

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : **electronique industerielle**

Par

- BELAIBA ABDENNOUR
- BENAMARA MOUNIR

Intitulé

*Modelisation analytique et optimisation multi-objectif des cellule solaires a
base de couche mince Cu(In Ga) Se2 CIGS*

Évalué le : 12/09/2021

Par la commission d'évaluation composée de :*

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mem. S.Meguellati</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. A.Yousfi</i>	<i>MAB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Z.Messai</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

Nous voudrions remercier Dieu de nous avoir donné la santé, le courage et la patience de faire ce projet.

Nous exprimons nos sincères gratitudees à l'encadreur, monsieur YOUSFI Abderrahim, pour le temps consacré, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce projet.

Nous remercions tous les membres du jury d'avoir accepté l'évaluation de ce modeste travail.



Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

A nos très chers parents.

A nos très chers frères et sœurs.

A tous les amis.

Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque faisant partie des énergies renouvelables est particulièrement intéressante vu qu'elle est inépuisable, propre et ne produit aucun impact nocif pour l'environnement. Durant ces dernières décennies, les chercheurs intègrent dans les cellules solaires en couches minces des matériaux ainsi ; Cu (In ,Ga) Se₂ (CIGS), et le Sulfure de Cadmium (CdS) suscitent un intérêt croissant de la part des scientifiques et industriels motivés par la réduction des coûts de fabrication. Dans ce travail on a fait une étude analytique de cellule solaire CdS/CIGS, les résultats de cette cellule sont exploités et utilisés comme fonction objective puis injecter dans un algorithme génétique pour avoir les valeurs optimales de notre structure comme (J_{sc} , V_{oc} , FF et n).

Photovoltaic solar energy is a renewable energy source that is particularly interesting because it is inexhaustible, clean and does not produce any harmful impact on the environment. During the last decades, researchers are integrating in thin film solar cells materials such as Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS), and Cadmium Sulfide (CdS), which are attracting increasing interest from scientists and industrialists motivated by the reduction of manufacturing costs. In this work we have made an analytical study of CdS/CIGS solar cell, the results of this cell are exploited and used as an objective function and then injected into a genetic algorithm to have the optimal values of our structure as (J_{sc} , V_{oc} , FF and n).

الطاقة الكهروضوئية الشمسية كجزء من الطاقات المتجددة مثيرة للاهتمام بصفة خاصة لأنها غير قابلة للانفجار ونظيفة ولا تنتج أي تأثير ضار على البيئة. وفي العقود الأخيرة ، كان الباحثون يتدهشون أيضاً في مواد الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة ؛ إن (Cu (In, GA) Se₂ ، و (CIGS) ، و (Cadmium Solphide) وهناك اهتمام متزايد بين العلماء والصناعيين بدافع من انخفاض تكاليف التصنيع. وفي هذا العمل قمنا بدراسة تحليلية للخلايا الشمسية CDS/CIGS ، يتم استغلال نتائج هذه الخلية واستخدامها كدالة موضوعية ثم حقنها في مثل خوارزمية جينية للحصول على القيم المثلى لبنيتنا (J_{sc}, V_{oc}, FF, n) .

Sommaire

Listes des figures

Listes des symboles

Listes des tableaux

Introduction générale :1

Chapitre I : Théorie de base des cellules solaires.

I.1. Introduction :.....3

I.2. L'historique de la cellule photovoltaïque :.....3

I.3. Le spectre solaire :.....3

I.4 L'intensité du rayonnement :5

I.5. Le photovoltaïque :.....5

I.6. Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque :7

I.6.1. Avantages :7

I.6.2. Inconvénients :7

I.7. Matériaux semi-conducteurs :7

I.7.1. Semi-conducteurs intrinsèques :8

I.7.2. Semi-conducteurs extrinsèques :8

I.8. La jonction P-N :8

I.9. Dopage :9

I.9.1. Dopage de type N :9

I.9.2. Dopage de type P :9

I.10. Les cellules solaires :10

I.11. Structure d'une cellule solaire :10

I.12. Cellule solaire idéale :11

I.13. Cellule solaire réelle :11

I.14. Influence des résistances série et shunt :12

I.15. Différentes caractéristiques d'une cellule solaire :13

I.15.1. Courant de court-circuit I_{sc} :	13
I.15.2. Tension de circuit ouvert V_{CO} :	13
I.15.3. Réponse spectrale, $SR(\lambda)$:	13
I.15.4. Puissance maximale, P_m :	14
I.15.5. Facteur de forme, FF :	14
I.15.6. Rendement de conversion, η :	14
I.16. Fonctionnement d'une cellule solaire :	14
I.17. Rendement des cellules solaire :	15
I.17.1 La filière Silicium :	15
I.17.2 Les filières dites « Couches Minces » :	16
I.18. Technologie des couches minces CIGS :	16
I.18.1. Physique du dispositif de cellule solaire CIGS :	17
I.19. Structure des cellules CIGS :	18
I.20. Conclusion :	20

Chapitre II : Etude analytique et optimisation d'une cellule solaire et avec Les algorithmes génétiques.

II.1. Introduction :	21
II.2. Modèle de simulation d'une cellule solaire PV en couches minces à hétérojonction.....	21
II.2. 1. Structure de la cellule :	21
II.2. 2 Propriétés optiques de la cellule :	22
II.2. 3. Calcul de la densité de photo courant, $J_{ph}(\lambda)$:	23
II.2.4. Caractéristique courant-tension $J(V)$:	24
II.3. Optimisation D'une cellule solaire :	26
II.4. Méthodes métaheuristiques :	26
II.5. Les algorithmes génétiques :	27
II.5.1. Concept de chromosome :	28

II.5.2. Génération :	28
II.5.3. Sélection :	29
II.5.4. Elitisme :	29
II.5.5. Cross over :	29
II.5.6. Mutation :	29
II.5.7. Mise en œuvre d'un algorithme génétique :	30
III.6. Conclusion :	31

Chapitre III : Modèle de simulation d'une cellule solaire PV en couches minces et l'optimisation par les algorithmes génétiques.

III. 1. Introduction :	32
III.2. Les paramètres de la simulation :	32
III. 3. Résultats et discussion :	33
III.3.1. Flux solaire et irradiance :	33
III.3.2 Coefficient d'absorption :	34
III.3.3 Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS en fonction de dopage Na, Nd et l'épaisseur w_n, w_p :	35
III.3.4 Influence du dopage du substrat de silicium sur les performances de la cellule solaire CdS/CIGS :	36
III.3.5 Influence du dopage du CIGS sur les performances de la cellule solaire CdS/CIGS :	37
III.3.6 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur sur les performances de la cellule solaire CdS/CIGS :	38
III.3.7 Influence de l'épaisseur de la couche tampon (CdS) sur les performances de la cellule solaire CdS/CIGS :	40
III.4. Optimisation par les algorithmes génétiques :	41
III.5 Conclusion :	45
Conclusion générale :	46
Bibliographie :	

Liste des figures

Figure I.1 : Le specter solaire.....	4
Figure I.2 : L'energie solaire en fonction des longueurs d'ondes.....	4
Figure I.3 : L'irradiance en fonction des longueurs d'ondes.....	5
Figure I.4 : Un schéma montrant le fonctionnement de base des cellules solaires. Le dispositif est éclairé par un rayonnement solaire.....	6
Figure I.5 : Diagramme de bande d'un semi-conducteur intrinsèque.....	8
Figure I.6 : dopage de type N.....	9
Figure I.7 : Dopage de type P.	10
Figure I.8 : Cellule solaire.	10
Figure I.9 : Structure la plus simple d'une cellule solaire.	11
Figure I.10 : Schéma équivalent d'une cellule solaire a)-Idéale ; b)-Réelle.....	12
Figure I.11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire éclairée.....	12
Figure I.12 : Caractéristique courant-tension d'une cellule.....	13
Figure I.13 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque.....	15
Figure I.14 : a-c: jonction p-n et formation de la région de charge d'espace, d-f : diagrammes de bande.....	18
Figure I.15 : Schéma de principe d'une cellule à base de CIGS.....	19
Figure I.16: Diagramme de bande simulé pour une cellule solaire à couche mince en Cu (In, Ga) Se ₂	19
Figure II.1 : Dimensions et différents régions d'une hétérojonction à base d'un absorbeur de type p.	22
Figure II.2 : Organigramme simple de l'algorithme génétique.....	28
Figure II.3 : Opérateur Cross over.....	29
Figure II.4 : Organigramme d'un algorithme génétique.....	31
Figure III.1 : Flux solaire au sol.....	34
Figure III.2 : Approximation de l'irradiation spectrale solaire.....	34
Figure III.3 : Variation du coefficient d'absorption α en fonction de la longueur d'onde pour le CdS et le CIGS.....	34
Figure III.4 : Caractéristique J (V) de la cellule solaire CdS/CIGS en variant de dopage Nd.....	35
Figure III.5 : Caractéristique J (V) de la cellule solaire CdS/CIGS en variant de dopage Na.....	35
Figure III.6 : Caractéristique J (V) de la cellule solaire CdS/CIGS en variant de l'épaisseur w_p	35

Figure III.7 : Caractéristique J (V) de la cellule solaire CdS/CIGS en variant de l'épaisseur wn.....	36
Figure III.8 : Performances de la cellule en fonction du dopage de la couche tampon (CdS).....	37
Figure III.9 : Performances de la cellule en fonction du dopage de la couche absorbeur(CIGS).....	38
Figure III.10 : Performances de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur(CIGS)	39
Figure III.11 : Performances de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (CdS).....	40
Figure III.12: structure générale d'un algorithme génétique.....	42
Figure III.13 : Convergence de la fonction valeur de fitness en fonction du nombre de génération...	43
Figure III.14 : Convergence de la fonction valeur de fitness en fonction du nombre de génération...	43
Figure III.15 : Convergence de la fonction distance moyenne en fonction du nombre de génération..	44
Figure III.16 : Convergence de la fonction nombre d'enfants en fonction du nombre d'individu.....	44
Figure III.17 : Convergence de la fonction meilleur individuel actuel en fonction du nombre devariable.....	45

Liste des symboles

λ : Longueur d'onde du spectre solaire.

x : Position dans la cellule ou la couche.

E : Energie.

E_g : Largeur de la bande interdite (gap).

$\alpha(\lambda)$: Coefficient d'absorption.

$G(\lambda, x)$: Taux de génération des paires électron-trou.

$F(\lambda)$: Flux de photons solaire à $x = 0$.

$F_0(\lambda)$: Flux solaire à $x = -W_{ZnO}$.

n, p : Concentration des électrons et des trous respectivement.

n_0, p_0 : Concentration des électrons et des trous à l'équilibre respectivement.

I : Courant de sortie de la cellule.

I_d : Courant de la diode.

I_{sh} : Courant shunte.

J_n, J_p : Densité de courant des électrons et des trous respectivement.

J_s : Densité de courant de saturation inverse.

J_{00} : Constant qui dépende de la température.

J_{ph} : Densité de courant de photo génération.

J : Densité de courant de sortie de la cellule.

J_{sc} : Courant de court-circuit.

A, B : Constantes.

N_a, N_d : Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement.

N_C, N_V : Les densités d'états effectives des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence respectivement.

τ_n, τ_p : Durée de vie des électrons et des trous respectivement.

v_{th} : vitesse thermique.

μ_p, μ_n : Mobilité des électrons et des trous respectivement.

D_n, D_p : Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement.

L_n, L_p : Longueur de diffusion des électrons et des trous respectivement.

U_n, U_p : Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.

T : Température de la cellule.

Q : Facteur de qualité.

Concentration intrinsèque.

S_p, S_n : Vitesse de recombinaison des électrons et des trous à la surface respectivement.

