FN} sont alignés en l'absence de contact, car leur distance au niveau du vide est la même.

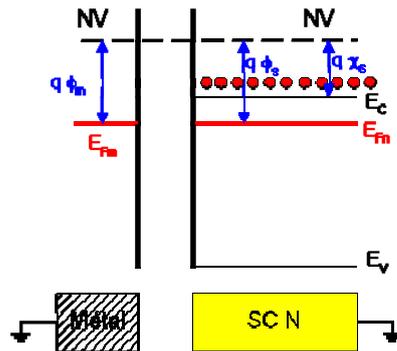


Figure II-6 : Diagramme énergétique

Lorsque le contact est réalisé, les niveaux de FERMI étant déjà alignés, l'équilibre thermodynamique peut se réaliser sans échange de porteurs. Le diagramme énergétique est représenté sur la figure (II-7). La barrière de potentiel Φ_b s'établit au niveau de l'interface et ce diagramme énergétique est valable quel soit le type (P ou N) du semi-conducteur.

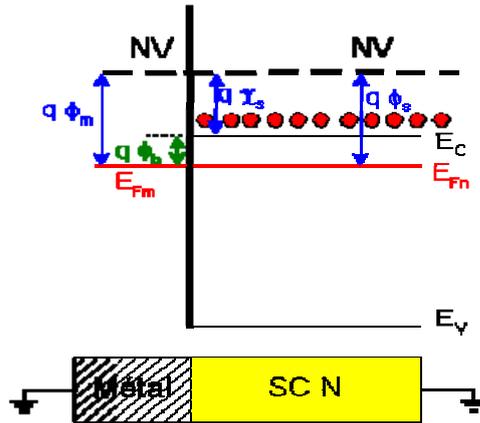


Figure II-7 : diagramme énergétique

On obtient le diagramme correspondant à un semi-conducteur de type P(N) en déplaçant verticalement vers le haut (bas) les bandes de conduction et de valence dans le diagramme précédent. Les bandes sont horizontales, on dit que le système est en régime de bandes plates.

. Cas où $q\Phi_m > q\Phi_s$

Le diagramme énergétique dans chacun des matériaux est représenté sur la figure (II-8)

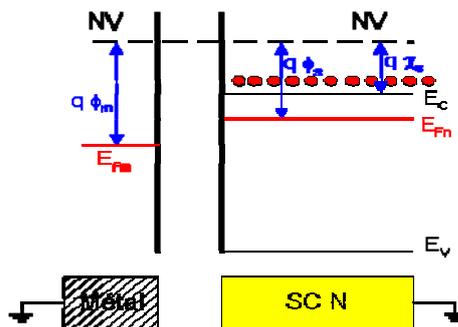


Figure II-8 : diagramme énergétique

Lors de la mise en contact du métal et du semi-conducteur figure (II-9), les électrons du semi-conducteur, situés près de l'interface, possèdent une plus grande énergie que ceux du métal. Ils vont donc passer vers le métal en laissant derrière eux les atomes donneurs positifs fixes. Ce phénomène s'arrête lorsque l'alignement des niveaux de Fermi est réalisé.

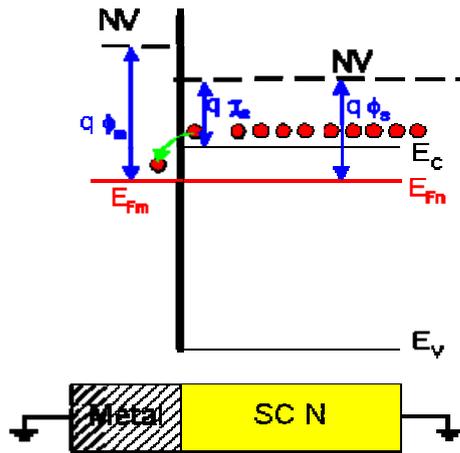


Figure II-9 : Diagramme énergétique

Dans le semi-conducteur, une zone de déplétion (ZCE) se crée Figure II-10. On supposera que cette zone est entièrement dépourvue de porteurs majoritaires sur une épaisseur W . Au delà, la densité des porteurs majoritaire est égale au dopage N du semi-conducteur.

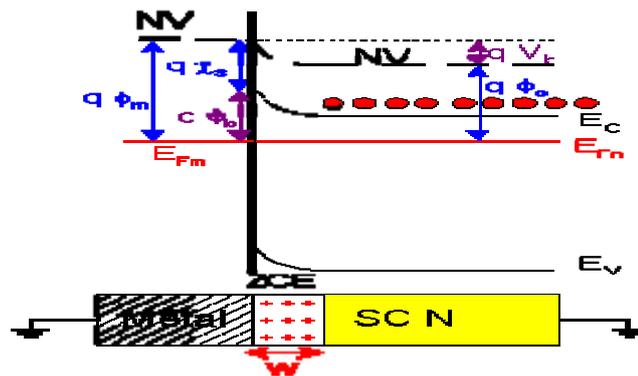


Figure II-10 : Diagramme énergétique

A l'équilibre, quand les niveaux de Fermi sont alignés On a: La hauteur de la barrière qui s'oppose au passage des électrons du métal vers semi-conducteur est :

$$\Phi_b = q\Phi_m - q\chi_s \tag{II.8}$$

La hauteur de la barrière qui s'oppose au passage des électrons du semi-conducteur vers métal est

$$qV_b = q\Phi_m - q\Phi_s \tag{II.9}$$

V_b est le potentiel de barrière de la ZCE apparue dans le semi-conducteur.

- **Zone de charge d'espace :**

La dissociation des excitons nécessite un champ électrique. Celui-ci apparaît spontanément lors de la mise en contact d'un métal et d'un semi-conducteur. L'étendue de la région dans laquelle règne ce champ dépend de la qualité du contact. Dans le cas le moins favorable, le champ électrique n'est présent qu'à l'interface. Seuls les excitons atteignant l'interface seront dissociés. L'épaisseur active du film correspond alors à la longueur de diffusion des excitons. Si le contact est un contact Schottky idéal, le champ électrique s'étend dans le semi-conducteur sur une épaisseur du film appelée zone de déplétion. La largeur W de la zone de déplétion peut être déterminée si l'on fait les hypothèses suivantes [33,34]:

- La résistance de la barrière Schottky doit être plus grande que la résistance du volume.
- On se place dans le cadre de l'approximation thermo-ionique.
- La détermination de la distribution de la densité d'états par la mesure de la capacité

Si on suppose que tous les états impliqués peuvent suivre la modulation de la barrière, alors sous ces conditions, la largeur de la zone de déplétion W s'écrit [34]

$$W = \sqrt{\frac{2k\varepsilon_0}{qN} (\phi_s - \phi_m)} \quad \text{II.10}$$

Cette largeur peut être modifiée artificiellement en appliquant une tension aux bornes de la cellule photovoltaïque. L'expression de la largeur W devient alors

$$W = \sqrt{\frac{2k\varepsilon_0}{qN} (V_b - V)} \quad \text{II.11}$$

V_b est le potentiel de la barrière Schottky et V la tension continue appliquée.

La capacité C mesurée est la capacité de la zone de déplétion Schottky et s'écrit

$$C = \frac{k\varepsilon_0}{w} \quad \text{II.12}$$

En combinant les deux équations, par élimination de W , on obtient :

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_b - V)}{qk\varepsilon_0 N} \quad \text{II.13}$$

- **Cas où $q\phi_m < q\phi_s$**

Le diagramme énergétique dans chacun des matériaux est représenté sur la figure (II-11)

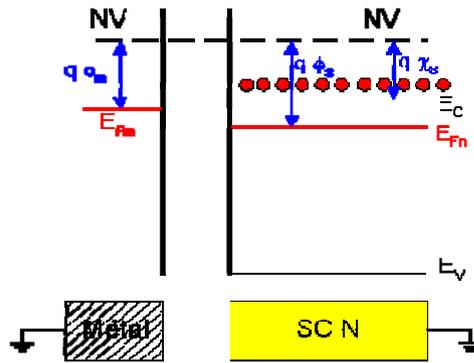


Figure II-11 : diagramme énergétique

Lorsque les deux matériaux sont mis au contact, le travail de sortie du métal étant inférieur à celui du semi-conducteur, les électrons sortent du métal pour entrer dans semi-conducteur. Le système évolue jusqu'à alignement des niveaux de Fermi figure (II-12).

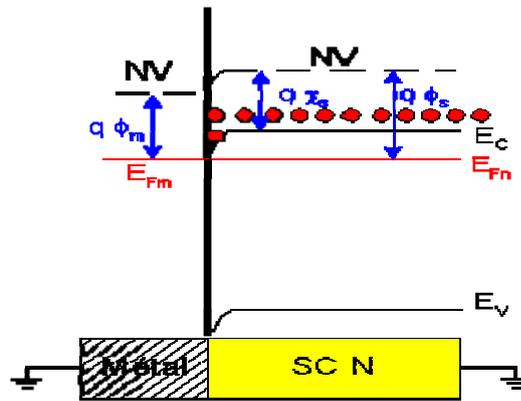


Figure II.12 : Diagramme énergétique

Il apparaît une zone de déficit de porteurs négatifs dans le métal et une accumulation dans le semi-conducteur. Il y a donc une accumulation de porteurs majoritaires dans le semi-conducteur et le niveau de Fermi s'aligne. Il n'existe donc aucune zone dépourvue de porteurs majoritaires dans la structure. Cette dernière conduira l'électricité dès qu'une tension sera appliquée. Le contact dans ce cas est ohmique.

Dans le cas d'un contact métal-semi-conducteur de type "P", les conditions entre $q\Phi_m$ et $q\Phi_s$ sont inversées [35].

II.8 Caractéristiques électriques de la cellule SCHOTTKY

Quand une jonction métal-semi-conducteur (diode SCHOTTKY) est éclairée par des photons d'énergie supérieure à la valeur du gap E_g , des paires électron-trou sont générées et séparées sous

l'influence du champ électrique interne qui règne dans la zone de transition, dite zone de charge d'espace(voire paragraphe II.7.2.1)

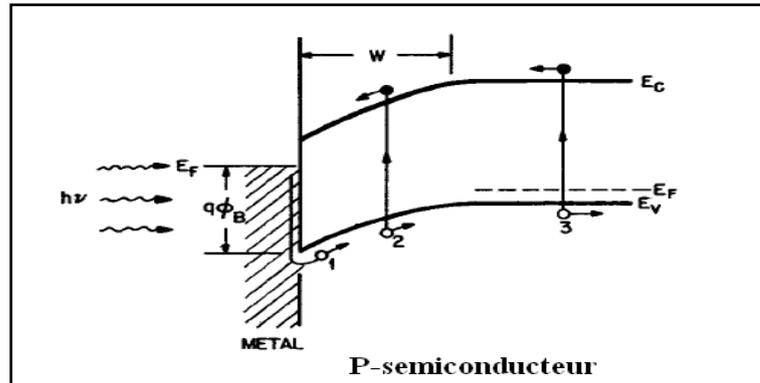


Figure II.13 Diagramme de bandes d'énergie d'une photopile Schottky sous illumination [36]

Pour une cellule solaire, la caractéristique $I(V)$ est d'une grande importance, parce qu'elle caractérise la cellule solaire comme générateur de puissance. Dans le cas d'une jonction idéale, elle est donnée par l'expression:

$$I(v) = I_0 \times \left(\exp \left(\frac{qv}{kT} \right) - 1 \right) - I_{ph} \quad \text{II.14}$$

Où :

- I_0 : le courant de saturation ;
- I_{ph} le courant de court circuit fournit par la lumière ;
- $I_0 \times \left(\exp \left(\frac{qv}{kT} \right) - 1 \right)$: le courant circulant dans l'obscurité.

La Figure (II.14) représente une courbe typique d'une cellule simple, ainsi que les paramètres les plus importants découlant de cette courbe qui sont :

- Le courant de court circuit I_{cc} ;
- La tension en circuit ouvert V_{co} ;
- Le point de puissance maximale PPM (I_m, V_m).

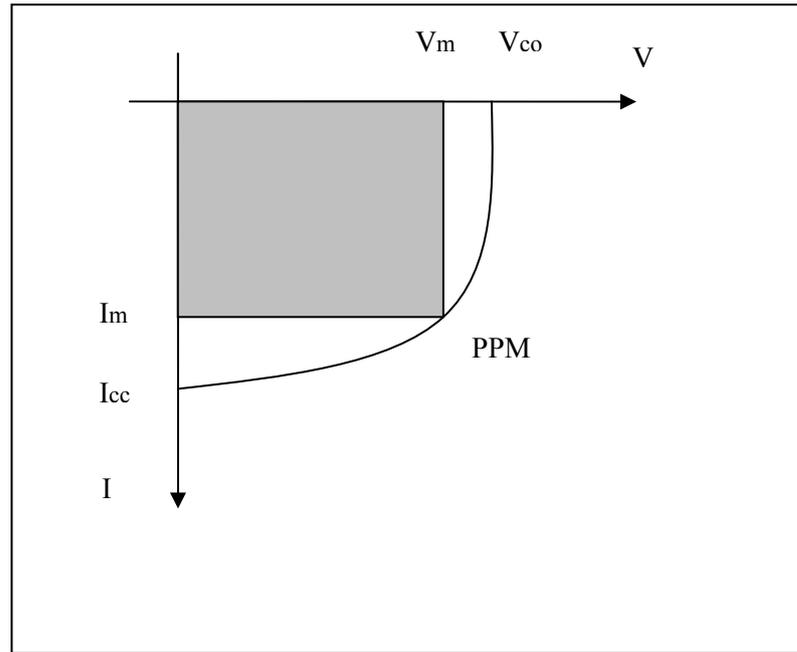


Figure II.14- : la caractéristique I(V) d'une cellule solaire sous éclairage

Si ce dernier point est connu, on peut calculer deux facteurs importants :

- Le facteur de forme « FF » qui compare la puissance maximale possible avec les limites I_{cc} et V_{co} .