$R(\lambda)$: Coefficient de réflexion.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunte ou parallèle.

$U_i = kT/q$: Potentiel thermodynamique.

V_d : Potentiel de diffusion.

V : Tension de sortie de la cellule.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

FF : Facteur de forme.

$SR(\lambda)$: Réponse spectrale.

P_m : Puissance maximale.

P_i : Puissance incidente du rayonnement solaire au sol.

η : Rendement de conversion.

w_1 : Épaisseur de la zone de charge d'espace coté couche N.

w_2 : Épaisseur de la zone de charge d'espace coté couche P.

w_p : Épaisseur de la couche P.

w_n : Épaisseur de la couche N.

H : Épaisseur totale de la cellule.

H' : Épaisseur de la zone neutre de l'absorbeur de type P.

x_n : Épaisseur de la zone neutre de la couche Tampon de type N.

P : Matériau ou couche semi-conducteur de type P.

N : Matériau ou couche semi-conducteur de type N.

Liste des tableaux

Tableau III.1 : (a) et (b) Valeurs des données utilisées dans la simulation.

Tableau III.2: Tableau comparatif des performances de la cellule en fonction du dopage de la couche tampon de CdS.

Tableau III.3 : Tableau comparatif des performances de la cellule en fonction du dopage de la couche absorbeur CIGS.

Tableau III.4 :Tableau comparatif des performances de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur CIGS.

Tableau III.5 : Tableau comparatif des performances de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche tampon de CdS.

Tableau III.6 : Paramètres d'algorithme génétique AG.

Tableau III.7 : Valeurs des données utilisées dans l'optimisation.

Introduction Générale

L'augmentation de la population et le développement industriel ont contribué à une augmentation du besoin énergétique mondial. Toujours l'énergie a été le moteur de l'activité humaine, ou, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement du monde. Cette énergie, actuellement, est produite à partir des sources fossiles non renouvelables comme le pétrole, le gaz et le charbon. En effet, la raréfaction et la pollution excitée par ces sources ainsi que la crise énergétique des années 70, ont amené les pays à grande consommation d'énergie à se rechercher aux sources alternatives. A ce moment, pour répondre à ces préoccupations, de nombreuses voies de recherche se sont donc orientés vers l'exploitation des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire comme une source abondante et propre, produite par la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique soit à voie thermique ou bien photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est une énergie verte inépuisable qui représente une source d'énergie alternative qui peut être utilisée par l'humanité. Cette énergie est de plus en plus appliquée dans différents domaines allant des installations résidentielles et commerciales jusqu'aux systèmes spatiaux, en raison de nombreux avantages tels que l'absence de pollution, elle est sans bruit, facile à installer, et nécessite une courte période de construction.

Le but de ce travail est consacré à l'étude et la modélisation analytique d'une cellule solaire en couche mince à hétérojonction à l'aide du simulateur MATLAB, ensuite en fait une optimisation mono objective de l'algorithme génétique sur les paramètres géométriques et physiques de cette cellule.

Ce manuscrit est organisé de la façon suivante :

Le premier chapitre, nous avons présenté l'historique de l'énergie solaire et en passe vers le rayonnement solaire avec leurs avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque. Ensuite les différents matériaux semi-conducteurs, les caractéristiques d'une cellule solaire et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire. En clôture ce chapitre par la technologie des couches minces CIGS et la structure des cellules solaires CdS/CIGS.

Dans le deuxième chapitre, nous détaillons une étude analytique du modèle proposer d'une cellule solaire CdS/CIGS en couche mince à hétérojonction, ensuite l'optimisation de cette

cellule solaire en utilisons les algorithmes génétiques MO pour optimiser ces paramètres de simulation géométriques et physiques.

Dans le troisième chapitre, nous avons simulé les caractéristiques d'une cellule solaire telle que le courant de court-circuit (J_{SC}), la tension du circuit ouvert (V_{OC}) le facteur de forme (FF) et le rendement(η).

Par l'élaboration de l'approche mono objective de l'algorithme génétique, on a optimisé les valeurs de l'épaisseur d , le dopage de la zone n et p des matériaux CdS et CIGS respectivement.

Enfin, nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale dans laquelle nous présenterons l'ensemble des résultats significatifs que nous avons obtenus au cours de ce travail.

Chapitre I :

Théorie de base des cellules solaires

Chapitre I : Théorie de base des cellules solaires.

I.1. Introduction :

Dans ce premier chapitre nous faisons appel à quelques notions utiles dans le domaine photovoltaïque (PV) pour cela, nous commencerons tout d'abord par un historique sur l'énergie solaire. Puis, nous donnerons un aperçu sur le rayonnement solaire, et après nous définirons l'effet photovoltaïque, ensuite les semi-conducteurs, et après nous présenterons la cellule solaire et sa structure. Ainsi qu'une citation des cellules solaires idéales et réelles et les différentes caractéristiques de la cellule, le principe de fonctionnement. En terminant ce chapitre par la définition de la technique des couches minces CIGS et la structure des cellules CIGS.

I.2. L'historique de la cellule photovoltaïque :

Le physicien français Edmond Becquerel décrivit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière. L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre. De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de Bell Laboratoires qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires. La taille des cellules PV accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5,08 cm dans le début des années 70, à 7,62 cm à la fin des années 70, et à 10,16 cm au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multi cristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté [1].

I.3. Le spectre solaire :

La particule élémentaire du rayonnement électromagnétique c'est le photon. Cette dernière conçoit la lumière visible ainsi que les ondes radio ou les rayons X. La longueur d'onde, la fréquence, l'énergie et l'intensité sont les caractéristiques du rayonnement. Le photon peut avoir

des énergies très différentes. Chaque énergie qu'il peut prendre a une longueur d'onde qui lui est inversement proportionnelle. Toutes les longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique définissent le spectre électromagnétique illustré par (Figure I.1) [2].

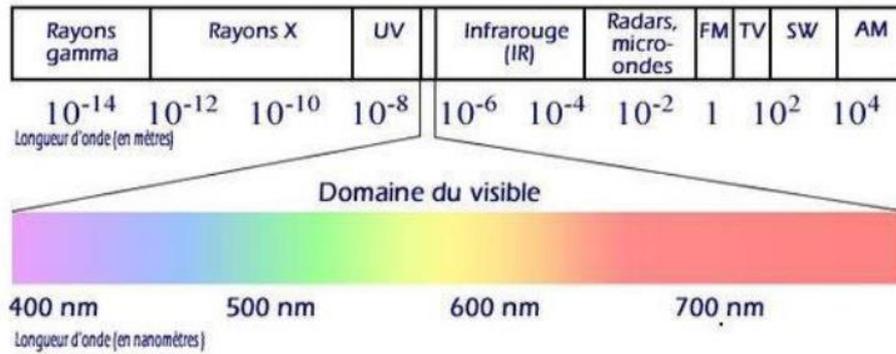


Figure I.1 : Le spectre solaire [2].

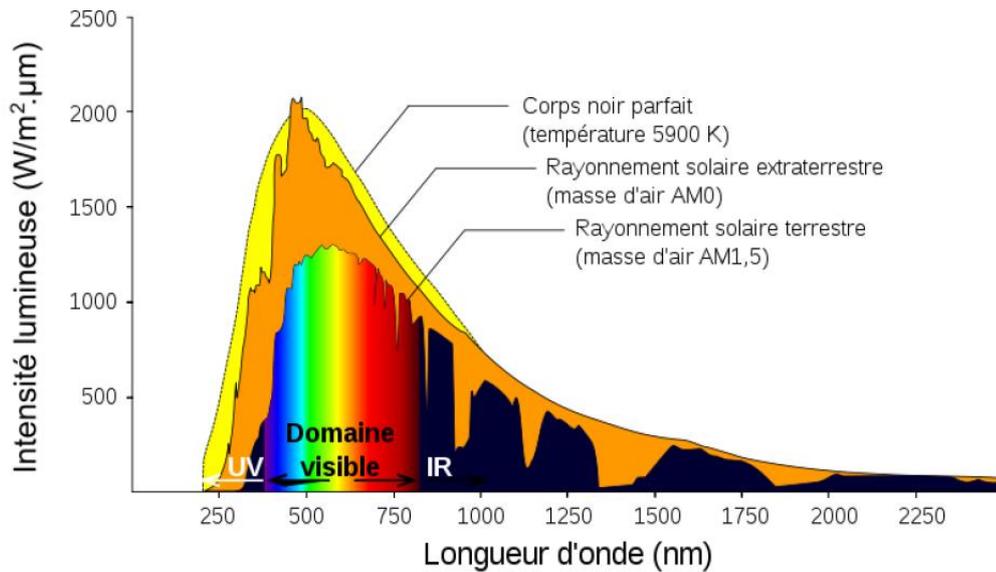


Figure I.2 : L'énergie solaire en fonction des longueurs d'ondes [2].

La figure I.2 illustre dans la bande des ultraviolets $< 0.4 \mu m$ que 9% de l'énergie du rayonnement solaire, on observe la bande visible de 0.4 à $0.8 \mu m$ contient 47% et la bande des infrarouges $> 0.8 \mu m$ un pourcentage de 44%, on constate bien que la partie de l'énergie solaire maximale transformable en électricité correspond au domaine visible [2].

1.4. L'intensité du rayonnement :

Le rayonnement se caractérise par son domaine Spectral comme on vient de voir et par son intensité (plus un corps est chaud ($> 0^{\circ}\text{K}$) plus il émet un rayonnement intense). La confrontation entre le rayonnement solaire et les éléments du système climatique font qu'à la surface du sol, la densité de puissance n'est plus que de 0.9 kw/m^2 , en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et gaz carbonique. En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption (Figure I.3) [2].

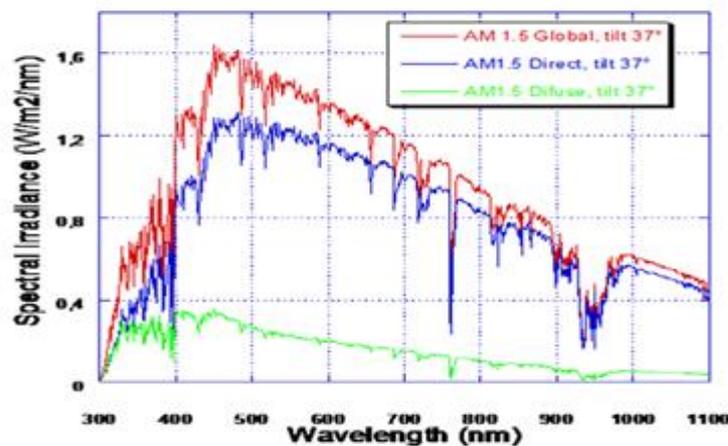


Figure 1.3 : L'irradiance en fonction des longueurs d'ondes [2].

1.5. Le photovoltaïque :

la technique qui fait la conversion de l'énergie électrique en courant continu c'est le photovoltaïque qui est mesuré en watts (W), lorsqu'on éclaire un semi-conducteurs par des photons. Tant que les rayons de la lumière brille sur la cellule solaire (le nom de l'élément PV individuel), celle-ci produite de l'énergie électrique PV), elle produit de l'énergie électrique. Lorsque la lumière s'arrête, l'électricité s'arrête les cellules solaires n'ont jamais besoin d'être rechargées comme une batterie. Depuis plus de 30 ans, certains fonctionnent en permanence sur terre ou dans l'espace [3]. Le carburant de l'effet photovoltaïque peut être déduit de l'origine de son nom, composé de photo (du mot grec phos = lumière) et voltaïque (électrique, dérivé du nom du physicien italien Alessandro Volta). Par conséquent l'effet photovoltaïque est une question d'électricité à partir de la lumière. Dans l'expérience originale de Becquerel, l'effet photovoltaïque a été observé sur des électrodes immergées dans un électrolyte liquide, mais aujourd'hui la plupart des cellules solaires sont des dispositifs semi-conducteurs à jonction p-n à l'état solide. Cependant l'effet est le même, les photons excitant des porteurs qui sont extraits

sous forme d'énergie électrique pouvant être utilisées dans une charge externe. Dans ce texte seules les cellules solaires à semi-conducteurs à l'état solide seront traitées. Lorsqu'une cellule solaire est éclairée généralement par le rayonnement solaire, les photons pénètrent dans la structure et excitent les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, créant des paires électrons-trous. Dans la partie de type p du dispositif les électrons diffusent et sont entraînés par le champ électrique vers la partie de type n du dispositif. L'inverse est vrai pour la génération dans la partie de type n du dispositif, les trous diffusent et étant entraîné vers le côté de type p. Cela crée une séparation de charge ce qui entraîne une différence de tension entre les deux côtés qui peut conduire le courant à travers une charge externe et les porteurs des charges circulent dans le système, la figure I.4 illustre ce principe de fonctionnement. La puissance délivrée à la charge externe est principalement régie par l'irradiation qui atteint la cellule et la charge elle-même. Avec une charge de faible impédance, le courant sera proche de celui délivré dans une connexion de court-circuit (J_{SC}) alors que la tension est faible. Pour une charge à haute impédance, l'inverse est vrai avec une tension proche de la tension en circuit ouvert (V_{OC}) et un courant faible. En fonctionnement normal, le courant est défini comme négatif. Il s'agit simplement d'une convention qui découle du fait que le courant est défini comme positif dans le sens direct de la jonction p-n ce qui signifie que la puissance est délivrée au circuit de charge externe dans le quatrième quadrant d'un tracé courant-tension mesuré sous éclairage. Ce type de tracé une courbe J-V est très souvent utilisé dans la recherche sur les cellules solaires [4].

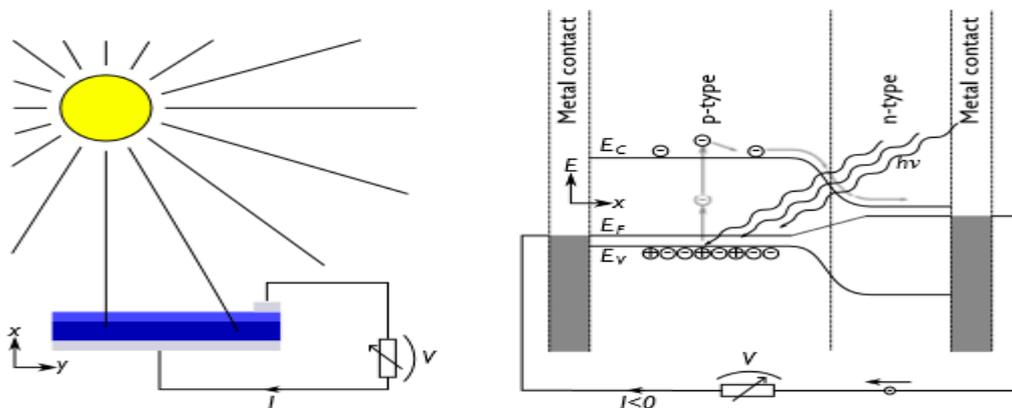


Figure I.4 : Un schéma montrant le fonctionnement de base des cellules solaires. Le dispositif est éclairé par un rayonnement solaire.

I.6. Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque présente certains des avantages et des inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

I.6.1. Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- Une haute fiabilité, elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [5].

I.6.2. Inconvénients :

- Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces.
- Technologie coûteuse.
- Facteur de charge faible.
- Stockage difficile.
- Difficulté à recycler les composants du système.
- Investissement élevé dépendant des décisions politiques [6].

I.7. Matériaux semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs ont une résistance qui se situe à mi-chemin entre la conductivité et l'isolant. Quatre liaisons covalentes peuvent être formées avec un atome voisin grâce aux quatre électrons de valence du silicium. Dans cette situation, tous les électrons ont été utilisés, et il n'en reste aucun pour générer un courant électrique [5].

I.7.1. Semi-conducteurs intrinsèques :

Les électrons de la couche la plus éloignée du noyau qui participent à des liaisons covalentes peuvent devenir des porteurs des charges sous l'effet de l'agitation thermique.

Le diagramme énergétique est divisé en deux bandes (conduction et valence) par une bande interdite. Pour qu'un électron traverse cette bande, il doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, etc.). Cependant, le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Le nombre des trous et des électrons est le même dans ce cas [5].

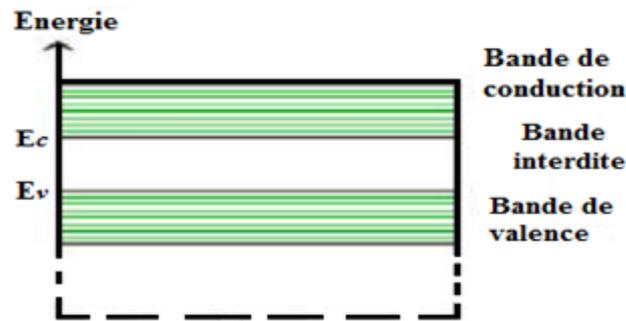


Figure I.5: Diagramme de bande d'un semi-conducteur intrinsèque [5].

I.7.2. Semi-conducteurs extrinsèques :

Les impuretés sont utilisées pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs. Le dopage est le terme utilisé pour désigner ce processus [5].

I.8. La jonction P-N :

Pour que le phénomène photovoltaïque puisse se produire, il faut créer ce qu'on appelle une jonction pn. La jonction pn est l'association de deux types d'impuretés n et p, et c'est la surface de cette séparation qui forme la jonction. Lorsqu'un semi-conducteur de type n entre en contact avec un semi-conducteur de type p, une jonction pn se forme. En équilibre thermique il n'y a pas de flux de courant net et par définition l'énergie de Fermi doit être indépendante de la position, puisqu'il existe une différence de concentration de trous et d'électrons entre les deux types de semi-conducteurs, les trous diffusent de la région de type p vers la région de type n et de la même manière, les électrons du matériau de type n diffusent dans la région de type p. Lorsque les porteurs diffusent, les impuretés chargées (accepteurs ionisés dans le matériau de type p et donneurs ionisés dans le matériau de type n) sont découvertes, c'est-à-dire qu'ils ne sont plus protégés par le porteur majoritaire. Lorsque les charges de ces impuretés sont découvertes, un champ électrique (ou différence de potentiel électrostatique) est produit, ce qui limite la

diffusion des trous et des électrons. En équilibre thermique les courants de diffusion et de dérive pour chaque type de porteur s'équilibrent exactement. Chaque type de porteur s'équilibrent exactement, il n'y a donc pas de flux de courant net dans la région de transition entre les semi-conducteurs de type n et p est appelée zone de charge d'espace(ZCE). Elle également appelée région d'appauvrissement, car elle est effectivement dépourvue de trous et d'électrons en supposant que les régions de type p et de type n soient suffisamment épaisses, les régions situées de part et d'autre de la région d'appauvrissement sont essentiellement neutres du point de vue de la charge (souvent appelées quasi-neutres)la différence de potentiel électrostatique résultant de la formation de la jonction est appelée tension intégrée V_{bi} elle résulte du champ électrique créé par l'exposition de la charge positive et de la charge négative de l'espace de la charge d'espace positive et négative dans la région de déplétion [7].

I.9. Dopage :

À température ambiante, le nombre de porteurs dans un semi-conducteur pur est faible, ce qui entraîne une mauvaise conductivité.

I.9.1. Dopage de type N :

Un atome pentavalent remplace un atome de silicium. Quatre d'entre eux maintiennent des connexions avec les atomes de silicium environnants, et le cinquième accessible sera rapidement stimulé vers la bande de conduction par une agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif) [5].

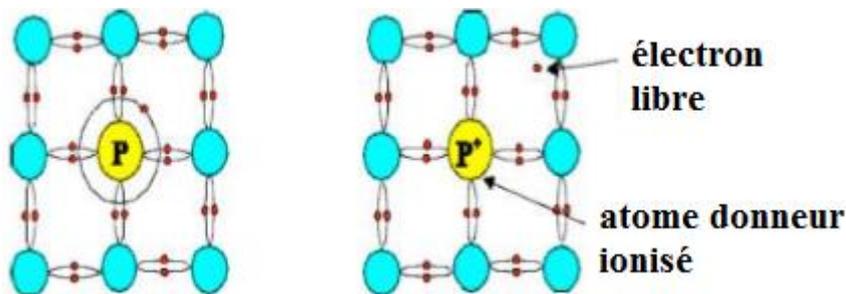


Figure I.6 : Dopage de type N [5].

I.9.2. Dopage de type P :

De même, lorsqu'on introduit des atomes trivalents, leurs trois électrons vont former des liaisons covalentes avec trois atomes voisins tout en laissant un trou dans le quatrième. Pour

générer un courant, ce trou dans le cristal se déplace. On obtient un cristal dopé P (positif) lorsque le nombre de trous est nettement supérieur au nombre d'électrons libres dans le cristal intrinsèque. Les impuretés utilisées sont souvent du bore [5].

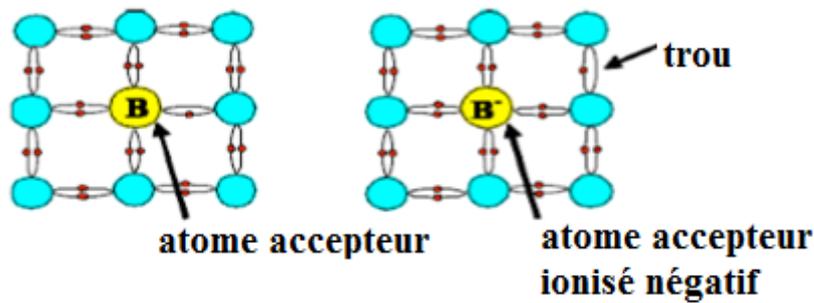


Figure I.7 : Dopage de type P [5].

I.10. Les cellules solaires :

Les cellules solaires, en général ils sont des dispositifs électroniques qui génèrent de l'électricité lorsqu'ils sont éclairés, fonctionnent grâce à l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre-Edmond Becquerel en 1839. D'où le nom collectif de photovoltaïque ou en abrégé PV qui désigne les systèmes d'alimentation photovoltaïques, les composants ou l'industrie des cellules solaires dans son ensemble. Dans cette thèse, le concept de photovoltaïque sera utilisé dans un sens large concernant les systèmes et l'industrie, tandis que le terme de cellule solaire sera utilisé lorsqu'il s'agira de dispositifs [4].



Figure I.8 : Cellule solaire.

I.11. Structure d'une cellule solaire :

La structure la plus simple d'une cellule solaire, représentée sur la figure (I.9), comporte une jonction entre deux zones dopées différemment (p-n) d'un même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction), la moins épaisse étant soumise au flux lumineux. Chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact [5].

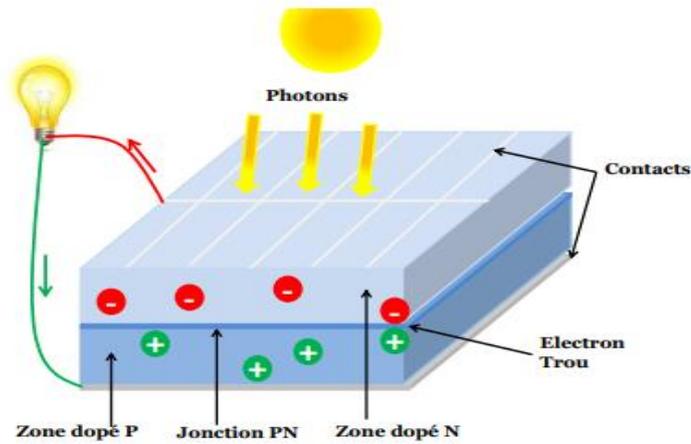


Figure I.9: Structure la plus simple d'une cellule solaire [8].