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_{\max} \times V_{\max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad \text{II.15}$$

- Le facteur de conversion de l'énergie optique de la lumière en énergie électrique, connu sous le nom « rendement énergétique η », défini comme le rapport entre la puissance électrique résultante et la puissance optique incidente.

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{inc}} \quad \text{II.16}$$

Il devient évident qu'afin d'obtenir une efficacité de conversion plus élevée, il faut se placer dans des conditions qui rendent les paramètres V_{co} , I_{cc} , FF maximums.

II.9 Courant d'obscurité

Du fait que la cellule solaire dans l'obscurité est une jonction polarisée en directe, les porteurs de charge majoritaires ayant des énergies suffisantes peuvent franchir la barrière de potentiel et diffusent d'une zone à l'autre et se recombinent.

Pour étudier le courant d'obscurité, il faut connaître les mécanismes principaux de transport.

II.10 Mécanisme de transport du courant :

Le transport du courant dans les contacts métal-semi-conducteur est dû principalement aux porteurs majoritaires, contrairement aux jonctions PN où les porteurs minoritaires qui en sont les responsables.

La figure II.15 montre cinq processus de base pour le transport sous la polarisation en direct [36].

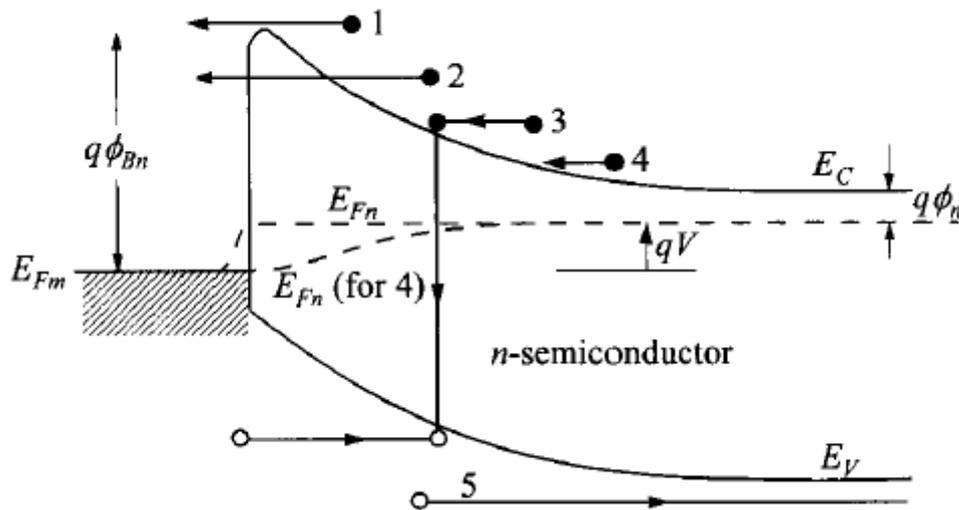


Figure.II.15 : Mécanisme de transport du courant

II.10.1 Emission thermoïonique (TE)

Passage des électrons au dessus de la barrière de potentiel [processus dominant pour des diodes de Schottky avec les semi-conducteurs modérément dopés (par exemple, silicium avec $N_D \leq 10^{17} \text{cm}^{-3}$).

L'expression du courant thermoïonique existant au niveau de la jonction métal semi conducteur, en fonction de la barrière de potentiel existant à l'interface, s'obtient en intégrant, dans l'espace des vitesses, la densité d'électrons se déplaçant sous l'action du champ électrique. On obtient une relation de la forme [24] :

$$J_{SC-M} = J_{TE} \left(\exp \frac{qV}{KT} \right) \tag{II.17}$$

Avec

$$J_{TE} = A^* T^2 \exp \left(- \frac{\phi_{Bn}}{KT} \right) \tag{II.18}$$

$$A^* = \frac{4\pi q K^2 m^*}{h^3} \quad \text{II.19}$$

Où :

A^* : Constante de Richardson

ϕ_{Bn} : Hauteur de la barrière

Dans l'autre sens, la hauteur de la barrière ne varie pas et le déplacement des électrons du métal dans le semi-conducteur est le même sous la polarisation, donc le courant est égal au courant du semi-conducteur dans le métal (c.-à-d., quand $V = 0$):

$$J_{M-SC} = -J_{TE} \quad \text{II.20}$$

La densité du courant totale est donnée par la somme de l'équation (III.3) et (III.6)

$$J = J_{TE} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad \text{II.21}$$

L'équation (II.21) est semblable à l'équation de transport pour des jonctions PN. Cependant, les expressions pour les densités de courant de saturation sont tout à fait différentes.

II.10.2 Courant tunnel

Pour les semi-conducteurs très fortement dopés ou pour des opérations à basses températures, le courant tunnel peut devenir plus significatif. La densité du courant tunnel J_{Tun} est déterminée par la relation :

$$J_{Tun} = \frac{A^{**} T \pi \exp\left[-\frac{q(\phi_{Bn} - V_F)}{E_{00}}\right]}{C_1 k \sin(\pi C_1 k T)} [1 - \exp(-C_1 q V_F)] \quad \text{II.22}$$

Avec

$$C_1 = \frac{1}{2E_{00}} \log\left[\frac{4(\phi_{Bn} - V_F)}{-\phi_n}\right] \quad \text{II.23}$$

$$E_{00} = \frac{q\hbar}{2} \sqrt{\frac{N}{m^* \epsilon_s}} \quad \text{II.24}$$

Où A^{**} est la constante efficace réduite de Richardson de A^*

V_F : Tension direct

ϕ_n : Potentiel de Fermi relatif à la bande de conduction $((E_C - E_F)/q)$

\hbar : Constante de Planck

II.10.3 Courant de diffusion

Le calcul consiste à résoudre l'équation de diffusion des porteurs dans la zone de charge d'espace du semi-conducteur, compte tenu de la présence dans cette zone d'un gradient de concentration et d'un champ électrique faible. Le courant d'électrons s'écrit, en supposant constante la mobilité des porteur.

$$J_x = J_n = q \left(n \mu_n \mathbb{E} + D_n \frac{dn}{dx} \right) \quad \text{II.25}$$

$$= q D_n \left(\frac{n}{kT} \frac{dE_C}{dx} + \frac{dn}{dx} \right) \quad \text{II.26}$$

\mathbb{E} : Champ électrique.

Dans la condition d'équilibre, la densité de courant est indépendante de x , et II.12 peut être intégrée en utilisant $\exp \left[\frac{E_C(x)}{kT} \right]$ comme facteur d'intégration. Nous avons alors:

$$J_n = \int_0^W \exp \left[\frac{E_C(x)}{kT} \right] dx = q D_n \left\langle n(x) \exp \left[\frac{E_C(x)}{kT} \right] \right\rangle \quad \text{II.27}$$

Avec :

$$E_C(x) = q \phi_{Bn} - \frac{q^2 N_D}{\epsilon_s} \left(wx - \frac{x^2}{2} \right) \quad \text{II.28}$$

Et les conditions aux limites, le niveau de fermi du métal $E_{Fm} = 0$

$$E_C(0) = q \phi_{Bn} \quad \text{II.29}$$

$$E_C(w) = q(\phi_n + V) \quad \text{II.30}$$

$$n(0) = N_C \exp \left[-\frac{E_C(0) - E_{Fn}(0)}{kT} \right] = N_C \exp \left(-\frac{q \phi_{Bn}}{kT} \right) \quad \text{II.31}$$

$$n(w) = N_D = N_C \exp \left(-\frac{q \phi_n}{kT} \right) \quad \text{II.32}$$

En substituant les équations II.29-II32 dans l'équation II.26, on obtient :

$$J_n = \frac{q N_C D_n \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]}{\int_0^w \exp \left[-\frac{E_C(x)}{kT} \right] dx} \quad \text{II.33}$$

Pour la barrière Schottky, en négligeant l'effet de la force image et en substituant l'équation II.28 dans l'équation II.33 et compte tenu de l'expression de W en fonction du terme $(V_d + V)$, on a :

$$J_n = q\mu_n N_C E_m \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] = J_D \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \quad \text{II.34}$$

Avec

E_m : champ électrique maximum.

Les expressions de la densité de courant de diffusion et d'émission thermoïonique (équations II.21 et II.34), sont fondamentalement très semblables. Cependant, la densité de courant de saturation J_s de la diffusion dépend de la polarisation et est moins sensible à la température comparée à la densité du courant de saturation J_{TH} d'émission thermoïonique [24-36]

II.10.4 L'injection des porteurs minoritaire

La diode à barrière Schottky est principalement un dispositif des porteurs majoritaires. L'injection des porteurs minoritaires, qui est le rapport du courant des porteurs minoritaires au courant total, est petit parce que la diffusion des porteurs minoritaires est beaucoup plus petite que le courant d'émission thermoïonique des porteurs majoritaires. Cependant, sous une grande polarisation en direct, le courant d'injection des porteurs minoritaire a une valeur non négligeable qui est donnée par la relation suivante :

$$\gamma = \frac{J_p}{J_p + J_n} \approx \frac{J_p}{J_n} \approx \frac{\mu_p n_i^2 J_n}{\mu_n N_D^2 J_{n0}} + \frac{q n_i^2 D_p}{N_D L J_{n0}} \quad \text{II.35}$$

Avec

γ : densité du courant d'injection.

J_p : densité de courant des trous.

J_n : densité de courant des électrons.

J_{n0} : densité du courant de saturation.

μ_n : mobilité des électrons.

μ_p : mobilité des trous.

n_i : concentration intrinsèque.

D_p : le coefficient de diffusion des trous.

N_D : concentration des impuretés des donneurs.

L : la longueur des quas neutres.

II.10.5 Courant total d'obscurité

La densité de courant total d'obscurité est la somme de tous les courants.

II.11 Courant d'éclairement

Les deux contributions principales, au photo-courant, viennent de la zone de charge d'espace et de la région quasi-neutre du substrat. La collection à partir de la zone de charge d'espace est semblable à celle de la jonction P-N :

$$J_{dr} = qT(\lambda)\phi(\lambda)[1 - \exp(-\alpha w)] \quad \text{II.36}$$

Ou : $T(\lambda)$ est le coefficient de transmission du métal.

$\phi(\lambda)$: Flux des photons.

α : Coefficient d'absorption du semi conducteur

Le photo-courant issu de la zone de charge d'espace est donné par une expression identique à celle du courant dans la région quasi-neutre n(p) [32], sauf que $(1-R)$ est remplacé par $T(\lambda)$ et $\alpha(x_j+W)$ par αW [24]

Si le contact arrière est ohmique et l'épaisseur de dispositif est beaucoup plus grande que la longueur de diffusion ($H \gg L_p$), le photo-courant de la région de substrat est simplifié à :

$$J_n = qT(\lambda)\phi(\lambda) \frac{\alpha L_n}{\alpha L_n + 1} \exp(-\alpha w) \quad \text{II.37}$$

Avec

L_n : Longueur de diffusion des électrons.

Le photo-courant total est donné par la somme des équations (II.34) et (II.35).

II.12 La réponse spectrale

La réponse spectrale est le rapport entre la densité du courant collecté et la densité des photons incidents pour chaque longueur d'onde du rayonnement lumineux :

$$RS(\lambda) = \frac{J_n(\lambda) + J_{zce}(\lambda)}{q \times F(\lambda) \times (1 - R(\lambda))} \quad \text{II.38}$$

C'est une quantité très importante pour établir la qualité de la cellule. Elle peut fournir des informations concernant les différentes composantes de la cellule. D'une manière générale, la région de courtes longueurs d'ondes dans le diagramme de la réponse spectrale fournit des

informations concernant l'émetteur, et la région de moyennes et faibles longueurs d'onde fournit des informations concernant la région de déplétion et la base [36].

II.13 Circuit équivalent

Une cellule solaire réelle peut être schématisée par la figure II-16. Elle comprend plusieurs éléments : le photo-courant est représenté par un générateur de courant I_{ph} opposé au courant d'obscurité I_{Obs} de la diode polarisée en direct, voir figure (II-16).