I.12. Cellule solaire idéale :

Si la caractéristique de la jonction est de la forme $I_s = I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$; on peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'un photocourant supplémentaire, I_{ph} , dont le sens est opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule éclairée, on recueille ce courant (Figure. I.10(a)). Le courant sous lumière vaut [9].

$$I_s = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{I. 1})$$

Et la tension V est donnée par :

$$V = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} \pm I_s - I}{I_s} \right) \quad (\text{I. 2})$$

Où : $U_t = \frac{kT}{q}$; Q est le facteur de qualité ; I_s est le courant de saturation inverse de la diode.

I.13. Cellule solaire réelle :

La figure I.10(b) présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer sur la caractéristique I-V de la cellule [9].

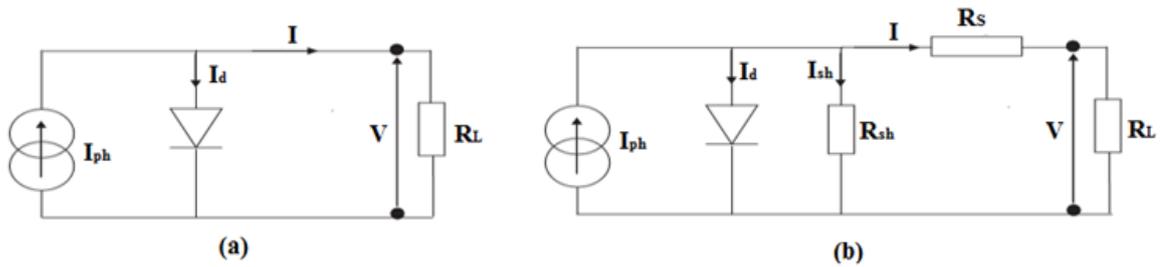


Figure. I.10: Schéma équivalent d'une cellule solaire a) -Idéale ; b) -Réelle [9].

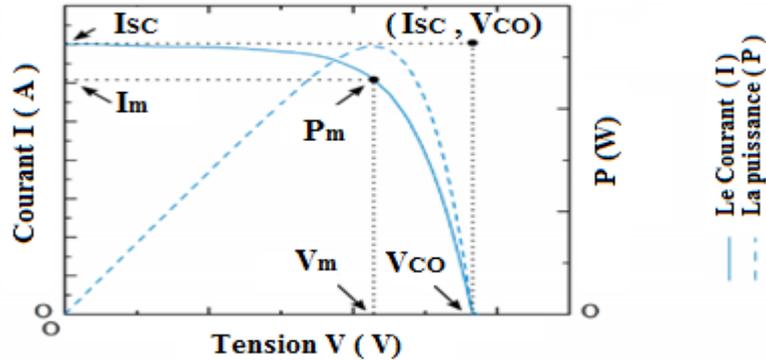


Figure I.11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire éclairée [9].

I.14. Influence des résistances série et shunt :

La résistance série R_s caractérise les pertes par effet Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteurs avec l'électrode à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie, ce qui va limiter le rendement de conversion.

Tandis que la résistance shunt R_{sh} caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau : épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace [10].

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomènes physiques assimilables aussi à une résistance shunt R_{sh} .

L'équation de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances parasites R_s et R_{sh} s'écrit donc [9] :

$$I(V) = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.3)$$

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V+R_s I}{Q U_t}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.4)$$

I.15. Différentes caractéristiques d'une cellule solaire :

Les caractéristiques $J(V)$ d'une cellule solaire sous éclairement ou à l'obscurité est présenté dans la figure (I.12) [11].

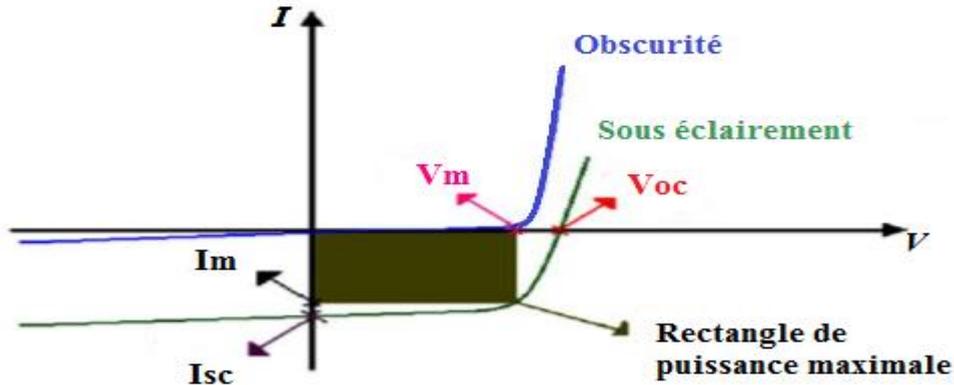


Figure. I.12 : Caractéristique courant-tension d'une cellule [11].

I.15.1. Courant de court-circuit I_{sc} :

Le courant de court-circuit est le courant débité par la cellule sous éclairement en court-circuitant la sortie. C'est-à-dire que : $I_{sc} = (V = 0)$ pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant photovoltaïque I_{ph} , ($I_{sc} = I_{ph}$).

I.15.2. Tension de circuit ouvert V_{co} :

La tension de circuit ouvert V_{co} correspond à un courant nul $I = 0$.

C'est à dire : $V_{co} = V (I = 0)$.

I.15.3. Réponse spectrale, $SR(\lambda)$:

La réponse spectrale d'une cellule solaire PV c'est l'efficacité de la transformation d'énergie solaire en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau formant la cellule solaire. La réponse spectrale s'exprime selon l'équation suivante :

$$SR(\lambda) = \frac{P_{ph}}{qF(\lambda)(1 - R(\lambda))} \quad (I.5)$$

I.15.4. Puissance maximale, P_m :

La puissance électrique produite par une cellule solaire PV sous éclairage est égale au produit de l'intensité du courant et de la tension. Il faut ainsi fonctionner au point de puissance maximale P_{max} .

$$P_m = (IV)_{max} = I_m \cdot V_m \quad (I.6)$$

I.15.5. Facteur de forme, FF :

Le facteur de forme exprime le rapport entre la puissance maximale et la puissance idéale ($V_{co} \cdot I_{sc}$).

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \cdot V_{co}} \quad (I.7)$$

I.15.6. Rendement de conversion, η :

Le rendement de conversion η est le rapport de la puissance fournie par la cellule sur la puissance incidente (l'éclairage). A est la surface éclairée de la cellule, $P_i = 100 \text{ mW-cm}^{-2}$

Il s'exprime selon l'équation suivante [11] :

$$\eta = \frac{P_m}{A \cdot P_i} = \frac{I_{sc} \cdot V_{co} \cdot FF}{A \cdot P_i} \quad (I.8)$$

I.16. Fonctionnement d'une cellule solaire :

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 les matériaux semi-conducteurs.
- Collecte des particules générées dans le dispositif. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction pn. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.13 [12].

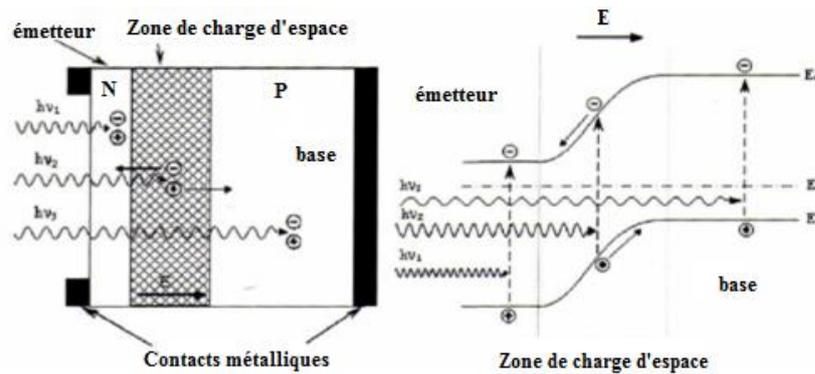


Figure I.13 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque [12].

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 photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- *dans la zone N ou P*, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant 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 une photo courant de génération [12].

I.17. Rendement des cellules solaire :

Différentes technologies de cellules photovoltaïques sont utilisées aujourd'hui. Elles reposent toutes sur les propriétés photo-électriques des matériaux semi-conducteurs. Afin d'avoir une vision globale de ces technologies du point de vue de l'évolution et leurs performances en fonction des améliorations apportées. Le choix d'une technologie relève d'un compromis entre rendement énergétique, encombrement associé et coût. Il est possible de distinguer plusieurs grandes familles de cellules PV selon les technologies utilisées [13] :

I.17.1 La filière Silicium :

Actuellement c'est la plus utilisée et ce dès les années 50. Elle offre à l'heure actuelle l'un des meilleurs compromis rendement énergétique/coût. On peut distinguer diverses technologies de modules selon la synthèse du matériau silicium [13].

- ❖ **Le silicium monocristallin** : La pureté du silicium sous cette forme est extrêmement élevée. La structure cristalline est parfaite si elle est obtenue par la méthode de Czochralsky. Pour obtenir ce résultat, le processus de fabrication est sophistiqué et consomme beaucoup d'énergie. Par rapport au procédé au silicium, les rendements de conversion obtenus sont parmi les meilleurs.
- ❖ **Le silicium poly cristallin** : La structure cristalline est moins pure qu'auparavant, bien que les rendements de conversion soient plus faibles, le coût de fabrication de ces cellules est moins élevé.

I.17.2. Les filières dites « Couches Minces » :

Ces technologies reposent sur des matériaux possédant un fort coefficient d'absorption du spectre solaire, par exemple [13] :

- ❖ **Le silicium Amorphe (a-Si)** : Le silicium à l'état amorphe est utilisé depuis le début des années 1970. Grâce à son emploi en couches minces, qui permet de réduire les prix, il permet aujourd'hui de produire des générateurs moins coûteux que les technologies antérieures.
- ❖ **Le Tellure de Cadmium (CdTe)** : Le rendement de conversion de cette technique est nettement supérieur. La toxicité du cadmium reste toutefois le principal obstacle à une utilisation à grande échelle de cette technologie.
- ❖ **Le Cuivre Indium Sélénium (CIS)** : Cette filière plus complexe à maîtriser, présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grande quantité.

D'autres technologies prometteuses comme les matériaux organiques, les matériaux nanocristallins ou les structures multi-jonctions laissent présager d'excellentes performances futures et sont aujourd'hui au stade de la recherche.

I.18. Technologie des couches minces CIGS :

Les cellules solaires en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (souvent appelées "cellules CIGS") sont composées de couches minces multiples, le plus souvent déposés sur des substrats en verre. Le dépôt en couche mince, avec interconnexion monolithique des cellules individuelles, sur des substrats relativement bon marché est le grand avantage des

technologies à couches minces par rapport à une technologie basée sur les plaquettes, où les cellules individuelles doivent être soudées ensemble pour former des chaînes et être disposées en module. Dans ce texte, le terme CIGS sera utilisé pour désigner les matériaux dont $x \approx 0,3$, mais aussi en référence à l'ensemble du système de matériaux (du CIS au CGS). Système de matériaux (du CIS au CGS).