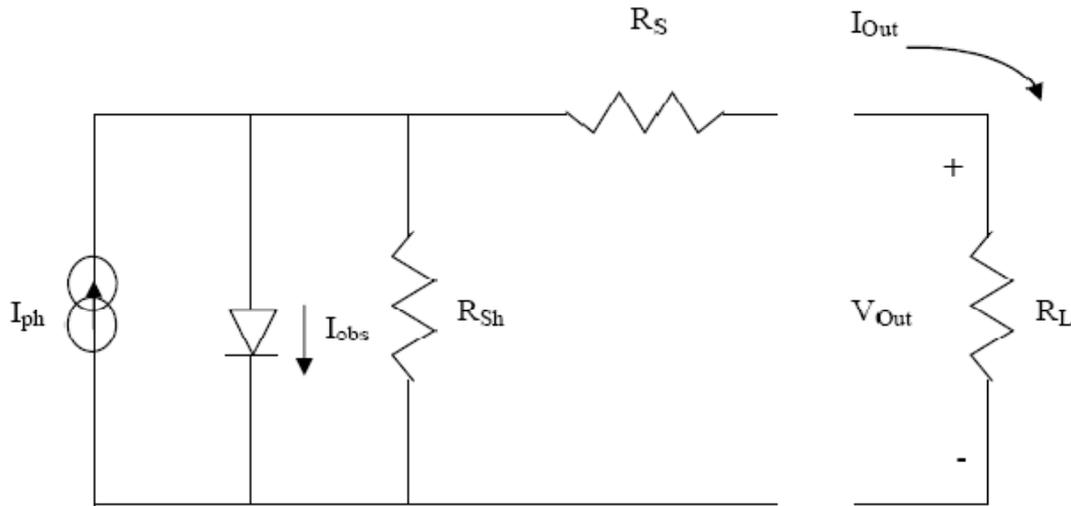


Figure II.16 : Schéma équivalent

La résistance shunt R_{Sh} représente le courant de fuite à la surface de la cellule. Les pertes dues à la réalisation du contact ohmique sur les faces avant et arrière et des résistances de la base et de l'émetteur représentées par une résistance série R_s . L'équation électrique de ce modèle est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left(\exp \left(\frac{q(v + R_s I)}{nkt} \right) - 1 \right) \quad \text{II.39}$$

Les paramètres inconnus de cette équation sont : I_{ph} , I_0 , R_s et n . Si tous les paramètres physiques et géométriques de la cellule sont connus, on peut calculer I_{ph} et I_0 par le calcul décrit dans les paragraphes (II.10) et (II.11) respectivement, et il ne reste donc qu'à déterminer la résistance série R_s et le facteur d'idéalité n . A l'aide d'un essai (courbe) expérimental, on peut déterminer les deux paramètres V_{co} et I_{cc} qui nous permettent de déterminer R_s et n par le calcul suivant :

$$I = 0 \rightarrow v = v_{co} : I_{ph} - I_0 \times \left(\exp \left(\frac{qV_{co}}{nkt} \right) - 1 \right) = 0 \quad \text{II.40}$$

$$v = 0 \rightarrow I = I_{cc} : I_{cc} = I_{ph} - I_0 \times \left(\exp \left(\frac{qR_s I_{cc}}{nkt} \right) - 1 \right) \quad \text{II.41}$$

Si les effets de la résistance série R_s et de la résistance shunt R_{sh} sont pris en considération, les relations précédentes (II.41), (II.40) ne sont plus valables et la relation du courant total d'obscurité devient alors difficile à résoudre analytiquement [22,25].

Dans la plus part des applications, les piles solaires fonctionnent à des températures plus élevées que la température ambiante. Il est à noter qu'entre 80 et 90 % d'énergie non exploitée par la cellule est finalement transformée en chaleur et sert donc à échauffer la cellule. Par conséquent, l'efficacité de la conversion photovoltaïque va être réduite.

II.14 Effet de la température sur les paramètres physiques de la cellule solaire

II.14 1 Le gap énergétique

L'énergie de la bande interdite varie en fonction de la température selon une loi empirique donnée par [37] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \times T^2}{\beta + T} \quad \text{II.42}$$

Où : $\alpha = 4,73 \cdot 10^{-4}$ [eV / °K]

$\beta = 636$ K pour le silicium

$E_g(0) = 1,17$ [eV]

Elle correspond à une faible diminution de la largeur de la bande interdite avec la température.

II.14 2 La concentration intrinsèque

L'expression de la concentration intrinsèque « n_i » est donnée par :

$$n_i(T) = \sqrt{N_c N_v} \times \exp \left(- \frac{E_g(T)}{2kT} \right) \quad \text{II.43}$$

$$N_c = 2 \times \left(\frac{2 \pi k T m_e^*}{h^2} \right)^{3/2} \quad \text{II.44}$$

$$N_v = 2 \times \left(\frac{2 \pi k T m_t^*}{h^2} \right)^{3/2} \quad \text{II.45}$$

Elle dépend fortement de la température à travers le terme exponentiel, ainsi que le produit des densités d'état effectives « $N_c \times N_v$ » qui sont proportionnelles à « T^3 » doublant tout les 11°C [38]. Cette dépendance est d'autant plus faible que la largeur de la bande interdite est plus importante.

II.14 3 Les masses effectives

Les masses effectives des électrons et des trous tirent leur origine de l'interaction de ces derniers avec le potentiel périodique du cristal. Elles varient en fonction de la température selon les deux lois : [39]

$$m_e^*(T) = m_0 \times (1.045 + 4.5 \times 10^{-4} \times T) \quad \text{II.46}$$

$$m_t^*(T) = m_0 \times (0.523 + 1.4 \times 10^{-3} \times T - 1.48 \times 10^{-6} \times T^2) \quad \text{II.47}$$

Tel que : $m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31}$ [kg]

II.14-4 Les durées de vie des porteurs

Les durées de vie des électrons et des trous varie en fonction de la température selon la loi [40] :

$$\tau_{e,t}(T) = \tau_{e,t}^0 \times \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha \quad \text{II.48}$$

pour le silicium

$$\alpha = -0.5$$

$$\tau_e^0 \approx \tau_t^0 \approx 10^{-6} \text{ (s)}$$

II.14.5. La mobilité

La mobilité des porteurs de charge dans un semi-conducteur est affectée par trois types d'interactions qui sont :

- Collisions avec les phonons (dont l'origine est liée à l'agitation thermique des atomes du réseau cristallin) ;
- Chocs sur les défauts du cristal ;
- Chocs sur les impuretés ionisées.

Puisque les trois modes de collision sont indépendants, leurs probabilités s'ajoutent, et par suite, d'après [41], la variation de la mobilité totale en fonction de la température est donnée par la relation :

$$\frac{1}{\mu_{e,t}^{\text{tot}}} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_c} = \frac{1}{\mu_{IL}} + \frac{1}{\mu_c} \quad \text{II.49}$$

Où :

μ_L : est la mobilité due au réseau.

μ_I : est la mobilité due aux impuretés.

μ_c : est la mobilité due aux impuretés ionisées.

$$\mu_c = \frac{1.04 \times 10^{21} \frac{1}{\text{cmvs}} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}}{\sqrt{n.p} \times \ln \left[1 + 7.45 \times 10^{13} \text{cm}^{-2} \times \left(\frac{T}{300} \right)^2 \times (n.p)^{-1/3} \right]} \quad \text{II.50}$$

$$\mu_c^{\text{LI}} = \frac{1252 \frac{\text{cm}^2}{\text{vs}} \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.33}}{1 + \frac{\text{CI}}{1.432 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3} \times \left(\frac{T}{300} \right)^{2.546}}} + 88 \frac{\text{cm}^2}{\text{vs}} \left(\frac{T}{300} \right)^{-0.57} \quad \text{II.51}$$

$$\mu_t^{\text{LI}} = \frac{407 \frac{\text{cm}^2}{\text{vs}} \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.23}}{1 + \frac{\text{CI}}{2.67 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3} \times \left(\frac{T}{300} \right)^{2.546}}} + 54.3 \frac{\text{cm}^2}{\text{vs}} \left(\frac{T}{300} \right)^{-0.57} \quad \text{II.52}$$

Tel que :

T : La température.

n, p : Les concentrations des électrons et des trous respectivement.

CI : La concentration des impuretés ionisées.

A basse température, l'agitation thermique des atomes est faible ; les deux dernières catégories de chocs déterminent la valeur de la mobilité. A l'inverse, à forte température la mobilité dépend surtout des chocs sur les phonons. Enfin, l'augmentation de la température se traduit donc par une diminution de la mobilité.

II.14 6 La constante de diffusion

La diffusion existe même en l'absence d'une force appliquée au cristal, en particulier d'origine électrique. Dans un cristal semi-conducteur, la diffusion est due uniquement au caractère inhomogène du matériau, du fait par exemple de l'inégalité de la répartition des impuretés

introduites lors du dopage. Elle se manifeste par la formation de mouvements ordonnés de particules qui sont les porteurs de charge mobiles « électrons et trous ». Le processus cesse lorsque la répartition est uniforme. Enfin, la relation d'Einstein permet d'obtenir les expressions des constantes de diffusion pour les électrons et les trous en fonction de la température soit :

$$D_{e,t}(T) = \frac{kT}{q} \times \mu_{e,t} \quad \text{II.53}$$

II.14 7 Le coefficient d'absorption

Du fait que le silicium est un semi-conducteur à gap indirect, l'absorption de la lumière est assistée par l'absorption ou l'émission des phonons. D'après [42], la variation du coefficient d'absorption en fonction de la température est donnée par :

$$\alpha(T) = \sum_{i,j=1,2} A_j C_i \times \left\{ \frac{(\hbar\nu - E_{g,j} + E_{ph,i})^2}{\exp\left(\frac{E_{ph,i}}{kT}\right) - 1} + \frac{(\hbar\nu - E_{g,j} - E_{ph,i})^2}{1 - \exp\left(-\frac{E_{ph,i}}{kT}\right)} \right\} + A_d \times \frac{(\hbar\nu - E_{g,d})^3}{\hbar\nu} \quad \text{II.54}$$

Tel que (Pour le silicium) :

$$E_{g,1} = 1.16 \text{ [eV]}$$

$$E_{g,2} = 2.25 \text{ [eV]}$$

$$E_{g,d} = 3.2 \text{ [eV]} \text{ Bande directe .}$$

Et les énergies des phonons sont :

$$E_{ph,1} = 212 \times k \text{ (k est la constante de Boltzmann)}$$

$$E_{ph,2} = 670 \times k$$

$$C_1 = 5.5$$

$$C_2 = 4$$

$$A_1 = 253 \text{ [cm}^{-1} \text{ eV}^{-2}\text{]}$$

$$A_2 = 3312 \text{ [cm}^{-1} \text{ eV}^{-2}\text{]}$$

$$A_d = 2.3 \times 10^7 \text{ [cm}^{-1} \text{ eV}^{-2}\text{]}$$

Le premier terme représente l'absorption des phonons, tandis que le deuxième représente l'émission des phonons pendant l'absorption de la lumière. Le troisième terme donne l'absorption pour une transition directe.

Expérimentalement, le coefficient d'absorption est modelé par la formule mathématique suivante pour le silicium qui ne dépend pas de la température [43] :

$$\alpha(\lambda) = 0.526367 - 1.14425 \times \lambda^{-1} + 0.585368 \times \lambda^{-2} + 0.039958 \times \lambda^{-3} \quad \text{II.55}$$

II.14 8 Le coefficient de réflexion

H.A. Weakliem et al ont essayé d'étudier la réflexion du silicium en fonction de la température [44], ils ont mesuré expérimentalement la réflectivité à trois températures différentes 299 K – 413 K – 516 K pour des énergies de photons de 2,5 jusqu'à 3,8 [eV]. La variation de la réflectivité obtenue est représentée sur la figure ci-dessous :

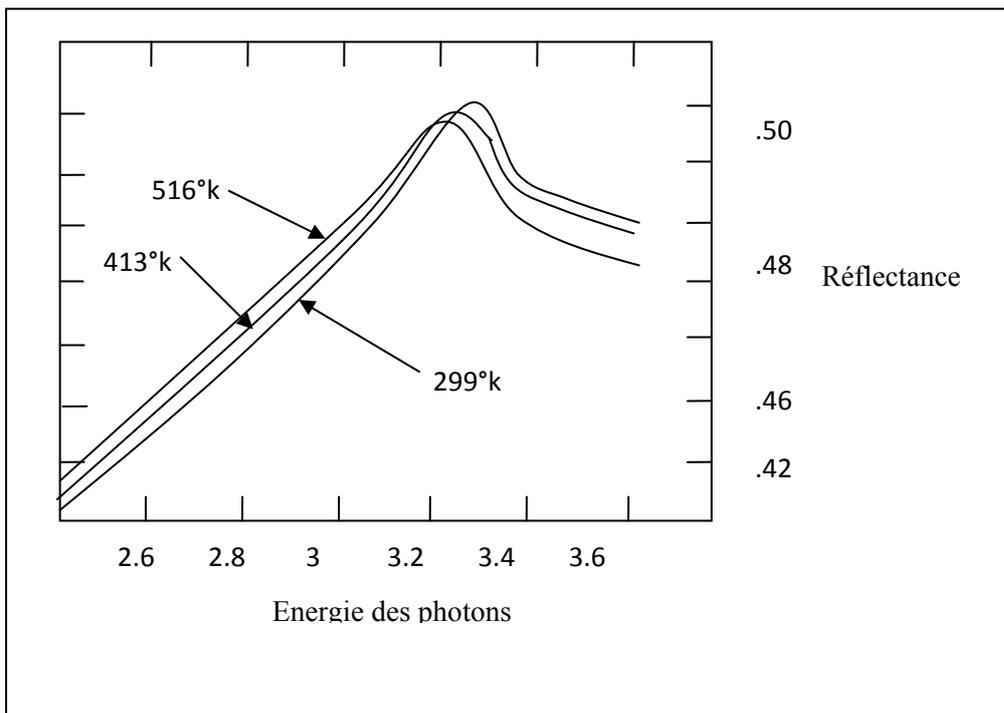


Fig.II.17 : Effet de la température sur la réflectance

Cette variation paraît comme un décalage du spectre entier vers le rouge. Pour de longues longueurs d'onde, ceci produit un léger accroissement de la réflectivité :

$$\frac{1}{R} \times \frac{\Delta R}{\Delta T} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ [K-1]} \quad \text{II.56}$$

Cette dernière correspond à une petite augmentation de l'indice de réfraction :

$$\frac{1}{n} \times \frac{\Delta n}{\Delta T} = 1.3 \times 10^{-4} \quad [\text{K}^{-1}]$$

II.57

Pour les hautes températures, la contribution de la réflectance dans le fonctionnement des cellules est faible, donc on peut négliger le phénomène de la réflexion.

II.15 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans une première étape la physique de la structure Métal-Semi-conducteur (M-SC) et les équations de base qui régissent les mécanismes de transport des porteurs de charges majoritaires dans la cellule solaire de type SCHOTTKY. Par la suite, nous avons décrit le schéma équivalent d'une cellule solaire en faisant apparaître ses paramètres électriques essentiels. Enfin, nous avons présenté l'effet de la température sur les paramètres physiques du matériau qui régissent le fonction d'une photopile solaire.

Chapitre III

Algorithmes Génétiques

III.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 [44] : croisements, mutations, sélection, etc. Les algorithmes génétiques ont déjà une histoire relativement ancienne :

1860

Charles Darwin publie son livre intitulé « *L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature* ». Dans ce livre, Darwin a rejeté l'existence «de systèmes naturels figés», déjà adaptés pour toujours à toutes les conditions extérieures, et a exposé sa théorie de l'évolution des espèces sous l'influence des contraintes extérieures, les êtres vivants se sont graduellement adaptés à leur milieu naturel au travers de processus de reproduction. [45]

20^{ème} siècle

Mise en évidence de l'existence de mutations génétiques. Les problèmes de traitement de l'information sont résolus de manières figés : lors de sa phase de conception, le système reçoit toutes les caractéristiques nécessaires pour les conditions d'exploitation connues au moment de sa conception, ce qui empêche une adaptation à des conditions d'environnement inconnues, variables ou évolutives. Les chercheurs en informatique étudient donc des méthodes pour permettent aux systèmes d'évoluer spontanément en fonction de nouvelles conditions.

1966

Programmation évolutionnaire L. J. Fogel. [45]

1973

Stratégie d'évolution I. Rechenberg.

1975

Dans les années 1960, John Holland étudia les systèmes évolutifs et, en 1975, il introduisit le premier modèle formel des algorithmes génétiques (*the canonical genetic algorithm AGC*) dans son livre « *Adaptation in Natural and Artificial Systems* ». Ce modèle servira de base aux recherches ultérieures.

1989

David Goldberg publia un ouvrage de vulgarisation des algorithmes génétiques. [45]

années 1990

Programmation d'une panoplie d'algorithmes génétiques transcrits en C++, appelée GALib. Cette librairie contient des outils pour des problèmes d'optimisation en utilisant les AG. Elle est conçue pour servir de support de programmation [47].

III.2 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques tentent de simuler le processus d'évolution naturelle suivant le modèle darwinien dans un environnement donné. Ils utilisent un vocabulaire similaire à celui de la génétique naturelle. Cependant, les processus naturels auxquels ils font référence sont beaucoup plus complexes. On parlera ainsi d'individus dans une population. L'individu est représenté par un chromosome constitué de gènes qui contiennent les caractères héréditaires de l'individu. Les principes de sélection, de croisement, de mutation s'inspirent des processus naturels de même nom. La figure III.1 représente un Schéma général d'un algorithme génétique.

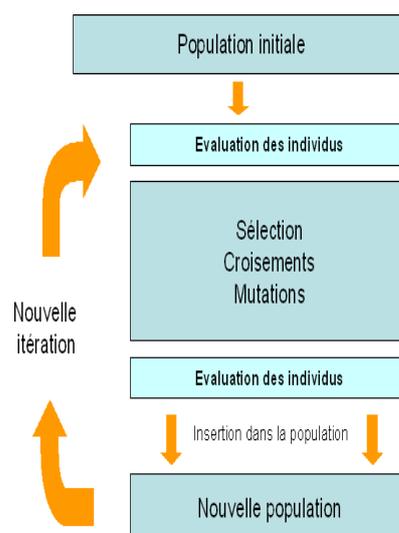


Figure III.1 : Schéma général d'un algorithme génétique [45].

III.3 Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants:

1. Un principe de codage de l'élément population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles.
2. Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important, car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
3. Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée *fitness* ou fonction d'évaluation de l'individu.
4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.
5. Des paramètres de dimensionnement: taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation [46]

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur la figure III.1. On commence par générer une population d'individus de façon aléatoire. Pour passer d'une génération k à la génération $k+1$, les trois opérations suivantes sont répétées pour tous les éléments de la population k . Des couples de parents $P1$ et $P2$ sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations. L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité P_c (généralement autour de 0.6) et génère des couples d'enfants $C1$ et $C2$. D'autres éléments P sont sélectionnés en fonction de leur adaptation. L'opérateur de mutation leur est appliqué avec la probabilité P_m (P_m est généralement très inférieur à P_c) et génère des individus mutés $P0$. Le niveau d'adaptation des enfants ($C1$, $C2$) et des individus mutés $P0$ sont ensuite évalués avant

insertion dans la nouvelle population. Différents critères d'arrêt de l'algorithme peuvent être choisis :

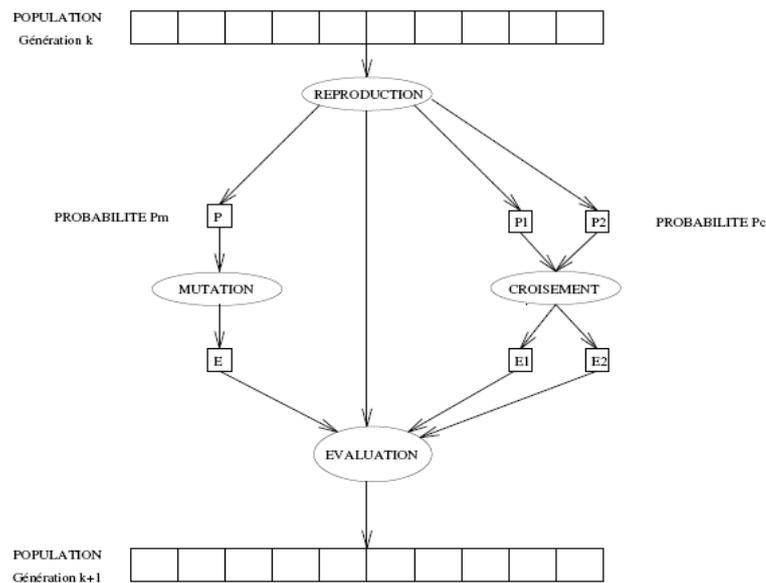


Figure III.2 : Principe général des algorithmes génétiques

- Le nombre de générations que l'on souhaite exécuter peut être fixé a priori. C'est ce que l'on est tenté de faire lorsque l'on doit trouver une solution dans un temps limité.
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus ou plus suffisamment rapidement.

Nous allons maintenant détailler chacun de ces points [46].

III.4 Description détaillée

III.4.1 Codage

Le premier pas dans l'implantation des algorithmes génétiques est de créer une population d'individus initiaux. En effet, les algorithmes génétiques agissent sur une population d'individus, et non pas sur un individu isolé. Par analogie avec la biologie, chaque individu de la population est codé par un *chromosome* ou *génotype*. Une population est donc 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.

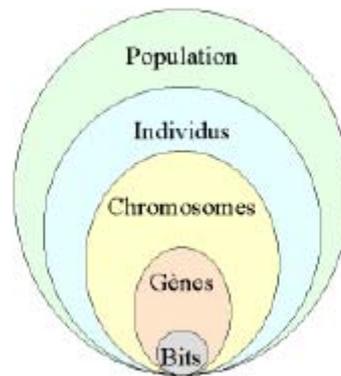


Figure III.3: Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique

Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement:

- **Le codage binaire** : c'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire $\{0,1\}$. Si un gène est représenté par un entier long (32 bits), les chromosomes qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes.
- **Le codage réel** : les nombres binaires étant pour nous moins évocateurs que les nombres réels, des difficultés surviennent pour exprimer la fonction objectif et traiter les problèmes à plusieurs variables. En outre, les opérations de conversion des solutions potentielles (réelles) en chaînes de bits et des solutions obtenues en une forme réelle facilitant leur interprétation sont coûteuses en temps-machine. De plus, elles sont répétées un grand nombre de fois à chaque génération. La représentation réelle propose un compromis intéressant : elle élimine toutes les opérations de conversion, mais en contrepartie elle rend les algorithmes génétiques plus dépendants des problèmes.

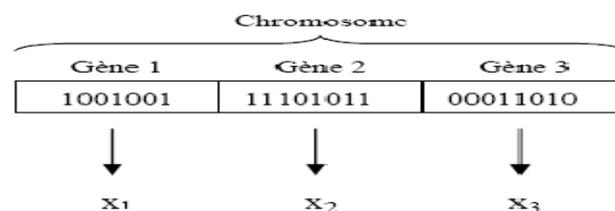


Figure III.4: Illustration schématique du codage des variables réelles

➤ **Le codage de Gray** : dans le cas d'un codage binaire on utilise souvent la "distance de Hamming" 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" qui est un codage qui a comme propriété qu'entre un élément n et un élément $n+1$, donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère.

Il existe deux types de difficultés dans le choix d'un codage. D'une part, celui-ci doit pouvoir être adapté au problème de façon à limiter au mieux la taille de l'espace de recherche, et aussi de façon que les nouveaux chromosomes engendrés par les opérateurs de recherche soient significatifs le plus souvent possible, c'est à dire qu'ils puissent coder des solutions valides respectant les contraintes du problème.

III.4.2 Sélection

La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. On trouve dans la littérature un nombre important de principes de sélection plus ou moins adaptés aux problèmes qu'ils traitent. Les deux principes de sélection suivants sont les plus couramment utilisés.

III.4.2.1 La roulette

Cette méthode exploite la métaphore d'une roulette de casino. La roue est divisée en autant de secteurs que d'individus dans la population. La taille de ces secteurs est proportionnelle à l'adaptation de chaque individu. En faisant tourner la roue, l'individu pointé à l'arrêt de la boule est sélectionné. Les individus les mieux adaptés ont donc plus de chance d'être tirés au sort lors du déroulement du jeu.

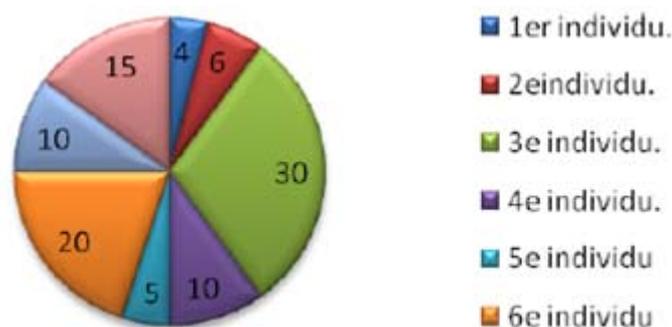


Figure III.5: La roulette

III.4.2.2 Le tournoi

Cette méthode ressemble plus à ce qui se passe dans la réalité. Comme son nom l'indique, elle fait s'affronter deux ou plusieurs individus afin que le meilleur gagne. Plusieurs variantes existent. On peut par exemple faire varier le nombre d'individus qui doivent s'affronter au départ, ou encore permettre ou non que le même individu soit éligible plusieurs fois lors d'un même tournoi.

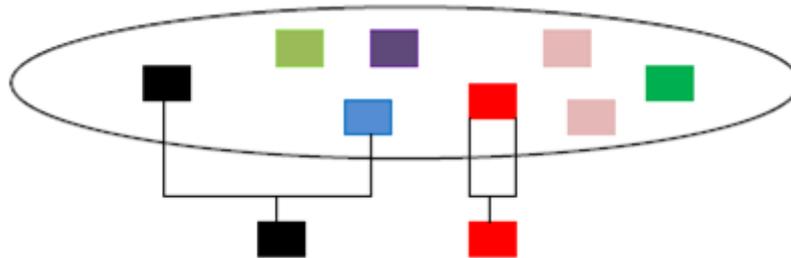


Figure III.5: Le tournoi entre deux individus avec rééligibilité

III.4.3 Croisement

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants.

Initialement, le croisement associé au codage par chaînes de bits est le croisement à découpage de chromosomes (slicing crossover). Pour effectuer ce type de croisement sur des chromosomes constitués de M gènes, on tire aléatoirement une position dans chacun des parents.

III.4.4 Mutation

La mutation est un processus qui consiste à permuter un bit choisi au hasard dans un chromosome. On attribue à ce processus la fréquence à laquelle la mutation se produit. Si on lui associe une probabilité de 0.005, un chromosome aura cinq chances sur mille d'être muté. La mutation modifie aléatoirement la valeur d'une position d'une chaîne. Elle est utile pour ramener du matériel génétique qui aurait été oublié par les opérateurs de croisement. Certaines implantations vont automatiquement changer la valeur du bit choisi, d'autres vont générer aléatoirement une nouvelle valeur de bit, ce qui n'entraîne aucune mutation [46].

III.4.5 Elitisme

L'élitisme est un opérateur optionnel particulier. Il permet de garder l'individu le mieux adapté d'une génération à la suivante. En effet, l'opérateur de sélection peut ne pas le sélectionner, le

croisement avec un autre individu peut donner des individus moins adaptés si les gènes ne sont pas bien recombinaés ou encore sa mutation peut également le rendre moins adapté [48].

III.5 Fonction d'évaluation (fitness) et le hasard

Contrairement à bon nombre de méthodes qui requièrent beaucoup d'informations pour pouvoir fonctionner efficacement, les AGs nécessitent peu d'informations, ils fonctionnent essentiellement de manière aveugle. Pour effectuer une recherche de solutions meilleures, ils n'ont besoin que des valeurs des fonctions objectives associées aux chaînes individuelles. Ces valeurs ont pour but d'évaluer si un individu est mieux adapté qu'un autre à son environnement. Ce qui signifie qu'elle quantifie la réponse fournie au problème pour une solution potentielle donnée. Ainsi, les individus peuvent être comparés entre eux [50]. Les individus déterminés par la fonction objective (fitness) vont servir au processus de sélection des candidats aptes à la reproduction et au processus de survie des espèces. Cette fonction, propre au problème, est souvent simple à formuler lorsqu'il y a peu de paramètres. Au contraire, lorsqu'il y a beaucoup de paramètres ou lorsqu'ils sont corrélés, elle est plus difficile à définir. Dans ce cas, la fonction devient une somme pondérée de plusieurs fonctions. Un ajustement des coefficients est alors nécessaire.