Il est d'usage qu'une cellule solaire porte le nom de son matériau absorbant. CIGS est l'abréviation pour Cu (InGa) Se₂, qui présente une structure de réseau en chalcopyrite, une bande interdite directe et pour les cellules de cette étude une nature poly cristalline. Les joints de grains de ce matériau sont relativement bénins ce qui est important pour atténuer les pertes par recombinaison. Une faible densité de défauts électroniquement actifs à la surface des grains en raison de la passivation au sodium des défauts du site de cuivre est l'explication commune CuInSe₂ à une bande interdite (E_g) de 1,035 eV à basse température plus proche de 1,0 eV à température ambiante. Cette valeur peut être modifiée par l'ajout de Ga aux sites du réseau de l'In, généralement par codéposition avec CuGaSe₂ ($E_g=1,68$ eV). Les cellules à haut rendement ont généralement des rapports Ga/(In+Ga) entre 0,2 et 0,3. [14]

I.18.1. Physique du dispositif de cellule solaire CIGS :

Lorsque la couche tampon de type p et les couches d'absorption CIGS de type n entre en contact, une jonction pn se forme, le processus est décrit dans la figure (Figure I.14). Le matériau de type p bien qu'électriquement neutre, est dopé pour avoir un excès de trous (états accepteurs). Le matériau de type n également électriquement neutre, est dopé pour avoir un excès d'électrons (états donneurs). Lorsque les deux matériaux entrent en contact, une jonction se forme. [14]

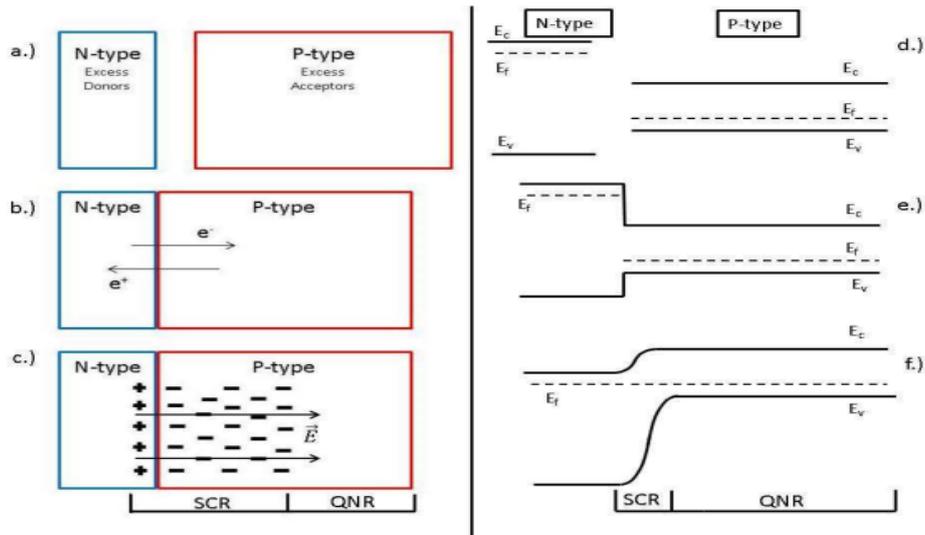


Figure I.14 : a-c : jonction p-n et formation de la zone de charge d'espace, d-f : diagrammes de bande.

I.19. Structure des cellules solaire CIGS :

Une cellule solaire typique à couche mince en Cu(InGa) Se₂ (CIGS) se compose des couches suivantes (Figure I.15) :

- **Substrat** : La préparation de cellules solaires chalcopyrites commence par le dépôt du Molybdène (Mo) sur un substrat en verre ou flexible
- **Un contact arrière métallique (Mo)** : Le matériau le plus couramment utilisé comme un contact arrière dans les cellules solaires chalcopyrites est le molybdène Mo.
- **Une couche d'absorbeur p-CIGS** : Le choix du meilleur matériau absorbant détermine les performances d'une cellule solaire à hétérojonction en couche mince. Il doit s'agir d'un semi-conducteur à coefficient d'absorption élevé et à bande interdite directe. En raison de la longueur de diffusion des électrons et de l'épaisseur des électrons de 1 à 3 μm , il doit de préférence être un matériau de type p.
- **Une couche tampon de type n (ou intrinsèque)** : généralement du CdS. Seule la couche qui entre en contact avec la couche absorbante est qualifiée de couche tampon. Toute autre couche qui permet à la lumière de traverser la cellule est considérée comme faisant partie de la couche fenêtre..
- **Une couche fenêtre de ZnO intrinsèque** : est un contact frontal transparent n⁺-ZnO. Des grilles de contact métalliques Ni/Al complètent la cellule (un seul doigt de grille est représenté).

- Une couche d'oxyde de fer.
- **Contact avant** : Le contact avant final est réalisé en ajoutant à l'empilement une grille de Ni-Al déposée sur la couche fenêtre et qui a le rôle de réduire les pertes ohmiques (meilleure collecte de charges générées par le dispositif) [15].

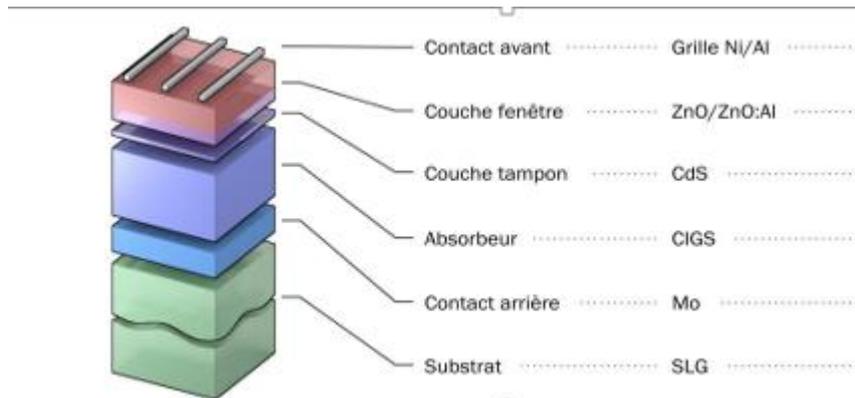


Figure I.15 : Schéma de principe d'une cellule à base de CIGS [16].

Un diagramme de bande typique pour la construction d'une cellule CIGS est présenté à la figure I.16. Le site des bandes interdites plus larges du ZnO et des couches tampons permettent à la majorité des photons d'être absorbés dans l'absorbeur de type p à bande interdite étroite (CIGS). Les paires électrons-trous générées par les photons dans l'absorbeur CIGS sont séparées par le champ électrique intégré dans la jonction pn et contribuent à la photo courant de la cellule. La tension en circuit ouvert de la cellule solaire doit être déterminée par le potentiel intégré V_{bi} . Ainsi dans un cas simple des bandes interdites plus élevées. Ainsi, dans un cas simple des bandes interdites d'absorbeur plus élevées devraient produire un V_{OC} plus élevé et un J_{SC} plus faible. La différence d'affinité des électrons au niveau l'hétéro-interface tampon/absorbeur se traduit par une discontinuité de la bande de conduction ΔE_c [15].

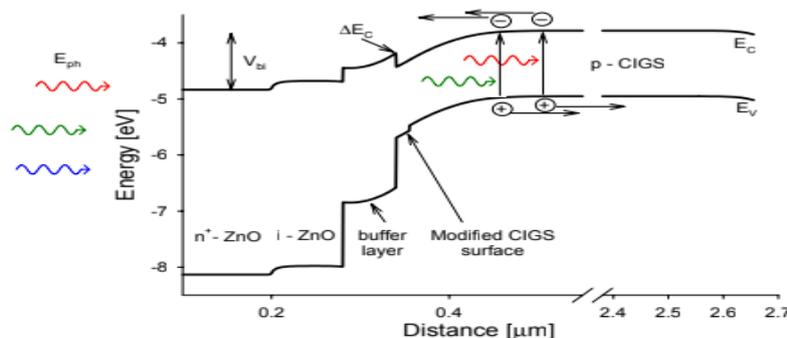


Figure I.16 : Diagramme de bande simulé pour une cellule solaire à couche mince en Cu(In, Ga)Se₂.

I.20. Conclusion :

Ce chapitre est consacré à familiariser le domaine photovoltaïque. Où il est nécessaire de connaître la définition et l'historique d'une cellule solaire PV. Sans rayonnement solaire la cellule ne sert à rien, c'est pourquoi, le rayonnement solaire est un paramètre aussi important de le savoir. Les avantages et inconvénients d'une cellule solaire PV. La compréhension du principe de fonctionnement de la cellule PV est aussi très intéressante à le détailler. Juste après, les différentes caractéristiques d'une cellule solaire ont été présentées. Puis, les différentes technologies utilisées par l'industrie PV ont été également présentées. Enfin, nous avons terminé par la technologie des couches minces

Chapitre II :

**Etude analytique et optimisation d'une cellule solaire
en utilisant les algorithmes génétiques**

Chapitre II : Etude analytique et optimisation d'une cellule solaire en utilisant les algorithmes génétiques.

II.1. Introduction :

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches afin d'atteindre le meilleur rapport efficacité/coût. Avec une bande interdite directe, la couche absorbante des cellules solaires en couches minces à un coefficient d'absorption optique élevé qui permet d'utiliser des absorbeurs de quelques microns d'épaisseur seulement d'absorption optique élevé, ce qui permet d'utiliser des absorbeurs de seulement quelques microns d'épaisseur. Parmi eux, le di-séléniure de cuivre, d'indium et de gallium poly cristallin Cu (In_{1-x}Gax) Se₂ (CIGS) est l'un des matériaux semi-conducteurs les plus prometteurs pour les cellules solaires à couche mince à faible coût et à haut rendement. En outre, les films minces CIGS présentent une bande interdite accordable, une excellente stabilité à l'extérieur, une résistance aux radiations et offrent une puissance spécifique allant jusqu'à 919 W/KH; la plus élevée de toutes les cellules solaires.

Dans ce chapitre, on présentera la configuration physique des éléments de la cellule solaire, Ensuite, on donnera une description des différents éléments constituant d'une cellule solaire CIGS, on finira par un bref sur l'optimisation mono-objectif des algorithmes génétique.

II.2. Modèle de simulation d'une cellule solaire PV en couches minces à hétérojonction :

II.2.1. Structure de la cellule :

La structure de la cellule considéré dans cette étude se compose des matériaux suivants : Fenêtre ZnO(n) / Tampon CdS(n) / Absorbant CIGS(p). La figure II.1 illustre les dimensions et les différentes régions de l'hétérojonction tampon CdS(n) / Absorbant CIGS (p). Les expressions de la largeur de la zone de charge d'espace dans chacun des semi-conducteurs sont données par [9]:

$$w_1 = \left(\frac{2N_a}{eN_a} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 N_d + \varepsilon_1 N_a} \right)^{1/2} (V_d)^{1/2} \quad (\text{II. 1})$$

$$w_2 = \left(\frac{2N_d}{eN_a} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 N_d + \varepsilon_1 N_a} \right)^{1/2} (V_d)^{1/2} \quad (\text{II. 2})$$

H est l'épaisseur totale de la cellule et :

$$x_n = x_j = w_n - w_j ; x_p = x_j + w_1 + w_2 ; H = w_n + w_p ; H' = H - x_p = w_p - w_2 \quad (\text{II. 3})$$

Et V_d est le potentiel de diffusion de la jonction donnée par [9] :

$$V_d = \frac{1}{q} [E_{g2} + (x_2 - x_1)] U_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{N_{c1} N_{v2}} \right) \quad (\text{II. 4})$$

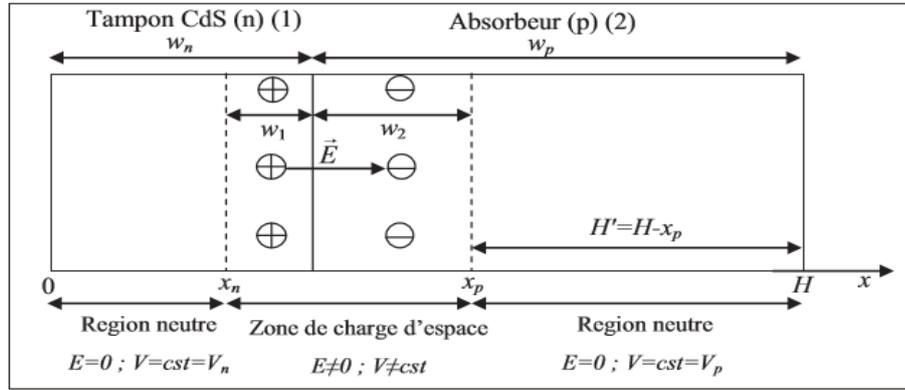


Figure II.1 : Dimensions et régions d'une cellule solaire CdS/CIGS [9].