Par ailleurs, les AGs utilisent des règles de transition probabilistes plutôt que déterministes pour guider leur recherche. Le choix des chromosomes à perturber est réalisé de façon probabiliste. Dans le processus de croisement, le lieu de croisement est choisi aléatoirement à l'intérieur du chromosome. De même, le gène devant subir une mutation à l'intérieur d'un chromosome est choisi selon une certaine probabilité. Le hasard occupe donc une place importante dans le fonctionnement des AGs.

III.6 Les grandes étapes de l'algorithme génétique

Le principe d'un algorithme génétique consiste à évaluer une population et à en générer une autre de façon itérative grâce aux actions opérées par les opérateurs génétiques. Le nombre de chromosomes dans une population reste inchangé à travers les diverses générations. Pour mettre en œuvre un AG, il faut disposer d'un schéma pour coder les solutions du problème, une fonction d'évaluation, une procédure d'initialisation, un ensemble d'opérateurs et un ensemble de paramètres qui gouvernent l'élaboration de la population initiale, l'exécution des opérateurs et l'arrêt de génération de nouvelles populations. De façon générale, un AG fonctionne selon les étapes suivantes :

Étape 1 : On génère une population initiale de taille n , représentant le nombre de chromosomes. Puis, on choisit au hasard les gènes qui composent chaque chromosome. La qualité de la population initiale est très importante pour la génération de meilleures solutions. La diversité de la population est très importante pour éviter la convergence prématurée vers des minimums locaux. Cette diversité de population se définit initialement et se maintient en combinant diverses stratégies de croisement et de mutation.

Étape 2 : On évalue chaque chromosome par la fonction objective, ce qui permet de déduire sa valeur d'aptitude.

Étape 3 : On exécute les cycles de génération de populations. Chaque nouvelle génération remplace la précédente. Le nombre de cycle x est déterminé au départ. Dans chaque cycle, n chromosomes sont choisis pour reproduction et croisement deux à deux. Après la création de la $x^{\text{ème}}$ population, les chromosomes vont évoluer de façon que cette dernière génération contient des chromosomes qui sont meilleurs que ceux des générations précédentes.

III.7 Caractéristiques de l'optimisation génétique

Une définition de l'optimisation peut être comme suit (Goldberg, 1995) : « Le désir humain de perfection trouve son expression dans la théorie de l'optimisation ». Elle étudie comment décrire et atteindre ce qui est meilleur, une fois que l'on connaît comment mesurer et modifier ce qui est bon et mauvais. La théorie d'optimisation comprend l'étude quantitative des optimums et les méthodes pour les trouver ». Donc, l'optimisation cherche à améliorer une performance en se rapprochant d'un ou des points optimaux via un procédé d'amélioration. Cependant, les procédures d'optimisation classiques se concentrent souvent sur les résultats finaux (convergence vers un optimum) et négligent les performances intermédiaires en oubliant que l'objectif majeur de l'optimisation est l'amélioration. Les AGs sont un processus d'optimisation qui tient compte de cette idée en recherchant de meilleures solutions au cours des générations. En outre, face à un problème pour lequel il existe une infinité de solutions, la recherche d'une solution optimale consiste à explorer l'espace des solutions en se laissant guider par les principes de l'algorithme génétique, plutôt que d'essayer naïvement toutes les solutions une à une pour trouver la meilleure.

Les AGs se caractérisent par rapport aux différentes méthodes classiques d'optimisation selon les principaux points suivants:

- ✓ Ils utilisent un codage de paramètres et non pas les paramètres eux même du problème considéré.

- ✓ Ils considèrent une population de solutions au lieu d'une solution unique. Ceci va permettre d'escalader plusieurs pics en parallèle, réduisant ainsi la probabilité de trouver un faux pic.
- ✓ Ils utilisent des règles de transitions probabilistes et non déterministes dans le but d'inscrire leur exploration dans une optique d'amélioration probable.

III.8 Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques

III.8.1 Avantages des AGs

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

III.8.2 Inconvénients des AGs

- Les AGs ne sont encore actuellement pas très efficaces en coût (ou vitesse de convergence), vis-à-vis de méthodes d'optimisation plus classiques;
- Parfois les AGs convergent très vite vers un individu particulier de la population dont la valeur d'adaptation est très élevée;
- Le respect de la contrainte de domaine par la solution codée sous forme de chaîne de bits pose parfois problème. Il faut bien choisir le codage, voir modifier les opérateurs;
- 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, le choix des opérateurs et des paramètres seront souvent critiques, mais aucune théorie générale ne permet de connaître avec certitude la bonne paramétrisation, il faudra faire plusieurs expériences pour s'en approcher [51].

III.9 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons donné une description du processus d'optimisation, par un algorithme génétique.

Ce processus se base sur plusieurs alternatives d'une population à chaque génération limitant ainsi le risque de convergence vers un optimum local. La convergence du processus d'optimisation est tributaire du choix de divers paramètres et opérateurs génétiques (taille de la population, codage, mutation, croisement, sélection, etc.). Ces derniers sont aussi à gérer en fonction des caractéristiques du problème à résoudre.

Les AG sont intéressants pour la résolution de certains problèmes pour lesquels les méthodes classiques d'optimisation, basées sur le calcul des gradients, s'avèrent inopérantes, c'est-à-dire lorsque la fonction objectif et les contraintes sont discontinues ou que leurs dérivées sont difficilement quantifiables.

Cependant, les AG ne sont pas confrontées par des théories permettant de démontrer l'exactitude de la solution optimale. On se contente de la recherche d'une solution non rigoureusement optimale, mais très proche de l'optimum ou presque optimale. Une telle solution peut être interprétée comme un compromis entre faisabilité et performance par l'ingénieur qui s'attache davantage à quantifier l'efficacité du choix des variables de conception sur son projet plutôt que l'optimum lui-même.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans le présent chapitre, on s'intéresse à l'étude de l'effet de la température sur les paramètres électriques, tels que le courant de court circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement (η) d'une cellule solaire de type Schottky. Dans notre cas, on utilise les algorithmes génétiques (AG) pour déterminer l'évolution des paramètres optimaux tels que la hauteur de la barrière, le facteur d'idéalité et la résistance série en fonction de la température pour une fonction fitness minimale. La base de données utilisée pour l'optimisation de notre modèle analytique est basée sur un modèle expérimentale [53].

IV.2. Extraction des paramètres

La méthode d'extraction de paramètres par les algorithmes génétiques (AG) fournit des solutions optimales globales de la caractéristique I - V du contact métal semi-conducteur étudié. La fonction fitness est définie en termes de qualité d'adaptation pour des données expérimentales.

Le courant par émission thermoïonique, qui prédomine dans notre structure, avec une résistance série, est donné par l'expression :

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{q(V-IR_s)}{nKT}\right) \quad \text{IV.1}$$

où le courant de saturation I_0 est donné par :

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left[-\frac{q\Phi_b}{KT}\right] \quad \text{IV.2}$$

Avec :

q : charge d'électron

V : tension appliquée

R_s : résistance série

A* : constant de Richardson 32 A/cm²K²

n et **Φ_b** : sont le facteur d'idéalité et la hauteur de la barrière respectivement, qui dépendent de la température.

L'équation (IV.1) peut s'écrire également sous la forme [52] :

$$V = \frac{nKT}{q} \log\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) + IR_s \quad \text{IV.3}$$

Ce qui permet d'évaluer la tension pour un courant donné, et par la suite minimiser l'erreur sur la tension. Les valeurs n et Φ_b peuvent être optimisées en fonction de la température en se basant sur les résultats expérimentaux qui présentent l'effet de température dans une large gamme allant de 140 à 300 K.

Les variations de la hauteur de la barrière et celles du facteur d'idéalité s'expriment par les relations suivantes [53,54]

$$n(T) = (n_1/T_0) \times T^2 - (n_2/T_0) \times T + n_3 \quad \text{IV.4}$$

$$\Phi_b(T) = -(\Phi_1/T_0) \times T^2 + (\Phi_2/T_0) \times T + \Phi_3 \quad \text{IV.5}$$

Avec

$n_1, n_2, n_3, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ sont des paramètres à optimiser par les algorithmes génétiques et

T_0 une température de référence égale à 100 K [54].

Dans notre application, on a sept paramètres, les composantes n_i, Φ_i et R_s , qui sont regroupés dans un vecteur appelé chromosome. Ces paramètres sont à optimiser par la minimisation de la fonction fitness (f) qui utilise pour l'évaluation des chromosomes est définie comme :

$$f = \frac{1}{M} \sum_T \sum_I \left[\frac{V_{\text{exp}} - V_{\text{AG}}}{V_{\text{exp}}} \right]^2 \quad \text{IV.6}$$

Où M représente la taille de la base des données expérimentales tandis que exp et AG représente respectivement les données expérimentales et les données calculées par la technique AG.

L'organigramme de notre approche évolutionnaire proposé pour trouver les paramètres optimaux et convenables à ceux de l'expérimental est présenté dans la figure IV.1

IV.3 Application des étapes

Notre processus d'optimisation par les algorithmes génétiques pour minimiser la fonction fitness (l'expression IV.6), nécessite l'utilisation des règles de la boîte d'outil, sous MATLAB, qui sont :

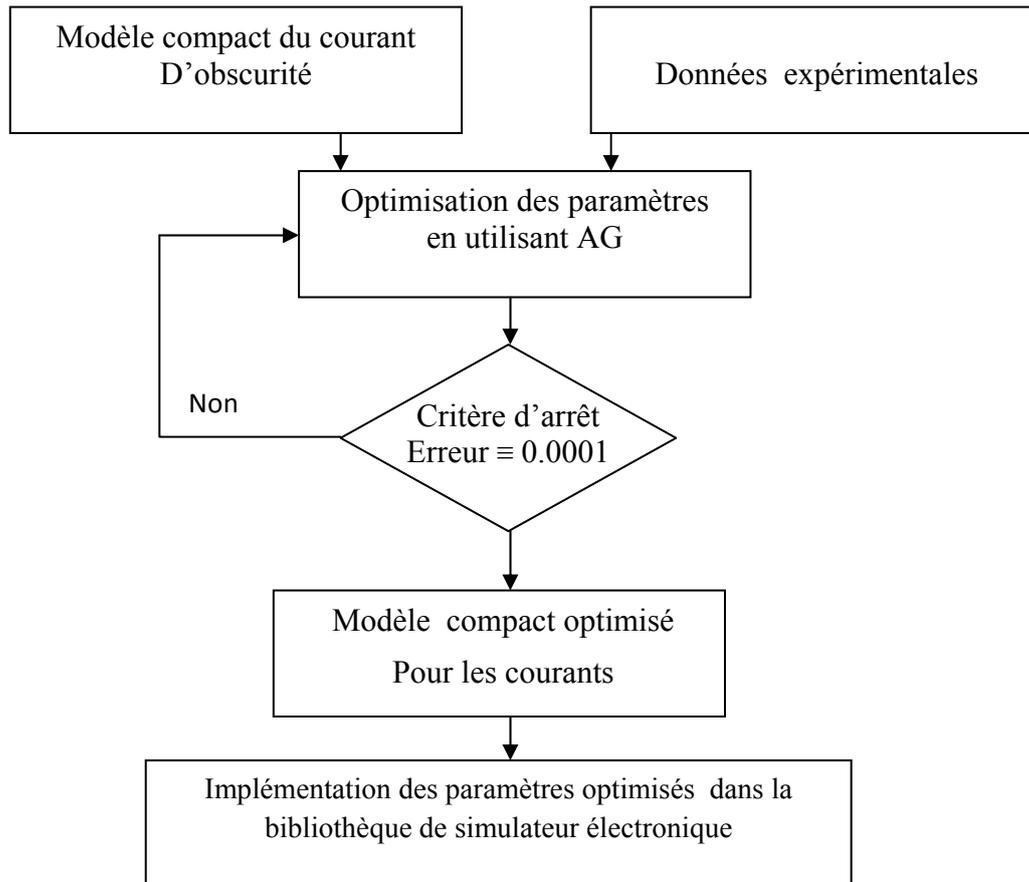


Figure IV.1 : Organigramme du processus d'optimisation

1. **Population** : les AG doivent travailler sur des populations importantes. Dans notre cas une population initiale de 20 candidats aléatoires est produite et évoluée pour 90000 générations
2. **Sélection** : Parmi plusieurs types de sélections élaborés, on a choisi la méthode tournoi. Cette dernière choisit le meilleur individu pour être individu parent.
3. **Le croisement dispersé 'Scattered crossover'**: Lorsque la sélection se termine, chaque individu a une probabilité P de se croiser avec un autre individu de la population. Pour produire de nouvelles générations, l'opérateur de recombinaison a lieu entre les chaînes sélectionnées de façon intelligente, en échangeant tout simplement deux parties de deux individus différents pour donner deux autres individus, ainsi une nouvelle génération est produite.
4. **La mutation uniforme** : est un processus en deux étapes. D'abord, l'algorithme choisit une fraction du vecteur d'entrées de l'individu pour la mutation, où chaque entrée a une probabilité d'être mutée (taux de mutation). Dans la deuxième étape, l'algorithme

remplace chaque entrée choisie par un nombre aléatoire choisi uniformément à partir du vecteur d'entrées.

Les paramètres utilisés dans cette étude sont résumés dans le tableau IV.1 Pour cette configuration, la fonction fitness était 0.000105.

Le processus de calcul pour la technique utilisée est effectué par un ordinateur Pentium 4, 3.08GHz avec une RAM de 608MB,

PARAMETRE D'AG	VALEUR
Taille de la population	20
Nombre maximum de génération	90000
Type de sélection	Tournoi
Type de croisement	Dispersé
Type de mutation	Uniforme
Taux de mutation	0.5
Taux de reproduction	0.1
Type de la fonction fitness	proportionnel

Tableau IV.1: Paramètres d'AG utilisés dans cette application

Pour la configuration obtenue d'AG, nos résultats après le processus d'optimisation sont résumés dans le tableau IV.2.

Paramètres	n_1	n_2	n_3	Φ_1	Φ_2	Φ_3	R_s
AG	0.00165	0.854	2.12	0.001378	0.6672	0.009704882	41.732

Tableau IV.2 : Paramètres optimisés de la caractéristique I-V d'une diode Schottky obtenus par AG

IV.4. Etude sous obscurité

Les résultats obtenus par l'approche de calcul (AG) concernant l'effet de la température sur les paramètres de la caractéristique courante tension, sont comparés avec l'ensemble des données expérimentales afin de confirmer leur validité. Les différents paramètres expérimentaux et ceux obtenus par le calcul AG sont résumés dans le tableau ci-dessous (IV.3).

Méthode	Température	140	160	180	200	220	240	260	280	300
EXP	n	1.24	1.16	1.088	1.05	0.99	1.01	1.01	1.03	1.05
	$\Phi(\text{ev})$	0.665	0.72	0.76	0.785	0.81	0.81	0.81	0.80	0.77
AG	n	1.2478	1.1760	1.1174	1.0720	1.0398	1.0208	1.0150	1.0224	1.0430
	$\Phi(\text{ev})$	0.6700	0.7208	0.7605	0.7892	0.8069	0.8136	0.8092	0.7938	0.7674

Tableau IV.3 : Données expérimentales et résultats obtenus par AG

La comparaison de notre modèle optimisé par la technique AG et les données expérimentales est illustrée par les figures (IV.2, IV.3, IV.4) qui représentent les variations du facteur d'idéalité, hauteur de la barrière et la caractéristique I-V en fonction de la température respectivement.

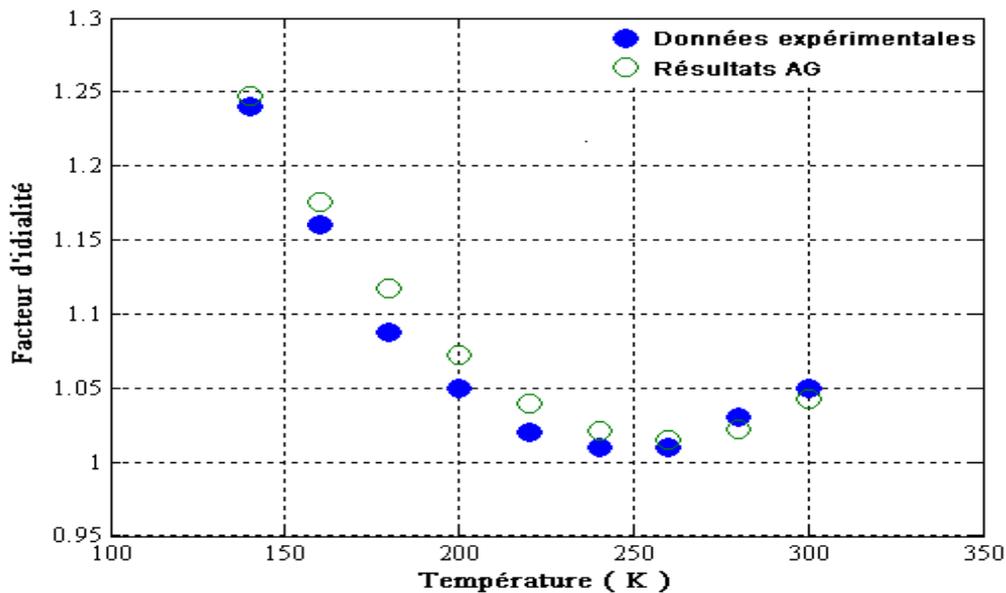


Figure IV.2 : Comparaison entre les résultats des données expérimentales et nos résultats obtenus par les AG pour la variation du facteur d'idéalité en fonction de température

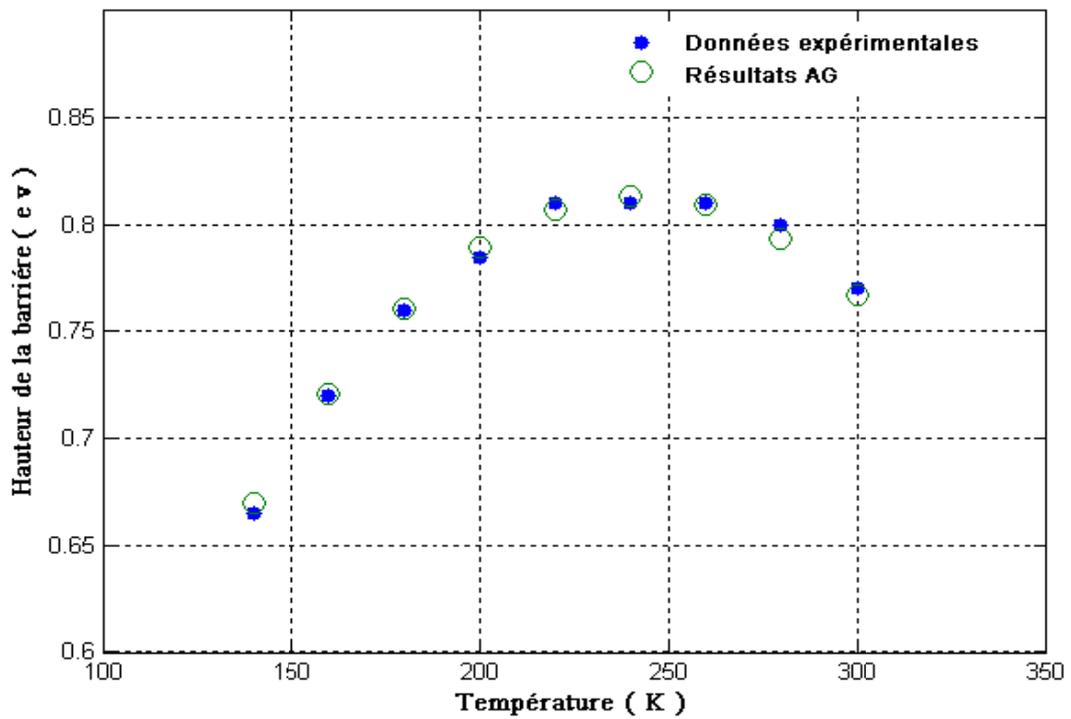


Figure IV.3 : Comparaison entre les résultats des données expérimentales et nos résultats obtenus par les AG pour la variation de la hauteur de la barrière en fonction de température

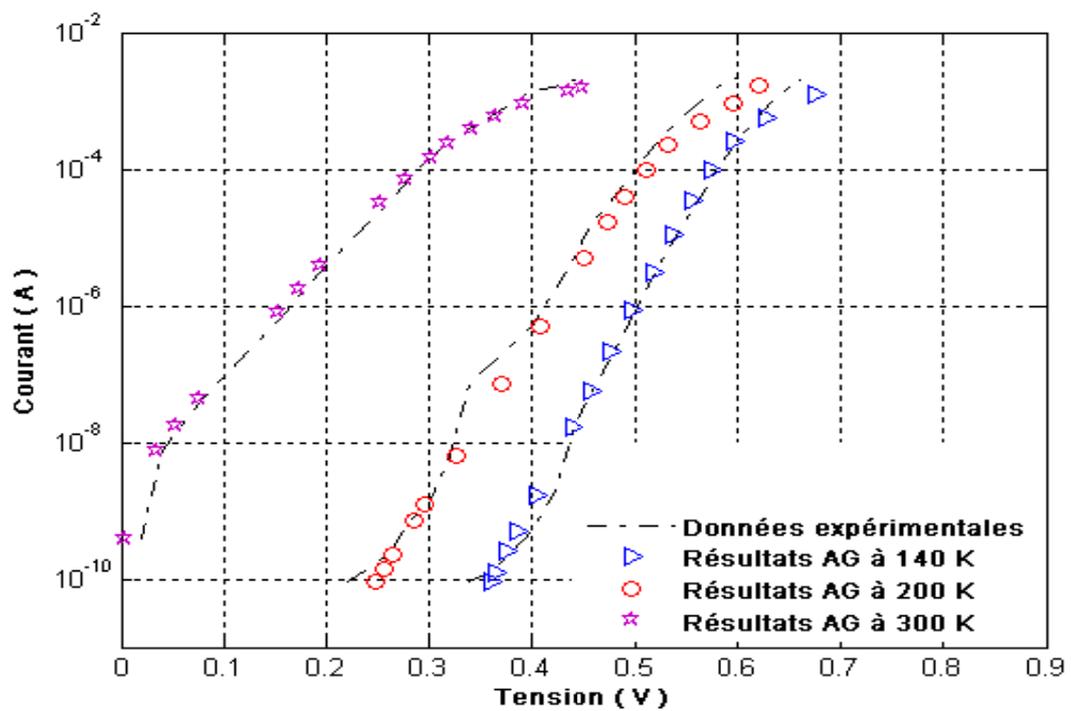


Figure IV.4 : Comparaison entre les résultats des données expérimentales et nos résultats obtenus par les AG pour la caractéristique I-V

D'après les figures ci-dessus, on voit qu'il existe un bon accord entre la caractéristique courant-tension expérimentale et la caractéristique optimisée par AG. L'erreur trouvée est de l'ordre de $2.7348.10^{-4}$, ce qui indique que ce modèle est très proche du comportement réel. Ce qui justifie que notre approche d'optimisation proposée (AG) est très efficace.

IV.5 Application du modèle optimisé sur une cellule solaire de type Schottky

IV.5.1. Description des paramètres de la cellule étudiée

Nous avons simulé les paramètres d'une structure Schottky du type Sn/p-Si, où le métal est l'étain (Sn) et le semi-conducteur est du polysilicium de type (p-Si) d'orientation cristalline [1 0 0] avec un dopage de $N_A=1.74510^{15} \text{ cm}^{-3}$ donc une résistivité $\rho=7.81 \Omega \text{ cm}$ [51].

La transmittance et la réflectance du métal sont extraites à partir des variations de ses indices optiques n et k , illustrées par les courbes de la figure (IV.5), comme suit :

La relation donnant la transmission est :

$$T=(1 - R) \quad \text{IV.7}$$

et

$$R = \frac{(n-1)^2+k^2}{(n+1)^2+k^2} \quad \text{IV.8}$$

Les résultats obtenus sont représentées sur la figure (IV.6) [55].

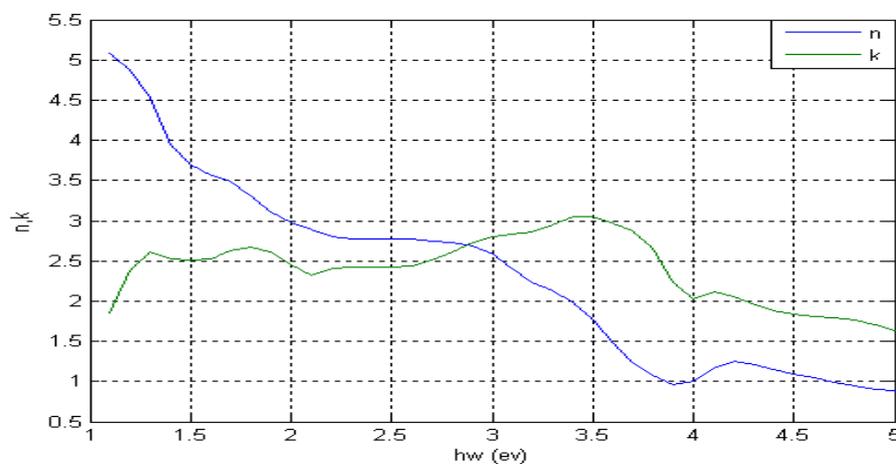


Figure IV.5 : variation d'indice de réflexion(n) et le coefficient (k) en fonction de l'énergie

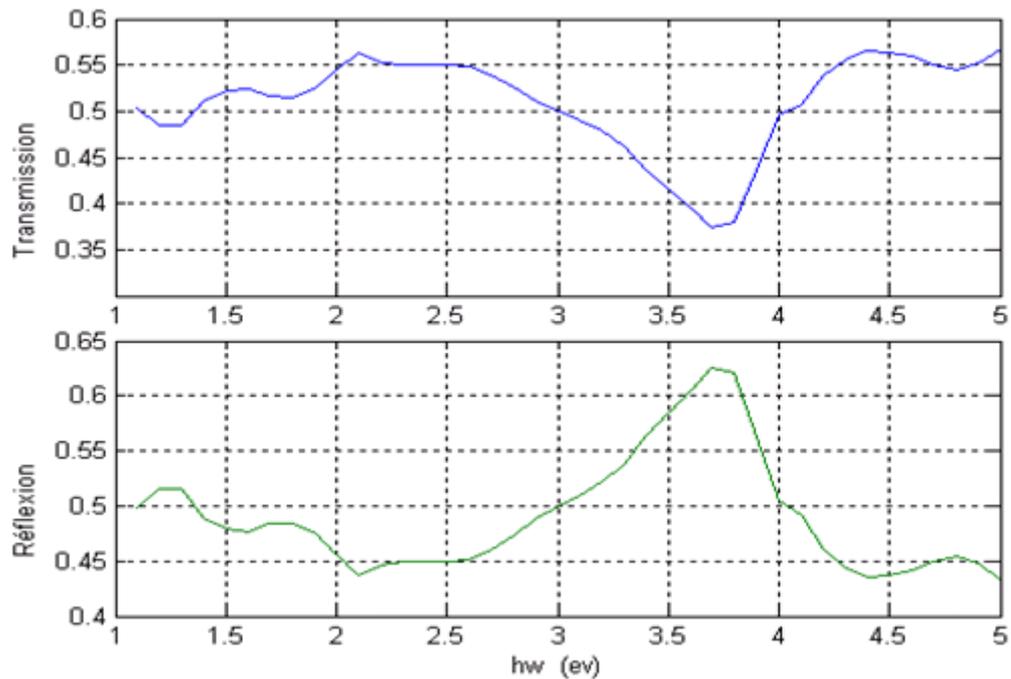


Figure IV.6 : variation de la transmission et réflexion en fonction de l'énergie

IV.5.2. Résultats sous éclairement

IV.5.2.1. Caractéristique I(V)

On s'intéresse dans ce paragraphe à l'étude de la caractéristique I(V) de la cellule solaire sous un éclairement de $100\text{mW}/\text{cm}^2$. Le tableau ci-dessous (IV.4) résume les résultats de l'approche analytique que nous avons développée.