Tel que : $U_t = kT/q \approx 25$ mV est la potentielle thermodynamique.

II.2.2. Propriétés optiques de la cellule :

Si nous tenons compte l'absorption dans la première couche rencontrée par la lumière solaire ZnO(n) dite couche fenêtre (TCO), le flux solaire $F(\lambda)$ à $x = 0$ est donné par [9]:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda) \cdot e^{-a_{ZnO}(\lambda) \cdot w_{ZnO}} \quad (\text{II. 5})$$

Où : $F_0(\lambda)$ est le flux solaire à $x = -w_{ZnO}$, déduit de l'expression du spectre ou irradianance solaire $I_{rs}(\lambda)$ comme suit :

$$F_0(\lambda) = \frac{I_{rs}(\lambda)}{h\nu} \quad (\text{II. 6})$$

$a_{ZnO}(\lambda)$ et w_{ZnO} sont respectivement le coefficient d'absorption et l'épaisseur de la couche ZnO(n).

Les coefficients d'absorptions, $\alpha(\lambda)$ pour les deux matériaux : CdS et CIGS(Absorbeur) sont donnés par :

$$\alpha_{cds}(\lambda) = \alpha_1(\lambda) = \frac{A}{E} (E - E_{gcds})^{1/2} \quad (\text{II. 7})$$

$$\alpha_{Absorbeur}(\lambda) = \alpha_2(\lambda) = B \cdot (h\nu - E_{gAbs})^{1/2} \quad (\text{II. 8})$$

Avec : A et B sont des constantes et $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ est l'énergie d'un photon.

E_{gCdS} et E_{gAbs} sont les largeurs de la bande interdite (le gap) de CdS et CIGS respectivement.

II.2.3. Calcul la densité de photo courant, $J_{ph}(\lambda)$:

Dans les trois régions, la résolution de l'équation de continuité combinée à l'équation de Poisson et à l'équation de la densité de courant permet de calculer la densité de courant dans chacune des trois régions. En tenant compte du phénomène de génération présentée par le taux $G(\lambda, x)$ [17]:

$$G(\lambda, x) = a(\lambda)F(\lambda)(1 - R(\lambda))e^{-a(\lambda)x} \quad (II. 9)$$

Et celui de recombinaison présenté par les taux U_n et U_p comme suit [9]:

$$\text{Pour les électrons dans la région P (CIGS) :} \quad U_n = \frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{n - n_0}{\tau_n} \quad (II. 10)$$

$$\text{Pour les trous dans la région N (CdS) :} \quad U_p = \frac{\Delta p}{\tau_p} = \frac{p - p_0}{\tau_p} \quad (II. 11)$$

Où, $R(\lambda)$ est la fraction des photons réfléchis par la surface frontale, n est la concentration d'électrons dans la couche p-CIGS et p est celle des trous dans la couche n-CdS. n_0 et p_0 sont les concentrations d'équilibre des électrons et des trous, respectivement. τ_n et τ_p sont les durées de vie des électrons et des trous respectivement données par [17] :

$$\tau_n = (\sigma_n \cdot v_{th} \cdot N_{DG})^{-1} \quad (II. 12)$$

$$\tau_p = (\sigma_p \cdot v_{th} \cdot N_{AG})^{-1} \quad (II. 13)$$

$v_{th} \approx 107$ cm/s est la vitesse thermique.

Dans la première zone neutre N (CdS), le champ électrique $E=0$ d'où d'après, la densité de courant des trous est donnée par :

$$J_p = \left(q \frac{F(1 - R)a_1 L_p}{a_1^2 L_p^2 - 1} \right) \times \left[\frac{\frac{S_p L_p}{D_p} + a_1 L_p - \exp(-a_1 x_n) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \operatorname{ch} \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + \operatorname{sh} \left(\frac{x_n}{L_p} \right) \right)}{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \operatorname{ch} \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + \operatorname{sh} \left(\frac{x_n}{L_p} \right) \right)} - a_1 L_p \exp(-a_1 x_n) \right] \quad (II. 14)$$

Où : $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$ et $D_p = U_t \cdot \mu_p$ représente la longueur et le coefficient de diffusion des trous respectivement. S_p est la vitesse de recombinaison des trous à la surface avant de la couche CdS.

De même, d'après, dans la deuxième zone neutre P (CIGS) où le champ électrique $E=0$ et les minoritaires sont les électrons, la densité de courant des électrons, est donné par l'expression suivante:

$$J_n = \left(q \frac{F(1-R)a_2 L_n}{a_2^2 L_n^2 - 1} \right) \exp(-a_1(x_n + w_1) - a_2 w_2) \times \left[a_2 L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} + a_2 L_n - \exp(-a_2 x_n) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \operatorname{ch} \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + \operatorname{sh} \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + a_2 L_n \exp(-a_2 H') \right)}{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \operatorname{sh} \left(\frac{H'}{L_n} \right) + \operatorname{ch} \left(\frac{H'}{L_n} \right) \right)} \right] \quad (\text{II. 15})$$

Tel que : $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$ et $D_n = U_t \cdot \mu_n$ sont la longueur et le coefficient de diffusion des électrons respectivement. S_n représente la vitesse de recombinaison des électrons à la surface arrière de la couche CIGS.

Dans la région de la zone de charge d'espace, le champ électrique $E \neq 0$, d'après : la densité de courant dans cette zone est :

$$J_{zce} = qF(1 - R(\lambda))e^{-a_1 x_j} [(1 - e^{-a_1 w_1}) + e^{-a_1 w_1}(1 - e^{-a_2 w_2})] \quad (\text{II. 16})$$

$$J_{zce} = qF(1 - R(\lambda))e^{-a_1 x_n}(1 - e^{-a_1 w_1}e^{-a_2 w_2}) \quad (\text{II. 17})$$

Et par conséquent, la densité de la photo courante est donnée par :

$$J_{ph}(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{zce}(\lambda) \quad (\text{II.18})$$

Par l'intégration de la densité de courant $J_{ph}(\lambda)$ sur toute la l'intervalle du spectre solaire, en obtien la densité de photo courant total J_{ph} [9].

II.2.4. Caractéristique courant-tension $J(V)$:

La principale caractéristique d'une cellule solaire est celle de la variation de la densité de courant débitée par la cellule en fonction de la tension à ses bornes, communément appelée caractéristique $J(V)$. A partir de cette caractéristique l'utilisateur peut déduire aisément la densité de courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, ainsi que la puissance maximale que peut débiter la cellule.

La caractéristique $J(V)$ de la cellule est donnée par l'équation suivante :

$$J = J_{ph} - J_s \left(e^{\frac{V+R_s J}{Q U_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_s J}{R_{sh}} \quad (\text{II. 19})$$

Où : La densité de courant de saturation inverse J_0 est extrapolée selon l'équation :

$$J_0 = J_{00} e^{\frac{-E_g}{Q.K.T}} \quad (\text{II. 20})$$

Où : J_{00} est une constante qui dépend de la température.

Si : $V = 0$ alors $J = J_{sc}$, donc l'équation (II. 19) devient :

$$J_{sc} = J_{ph} - J_s \left(e^{\frac{R_s J_{sc}}{Q U_t}} - 1 \right) - \frac{R_s J_{sc}}{R_{sh}} \quad (\text{II. 21})$$

Cette équation est une équation non linéaire qu'on peut résoudre numériquement.

Aussi si $J = 0$ alors $V = V_{co}$ et l'équation (II. 19) devient :

$$J_{ph} - J_s \left(e^{\frac{V_{co}}{Q U_t}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{II. 22})$$

Comme cette équation est non linéaire, elle admet une solution numérique qui est la tension de circuit ouvert, V_{co} . Entre le point $(J, V) = (J_{sc}, 0)$ et le point $(J, V) = (0, V_{co})$ on représente la caractéristique, $J-V$. Parallèlement de cette représentation, on calcule la puissance maximale, donnée par:

$$P_m = (J \cdot V)_{max} \quad (\text{II. 23})$$

Et par conséquent, on peut facilement déduire le facteur de forme et le rendement de conversion, qui sont donnés par:

$$FF = \frac{P_m}{J_{sc} \cdot V_{co}} \quad (\text{II. 24})$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (\text{II. 25})$$

Où : la puissance incidente $P_i = 100 \text{ mW-cm}^{-2}$ est la puissance incidente dans les conditions standard AM1.5G et $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ [9].

Pour notre simulation, nous avons utilisé le langage Matlab Version (2016).

II.3. Optimisation d'une cellule solaire :

L'optimisation est l'étude des stratégies visant à améliorer le fonctionnement de la performance ou la réponse d'un système en augmentant ou en diminuant les fonctions connectées, par conséquent il s'agit d'un outil nécessaire à la modélisation quelle que soit la construction d'une cellule solaire il est vital d'optimiser ses caractéristiques afin d'avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et profils de dopage, la disposition des contacts et le confinement optique sont autant de facteurs à considérer. Les valeurs des paramètres idéaux dépendent bien sûr de la structure de la cellule solaire et leurs qualité du matériau (durée de vie, mobilité), qualité des contacts ohmiques et du taux de recombinaison de la surface (face avant et face arrière) [9].

II.4. Méthodes métaheuristiques :

Les nouveaux paradigmes ont été appelés métaheuristiques et étaient d'abord introduits au milieu des années 80 comme une famille de recherche d'algorithmes capables d'approcher et de résoudre des problèmes complexes d'optimisation en utilisant un ensemble de plusieurs heuristiques pour définir une heuristique de haut niveau utilisée pour guider d'autres heuristiques pour une meilleure évolution dans l'espace de recherche.

Bien que les méthodes de recherche stochastiques traditionnelles principalement basées sur le hasard (les solutions changent aléatoirement d'un pas à un autre), elles peuvent être utilisées en combinaison avec des algorithmes métaheuristiques pour guider le processus de recherche et d'accélérer la convergence. La plupart des algorithmes métaheuristiques sont seulement des algorithmes d'approximation parce qu'ils ne peuvent pas toujours trouver la solution optimale globale. Cependant, la caractéristique la plus attrayante d'un métaheuristique est que son application ne nécessite aucune connaissance particulière sur le problème d'optimisation à être résolu. Cet état fait que le métaheuristique est un outil général de résolution des problèmes d'optimisation

Depuis leur introduction au milieu des années 80 jusqu'à maintenant, les méthodes métaheuristiques pour résoudre des problèmes d'optimisation ont été continuellement développées. Elles permettant d'aborder et de résoudre un nombre croissant de problèmes qui sont précédemment considérés comme difficiles ou même impossible à résoudre.

Ces méthodes comprennent les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim de particules, l'algorithme des colonies de fourmis, ... etc [18].