Sous l'effet d'une hausse de la température, la figure ci-dessous (IV.7) montre une légère augmentation du courant de la cellule. Cet accroissement du courant peut être négligé au point I_{cc} mais pas au point de puissance maximale où ce dernier connaît un décalage important qui influe sur le rendement de la cellule qui passe de 1.489 à 2.270 % avec la diminution de la température.

On constate qu'il existe un bon accord entre la caractéristique courant-tension analytique et la caractéristique mesurée [53], où l'erreur relative ne dépasse pas 1.05 %, ce qui indique que ce modèle est très proche du comportement réel de la cellule solaire.

IV.5.2.2. Courant de court circuit

Les variations de ces paramètres en fonction de la température sont illustrées par la figure (IV.8). On constate que ces variations de I_{cc} en fonction de la température sont pratiquement linéaires avec un taux de variation de l'ordre de 0.002 mA par 20 °C.

E (mW/cm ²)	T (K)	Résultats Mesurés [53]				Résultats AG			
		I _{cc} (mA)	V _{co} (mV)	FF	η(%)	I _{cc} (mA)	V _{co} (mV)	FF	η(%)
100	140	0.0341	606	0.8629	2.270	0.0341	606.00	0.862	2.270
	160	0.0364	581.40	0.8269	2.240	0.0364	595.86	0.814	2.230
	180	0.0388	558.95	0.7933	2.200	0.0388	576.86	0.782	2.190
	200	0.0409	533.45	0.7633	2.140	0.0409	550.00	0.753	2.120
	220	0.0428	502.15	0.7454	2.050	0.0428	520.00	0.725	2.040
	240	0.0447	464.93	0.7324	1.965	0.0447	483.60	0.713	1.938
	260	0.0466	429.68	0.7136	1.887	0.0466	444.11	0.700	1.820
	280	0.0482	396.38	0.6995	1.70	0.0482	400.10	0.693	1.700
	300	0.0499	351.33	0.6667	1.489	0.0499	351.33	0.666	1.489

Tableau V.4 : comparaison entre les résultats Mesurés et Résultats AG pour différents Paramètres électriques et photovoltaïques

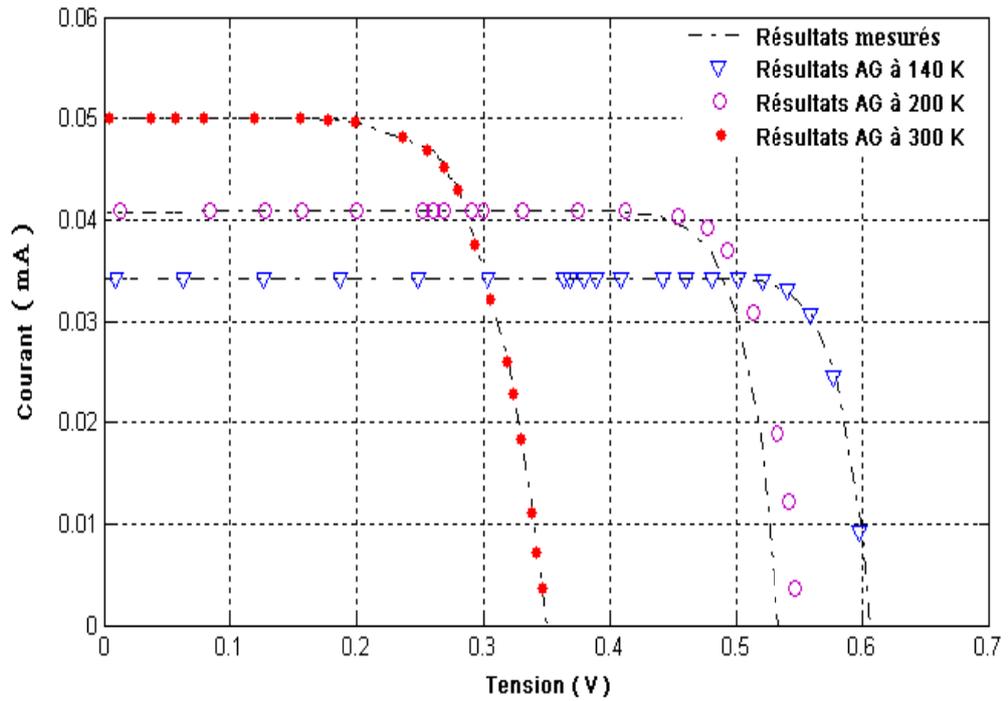


Figure IV.7 : Caractéristique courant tension sous éclairage de 100mW/cm²

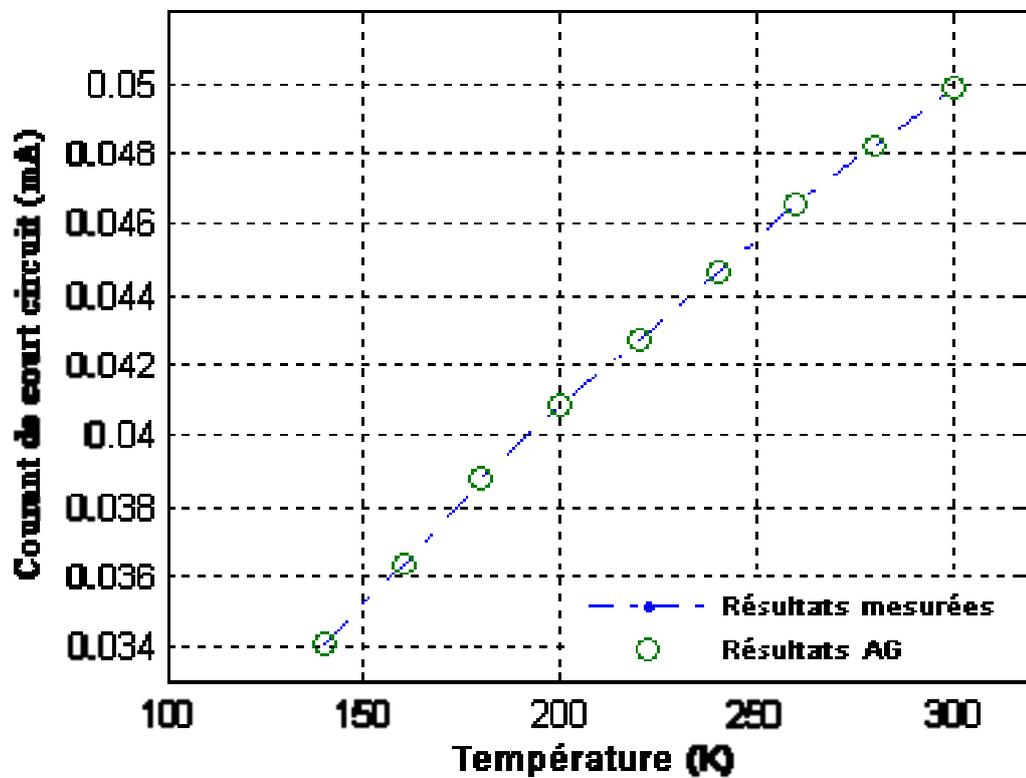


Figure IV.8: Effet de la température sur le courant de court circuit

IV.5.2.3. Tension de circuit ouvert

Les variations de la tension de circuit ouvert, qui est un des paramètres de base d'une cellule solaire, en fonction de la température sont illustrées par la figure (IV.9) ci-dessous. On constate une décroissance de ce paramètre avec un taux de l'ordre de $1\text{mV}/^\circ\text{C}$.

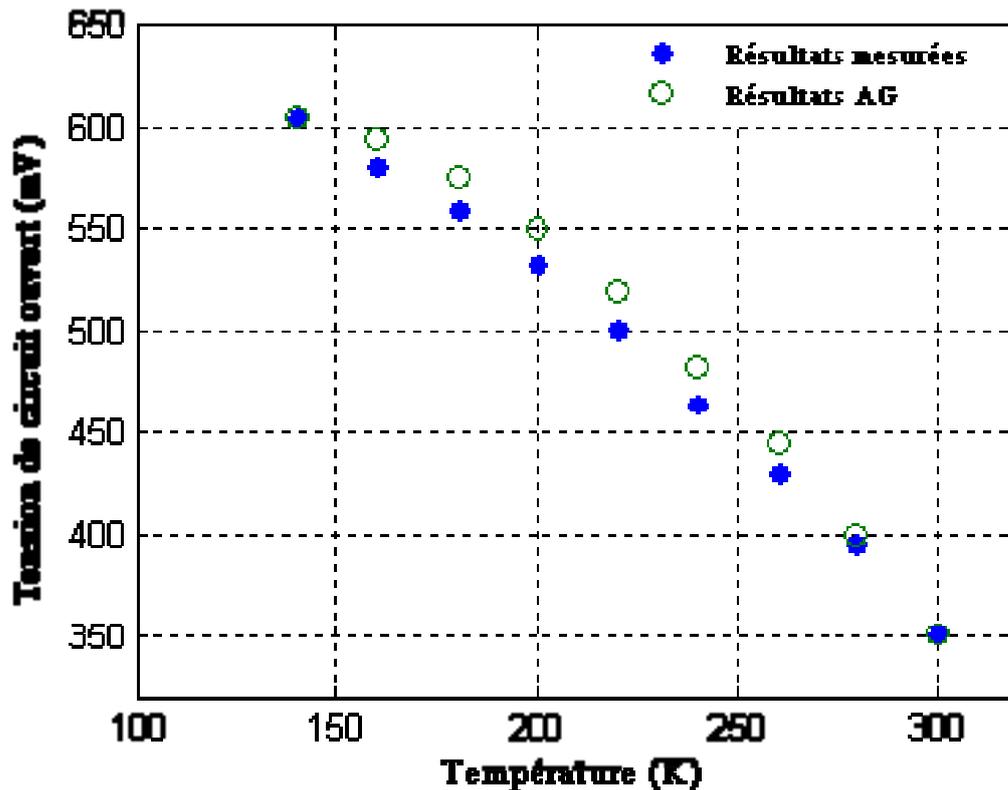


Figure IV.9 : Effet de la température sur la tension de circuit ouvert

IV.5.2.4. Facteur de forme

Ce paramètre subit aussi une décroissance similaire à celle de la tension de circuit ouvert. Son taux de variation est de l'ordre de 1% par 10°C .

IV.5.2.5. Rendement

Le rendement qui est la caractéristique principale qui valorise la qualité d'une cellule solaire est donnée dans la figure (IV.11). Il subit une décroissance similaire à celle du facteur de forme, car le rendement est directement proportionnel à ce paramètre.