II.5. Les algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques sont l'une des méthodes d'optimisation les plus utilisées. Ils font partie d'un sujet de recherche connu sous le nom de calcul évolutionnaire. Ils sont utilisés pour déterminer les valeurs maximales et minimales d'une fonction. Ils utilisent des processus biologiques tels que la reproduction et la sélection naturelle pour trouver des réponses aux problèmes.

Dans un algorithme génétique, de nombreux processus sont aléatoires. Cette technique d'optimisation, en revanche, permet de fixer les niveaux de probabilité et de contrôle. Ces algorithmes sont bien plus puissants et efficaces que les méthodes de recherche aléatoire et exhaustive, et ils ne nécessitent aucune connaissance supplémentaire du problème. Ils peuvent utiliser cette fonctionnalité pour résoudre des problèmes que les méthodes d'optimisation classiques ne peuvent pas résoudre en raison d'un manque de continuité, de dérivées, de linéarité ou d'autres qualités.

Nous allons passer en revue les principes fondamentaux d'un algorithme génétique dans les sections ci-dessous. Les opérateurs sont les pièces précises de l'algorithme génétique qui ont une fonction spécifique. Dans sa forme la plus élémentaire, un algorithme génétique est composé de trois opérateurs de base :

- Sélection.
- Cross over.
- Mutation.

L'opérateur de génération, en plus de ces opérateurs de base, forme la population chromosomique. En outre, l'opérateur d'élitisme est utilisé pour empêcher la perte de certains chromosomes réussis.

Pour générer la génération suivante, ces opérateurs sont appliqués à la génération actuelle. L'algorithme génétique continuera d'évoluer jusqu'à ce que tous les critères de conception aient été satisfaits. Ces critères sont définis par l'utilisateur au début du processus d'optimisation.

La base de l'algorithme génétique est présentée dans la figure II.2. La population est d'abord évaluée et son fitness est établie. Ensuite, les personnes ayant réussi sont choisies pour remplacer celles qui ont échoué. La phase suivante consiste à utiliser l'élitisme, le croisement et la mutation pour créer la population suivante. Ces procédures sont répétées jusqu'à ce que le niveau de population prédéterminé soit atteint [18].

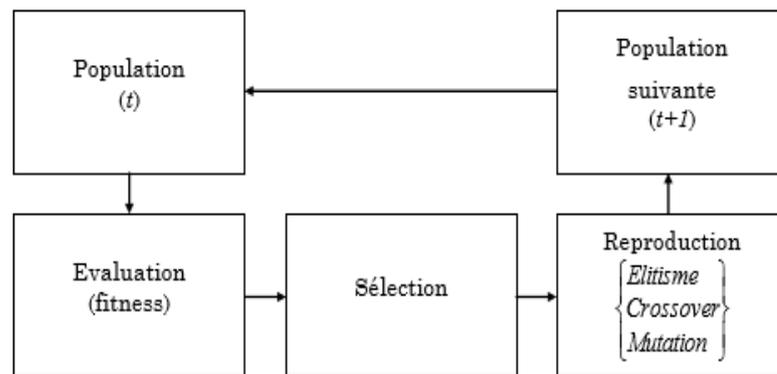


Figure II.2 : Organigramme simple de l'algorithme génétique [18].

II.5.1. Concept de chromosome :

Les variables dans l'algorithme génétique sont définies par l'idée de chromosome. Pour construire les chromosomes, chaque variable de décision est définie dans les gènes. Une chaîne binaire est la technique de codage la plus répandue.

II.5.2. Génération :

L'algorithme génétique va construire une population initiale basée sur les données dont nous disposons. Les chromosomes constituent chaque population. Chaque solution (chromosome) aura des variables de décision créées au hasard. Chaque position de bit dans le chromosome se voit attribuer un 1 ou un 0, le nombre donné de bits représentant certaines variables de décision. Cet opérateur est appelé opérateur "Génération".

L'algorithme génétique va traduire chaque gène en la variable associée et calculer la fonction objective une fois la population initiale produite. Une fois la fonction objective atteinte, une analyse de chaque chromosome de la population doit être effectuée.

II.5.3. Sélection :

En raison de leur faible fitness, cet opérateur est utilisé pour supprimer les pires chromosomes. Une fois que leurs rôles objectifs ont été découverts, un certain nombre de chromosomes ayant la plus mauvaise aptitude sont remplacés par le même nombre de chromosomes ayant une aptitude supérieure.

II.5.4. Elitisme :

Les chromosomes les plus aptes sont protégés du croisement et de la mutation par l'élitisme. L'idée est de préserver certains des chromosomes les meilleurs et les plus adaptés pour les générations futures. L'élitisme peut améliorer rapidement les performances de l'algorithme génétique.

II.5.5. Cross over :

Pour produire deux chaînes de descendance, l'opérateur de croisement est utilisé pour initier un échange partiel de bits (informations) entre les chaînes parentales. Pour le croisement, l'algorithme génétique choisit deux solutions au hasard. L'utilisateur détermine le taux de croisement au début de l'essai. La figure II.3 montre les types de croisements les plus courants : croisements à un point, à deux points et à plusieurs points. Notez que tous les points de croisement sont choisis au hasard.

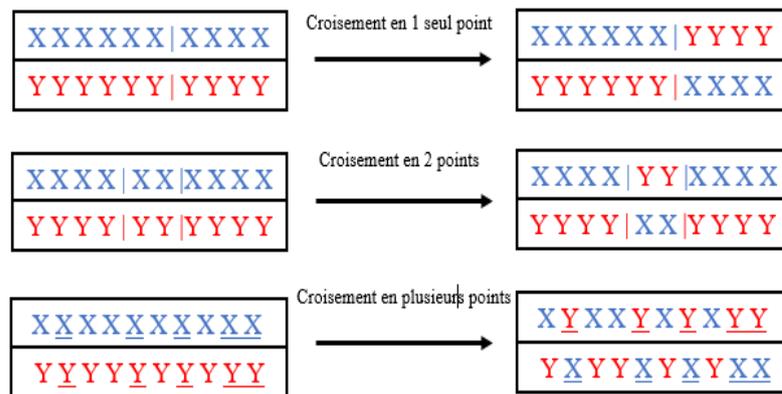


Figure II.3 : Opérateur Cross over [18].

II.5.6. Mutation :

Une fois que le temps d'application de la mutation est connu, l'opérateur de mutation modifie simplement la valeur d'un gène au hasard. Cette modification pourrait être effectuée dans des gènes réels en sélectionnant uniformément un nombre parmi une gamme de valeurs

concevables. Une autre option consiste à employer une distribution gaussienne avec une variance donnée et une moyenne nulle, le nombre créé par la distribution étant ajouté à la valeur du gène. Cette méthode peut être modifiée de façon à ce que la variance diminue lorsque l'algorithme est itéré.

II.5.7. Mise en œuvre d'un algorithme génétique :

Un algorithme génétique suit les étapes suivantes [18] :

Etape 1 : Déterminer le nombre des chromosomes, génération, les taux de mutation et croisement.

Etape 2 : Générer un nombre de population et initialiser la valeur des gènes avec un nombre aléatoire.

Etape 3 : Faire les étapes 4 à 7 jusqu'à ce que le nombre de génération soit atteint.

Etape 4 : Evaluation de la valeur de fitness des chromosomes en calculant la fonction objective.

Etape 5 : Sélection des chromosomes.

Etape 6 : Croisement.

Etape 7 : Mutation.

Etape 8 : Solution (meilleur chromosome).

L'organigramme d'un algorithme génétique est représenté ci-dessous.

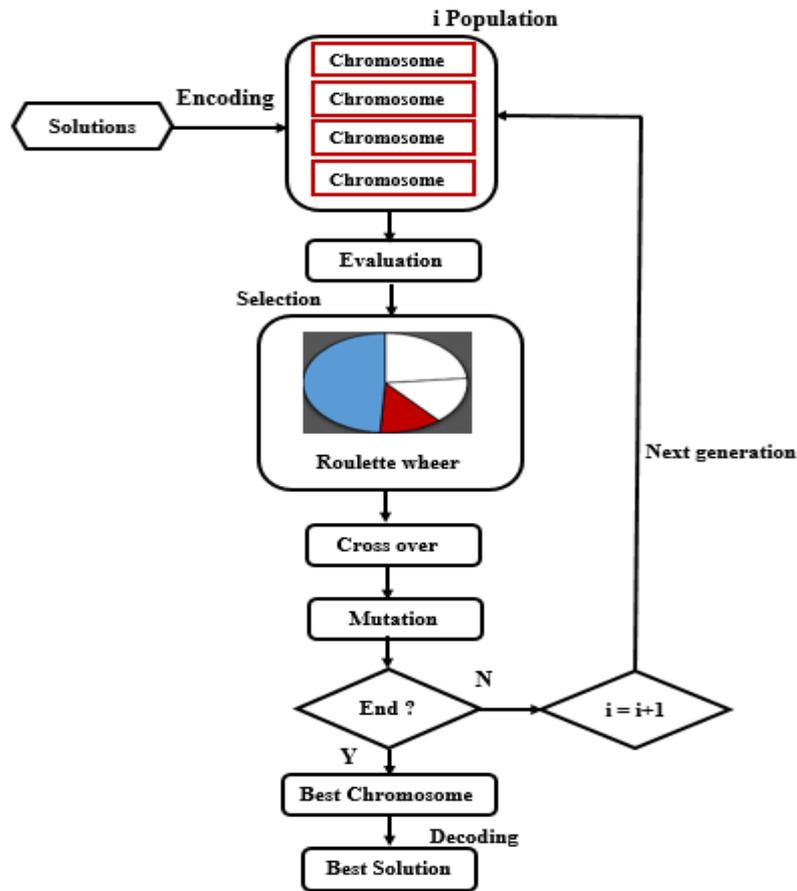


Figure II.4 : Organigramme d'un algorithme génétique [18].

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié et analysé le fonctionnement d'une cellule solaire en couches minces à hétérojonction à base de CdS/CIGS, ayant une structure N-P.

Nous avons utilisé un programme de calcul qui nous permet d'étudier l'influence des paramètres géométrie et physiques de cette structure tel que l'épaisseur de la surface de la structure, l'effet du dopage dans les deux zones N et P...etc.

L'approche basée sur l'optimisation MO (Mono-Objective), est proposée pour maximiser les performances électriques des cellules solaires. L'algorithme développé a réussi à la recherche du maximum possible des caractéristiques de la cellule solaire, on a utilisé l'équation du rendement comme fonction objective.

Il est noté que la méthode proposée dans cette partie peut être utilisée pour l'optimisation et l'amélioration des performances de fonctionnement de la cellule solaire.

Chapitre III :

**Modèle de simulation d'une cellule solaire PV en
couches minces et l'optimisation par les algorithmes
génétiques**

Chapitre III : Modèle de simulation d'une cellule solaire PV en couches minces et l'optimisation par les algorithmes génétiques.

III.1. Introduction :

Le coût des panneaux solaires reste une des principales pierres d'achoppement de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. C'est pourquoi les chercheurs du monde entier s'efforcent d'améliorer le rendement de conversion de la cellule tout en réduisant son coût. D'une part, ce coût peut être réduit en utilisant moins de matériaux absorbants dans la cellule, ce qui nécessite un coefficient d'absorption élevé. Il existe des cellules solaires à couche mince, le di-séléniure de cuivre, d'indium et de gallium est l'un de ces matériaux absorbants. Le Cu (Ga, In) Se₂ (CIGS) est un matériau composite de type I-III-VI à structure de chalcopyrite structure qui présente un grand potentiel pour la conversion photovoltaïque, telle que la structure cristalline de trois matériaux semi-conducteurs photovoltaïques :

Le Si, CdTe et CIGS sont trois types de semi-conducteurs. Ces matériaux présentent également les avantages d'une bande interdite réglable d'une grande stabilité externe et d'un coût peu élevé. Il possède une large bande interdite une grande stabilité externe et une dureté aux rayonnements ainsi que d'autres avantages.