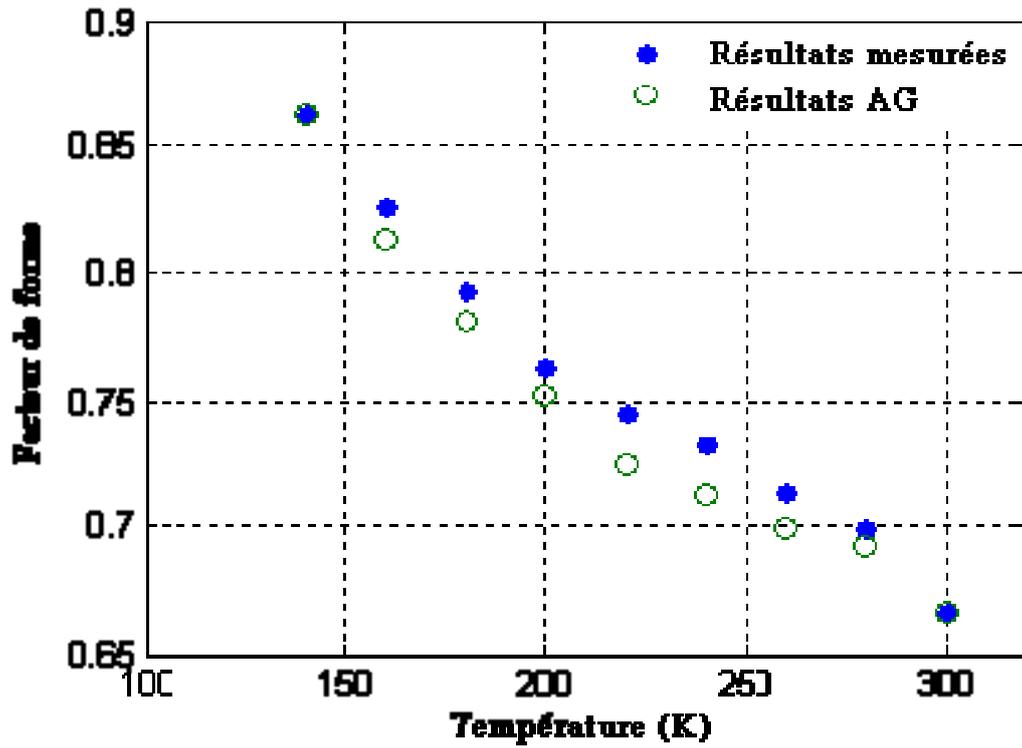


Figure IV.10: Effet de la température sur le facteur de forme

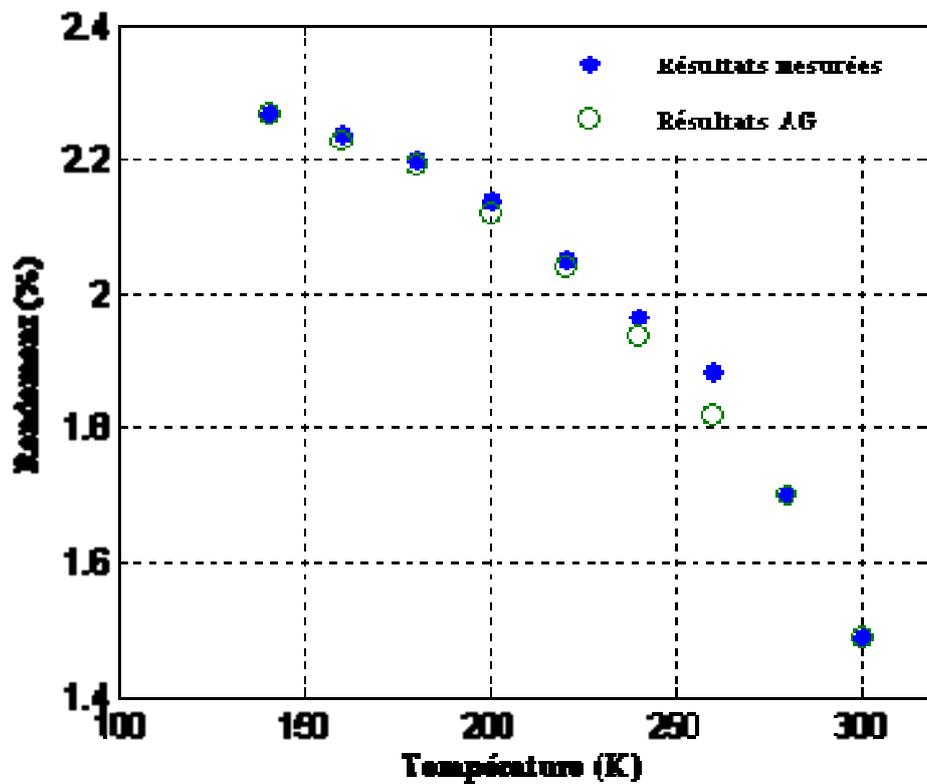


Figure IV.11: Effet de la température sur le rendement

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet de la température, sous l'éclairement standard AM1.5G, sur le fonctionnement de la cellule solaire de type Schottky à travers les caractéristiques I-V obtenues par l'application de l'approche d'optimisation avec les algorithmes génétiques. Ces derniers ont permis de déterminer les valeurs de la hauteur de la barrière, du facteur d'idéalité n et de la résistance série R_s de la cellule solaire en fonction de la température.

Les résultats indiquent que la technique 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 notre modèle compact optimisé, il peut être utilisé pour prédire d'autres combinaisons des variables d'entrée.

Conclusion générale

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. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. Puis nous avons abordé les cellules photovoltaïques sur couches minces de silicium et nous avons montré l'intérêt de la technologie à contacts arrière interdigués.

Les équations de base gouvernant les mécanismes de transport des porteurs de charge majoritaires dans la cellule solaire de type SCHOTTKY ont été décrites dans le deuxième chapitre. L'effet de la température sur les caractéristiques photovoltaïques de la cellule a été également présenté.

La technique d'optimisation reposant sur les Algorithmes génétique a fait l'objet du troisième chapitre. Nous avons exposé les principes de base tout en mettant un accent particulier sur les avantages et les inconvénients de cette méthode évolutionnaire dont 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.

Le dernier chapitre du mémoire a été consacré à l'ensemble des étapes d'optimisation de la cellule photovoltaïque de type Schottky. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur le développement d'un modèle analytique optimisé de la caractéristiques I-V en fonction de la température 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 à mettre en évidence certains paramètres physiques critiques des cellules photovoltaïques pour une large gamme de températures.

Les résultats obtenus nous encouragent également à procéder à des réflexions supplémentaires dans ce domaine.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Berger A. « Trou d’ozone et prix Nobel 1995 de chimie » . La Météorologie 8e série,13, 1996
- [2] Fröhlich C . « World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation », report WMO 490, 108-112.1978.
- [3] Gruijl F. R. et J. C. Van der Leun. « Estimate of the wavelength dependency of ultraviolet carcinogenesis in humans and its relevance to the risk assessment of a stratospheric ozone depletion ». Health Physics, 67, 319-325.1994.
- [4] Pierre Bessemoulin(1) et Jean Olivieri(2) . « La Météorologie 8e série ». n° 31,42-59 septembre 2000 .
- [5] GreenNMA . « solar cells Ed.university of new south wales ». 336P.1992.
- [6] Green M.A. « Silicon Solar Cells : Advanced principles & practice.Sydney : Center for photovoltaic devices and systems ». UNSW, 1995,336 p.
- [07] Observ’ER. « Baromètre du Solaire Photovoltaïque. Systèmes Solaires ». N° 160, pp.69-83. Avril 2004.
- [08] Goetzberger A., Hebling C. « Photovoltaic materials, past, present, future.Solar En.Mat.&Sol.Cells ». Vol. 62, pp. 1-19.2000.
- [09] Bruton T.M. « General trends about photovoltaics based on crystalline silicon. Solar En.Mat.&Sol.Cells ».Vol. 72, pp. 3-10.2002.
- [10] Sarti D., Einhaus R. « Silicon feedstock for the multicrystalline photovoltaic industry. Solar En.Mat.&Sol.Cells».Vol. 72, pp. 27-40.2002.
- [11] Jianhua Zhao, Aihua Wang, Pietro P. Altermatt, Stuart R. Wenham and Martin A. « Green. 24% efficient per silicon solar cell: Recent improvements in high efficiency silicon cell research. Solar En.Mat.&Sol.Cells».Vol. 41/42, pp. 87-99.1996.
- [12] Zhenqiang Xi, Deren Yang et al. « Investigation of texturization for monocrystalline silicon solar cells with different kinds of alkaline.Renewable Energy».Vol. 29, pp. 2101-2107.2004.

- [13] M. J. Stocks, A. J. Carr and A. W. Blakers. « Texturing of polycrystalline silicon. Solar En.Mat.&Sol.Cells ». Vol. 40, pp. 33-42.1996.
- [14] P. Fath, C. Borst et al. « Progress in a novel high-throughput mechanical texturization technology for highly efficient multicrystalline silicon solar cells. Solar En.Mat.&Sol.Cells ». Vol. 48, pp. 229-236.1997.
- [15] Centre for Photovoltaic Engineering. Annual Report 2003 : Reseach., Centre for Photovoltaic Engineering, UNSW (en ligne). Disponible sur <http://www.pv.unsw.edu.au/documents/Annual%20Report%202003/Resear ch.pdf> (consulté le 07.03.2005)
- [16] M. Bashahu and A. Habyarimana. « Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance ». Renewable Energy.Vol. 6, pp. 129-138.1995.
- [17] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green. « High efficiency PERL and PERT silicon solar cells on FZ and MCZ substrates ». Proc. 11th Internat. Photovolt. Science and Engineering Conf, Sapporo, pp. 557, Japan.1999.
- [18] L. Pirozzi, G. Arabito et al. « Selective emitters in buried contact silicon solar cells: Some low-cost solutions. Solar En.Mat.&Sol.Cells ». Vol. 65, pp. 287-295.2001.
- [19] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham. « Progress and outlook for high-effiiciency crystalline silicon solar cells. Solar En.Mat.&Sol.Cells ». Vol. 65, pp. 9-16.2001.
- [20] A. Rohatgi, V. Yelundur et al. « Aluminum-enhanced PECVD SiNx Hydrogenation in silicon ribbons ». 16th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference., pp.1120-1123. Glasgow (UK), 2000.
- [21] R. Einhaus et al. « Isotropic texturing of multicrystalline wafers with acidic texturing solutions ». 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference., pp. 167-170. Anaheim (C.A.), 1997.
- [22] J. Horzel et al. « Optimization results for an industrially applicable selective emitter process». 2nd IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion., pp.1483-1486 .Vienna (Autriche), 1998.
- [23] J. Horzel, S. Sivoththaman, J. Njs. « Screen-printed rapide thermal processes (RTP) selective emitter solar cells using a single diffusion step».
- [24] S.M.Sze. « Physics of semiconductor devices ». John Wiley and sons .1981.

- [25] Z.Abada. « Etude des cellules photovoltaïques à base de GaInP et GaAs à haut ».
- [26] José Maria Roman. « State of the art of III-V Solar cells. Fabrication technologies, Device designs and Application ».Advanced photovoltaic cell design (2004).
- [27] M. A. Vonchen . « III-V epitaxial lift-off investigated by multi-release layers ». 17th European photovoltaic conference .2001.
- [28] Hamakawa Y. « Solar PV energy conversion and the 21st Century civilization ». Tech. Digest of 12th PVSEC, Jeju, Corée du Sud, ,pp. 15-18.2001.
- [29] J. Horzel, S. Sivonththaman, J. Njs . « Screen-printed rapide thermal processes (RTP) selective emitter solar cells using a single diffusion step ».
- [30] Riccardo Battisti, Annalisa Corrado. « Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology ». Energy, , Vol. 30, pp. 952–967.2005.
- [31] K.A. Münzer, K.T. Holdermann, R.E. Schlosser, S. Sterk. « Improvements and benefits of thin crystalline silicon solar cells ». 2nd IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, , pp. 1214-1219. Vienna (Autriche),1998.
- [32] Sheng S. Li. « Semiconductor Physical Electronics ».Second Edition Springer Science+Business Media, NY 10013, USA.2006.
- [33] A.Vapaille &R.Castagné. « Dispositifs et circuits intégrés semi-conducteurs physique et technologie ». 1ère édition, DUNOD, 1987.
- [34] R.Legros . « physique des semiconducteurs Technologie-Diodes Tome 1».EDITIONS EYROLLES, 1974.
- [35] H.Mathieu . « physique des semiconducteurs et des composants électroniques». 1ère Edition, MASSON,1987.
- [36] S.M.Sze . « Physics of semiconductor devices ». John Wiley and Kwok K. Ng 2007
- [37] Siegfried Selberherr. «Analysis and simulation of semiconductor devices » .Springer verlag1984.
- [38] Jutta Beier, Klaus Bucher .« comparison of dark and light I-V curves of solar cells ». 10th European photovoltaic solar energy conference 1991.
- [39] Christopher M Snowden. « Semiconductor device Modelling » .Springer verlag 1989.

- [40] K. Bucher, J. Bruns, H. G. Wagemann. « Absorption coefficient of silicon : An assessment of measurements and the simulation of temperature variation ». J. Appl.
- [41] B.O. Seraphin. « Solar energy conversion – Solid state physics aspects » .Topics in applied physics. Vol-31. Springer verlag 1979.
- [42] Fatima Khelfaoui . « Influence d'une source de chaleur sur la distribution thermique dans un milieu semiconducteur fini-incidence sur la conversion photovoltaïque » . Mémoire de Magistère en électronique .Université de Constantine 2000.
- [43] L. W . James et al, Appl Phys. Lett. 26 pp 467 .1975.
- [44] Nicolas Barnier ,Pascal Brisset . « Optimisation par algorithme génétique sous contraintes, Technique et science informatiques » . Volume 18 - n_1.1999.
- [45] J.H. Holland. « Adaptation in Natural and Artificial Systems » . Ann Arbor: The University of Michigan Press, USA, 1975
- [46] T. Back. « Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms (Hardcover) » . Oxford University Press, USA, 1996
- [47] C. Darwin. « On the Origin of Species by Means of Natural Selection » . John Murray, London, U.K, 1958
- [48] D. Whitley. « Foundations of Genetic Algorithms 2, US Edition » . California, USA, 1993
- [49] L. Fogel., A.J. Owens, M.J. Walsh. « Artificial Intelligence through Simulated Evolution» . Wiley, Chichester, UK, 1966
- [50] I. Rechenberg. « Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem » . Royal Aircraft Establishment Library Translation, Farnborough, U.K. 1965.
- [51] J. Kennedy, R-C. Eberhart. « Particle swarm optimization » . In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 5, pp. 1942-1948, Piscataway, New Jersey, USA, 1995.
- [52] A. Ortiz-Condea, Yuansheng Mab, J. Thomsonc. « Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method » . Solid-State Electronics 43 845±848.1999.

- [53] M.E. Aydın, O. Güllü, N. Yıldırım. « Temperature dependence of current–voltage characteristics of Sn/p-Si Schottky contacts » . *Physica B* 403 131–138.2008.
- [54] Mehmet Şahina*, Haluk Şafaka, Nihat Tuğluoğlu, Serdar Karadeniz. « Temperature dependence of current–voltage characteristics of Ag/p-SnS Schottky barrier diodes » . *Applied Surface Science* 242 412–418.2005.
- [55] Otfried Madelung . « Semiconductors data handbook » . Springer