Dans ce troisième chapitre, nous présentons le modèle de simulation d'une cellule solaire en couches minces à base d'un absorbeur de type p (CIGS), et faire l'optimisation mono objective par les algorithmes génétiques sur les résultats de simulation obtenus de la cellule solaire en couches minces.

III.2. Les paramètres de la simulation :

Le résultat de notre recherche bibliographique nous a inspiré l'intervalle de variation des paramètres où : Pour la couche CdS(n) : l'épaisseur W_n varie de 10 à 100 nm. Tandis que pour la couche CIGS(p) : l'épaisseur, W_p varie de 200 à 3000 nm, l'énergie de gap $E_{g_{CIGS}}$ varie de 1 à 2 eV. Le dopage N_d varie de 10^{16} à 10^{18} cm⁻³ et pour le dopage N_a varié de 10^{15} à 10^{17} cm⁻³ Les paramètres des matériaux utilisés dans la simulation sont présentés dans le tableau suivant :

Matériaux	CdS	CIGS
Epaisseur de la couche, w (nm), paramètre de base	50	3000
Affinité électronique, χ (eV)	4.4	4.5
Energie du gap, E_g (eV), paramètre de base	2.12	1.15
Mobilité des électrons, μ_n (Cm ² / V.s)	100	100
Mobilité des trous, μ_p (Cm ² / V.s)	25	25
Concentration des atomes accepteurs, N_a (cm ⁻³)	_____	5×10^{15}
Concentration des atomes donneurs, N_d (cm ⁻³)	1×10^{17}	_____
Permittivité relative, ϵ_r	10	13.6
Densité effective des états dans la bande de conduction, N_c (cm ⁻³)	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
Densité effective des états dans la bande de valence, N_v (cm ⁻³)	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Vitesse de recombinaison des électrons à la surface arrière, S_n (cm/s)	_____	10^7
Vitesse de recombinaison des trous à la surface avant, S_p (cm/s)	10^7	_____
Densité de défauts, N_t (cm ⁻³), paramètre de base	1×10^{18}	1×10^{14}
Section efficace de capture des électrons, σ_e (cm ²)	10^{-17}	5×10^{-13}
Section efficace de capture des trous, σ_h (cm ²)	10^{-12}	10^{-15}

(a)

Paramètres généraux de la cellule	
Coefficient de réflexion, $R(\lambda)$.	0.05
Résistance série, R_s (Ω -cm ²), paramètre de base	0.23
Conductance parallèle, G_{sh} (Ω -1-cm ⁻²) = 1/ R_{sh} , paramètre de base	1.14×10^{-3}
Facteur de qualité, Q , paramètre de base	1.38
Epaisseur de la couche ZnO, w_{ZnO} (nm)	200
La température, T (K)	300
Boltzmann constante, K (m ² Kg s ⁻² k ⁻¹)	1.38×10^{23}

(b)

Tableau III.1 : (a) et (b) Valeurs des paramètres utilisées dans la simulation.

III.3. Résultats et discussion

III.3.1. Flux solaire et irradiance :

Les figures III.1 et III.2 représentent respectivement, l'irradiance $I_{rs}(\lambda)$ et le flux solaire $F_0(\lambda)$ au sol en fonction de λ utilisé dans notre modèle analytique.

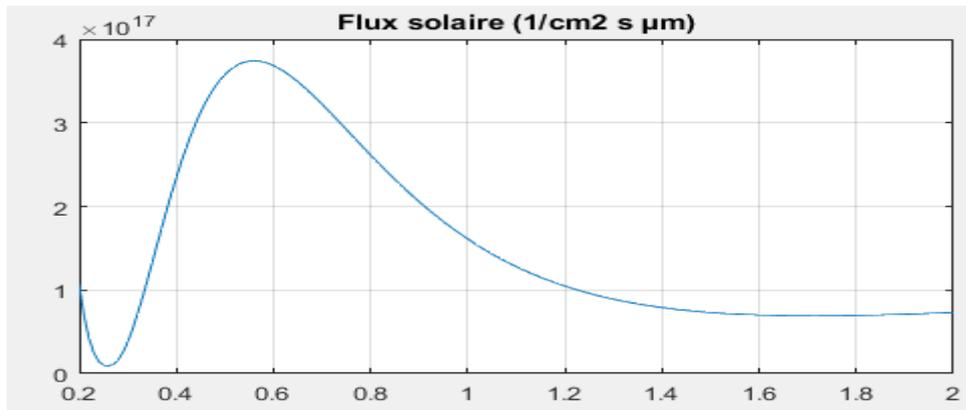


Figure III.1: Flux solaire au sol.

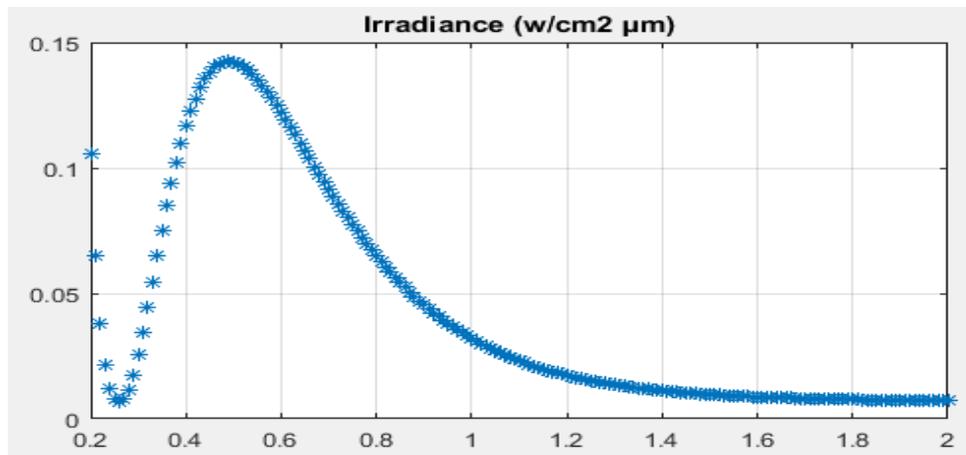


Figure III.2 : Approximation de l'irradiation spectrale solaire

III.3.2. Coefficient d'absorption :

Il est clair que la figure III.3 présente le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde, à cause de leur faible gap optique par rapport au CdS, le CIGS absorbe plus de photons que le CdS.

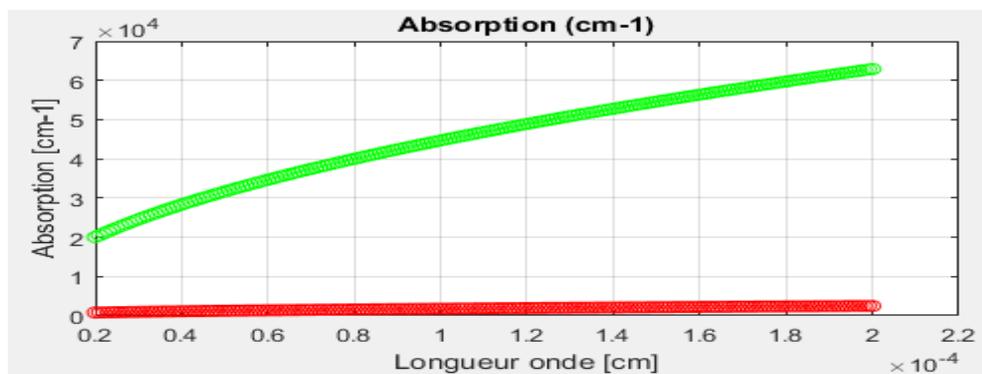


Figure III.3: Variation du coefficient d'absorption α en fonction de la longueur d'onde pour le CdS et le CIGS.

III.3.3. Variation de la caractéristique courant-tension $J-V$ de la structure en fonction de dopage N_a, N_d et l'épaisseur W_n, W_p :

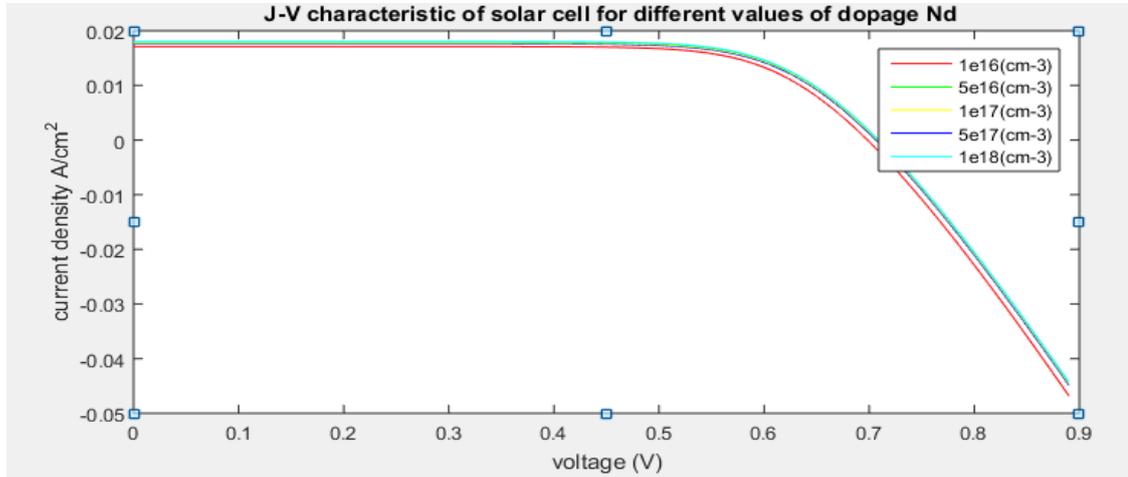


Figure III.4 : Caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire CdS/CIGS pour plusieurs valeurs du dopage N_d .

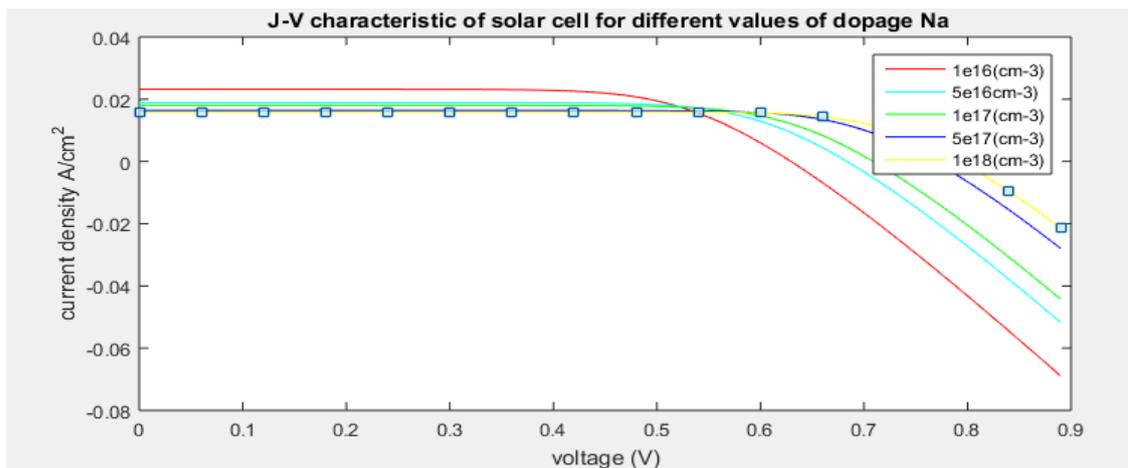


Figure III.5 : Caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire CdS/CIGS pour plusieurs valeurs du dopage N_a .

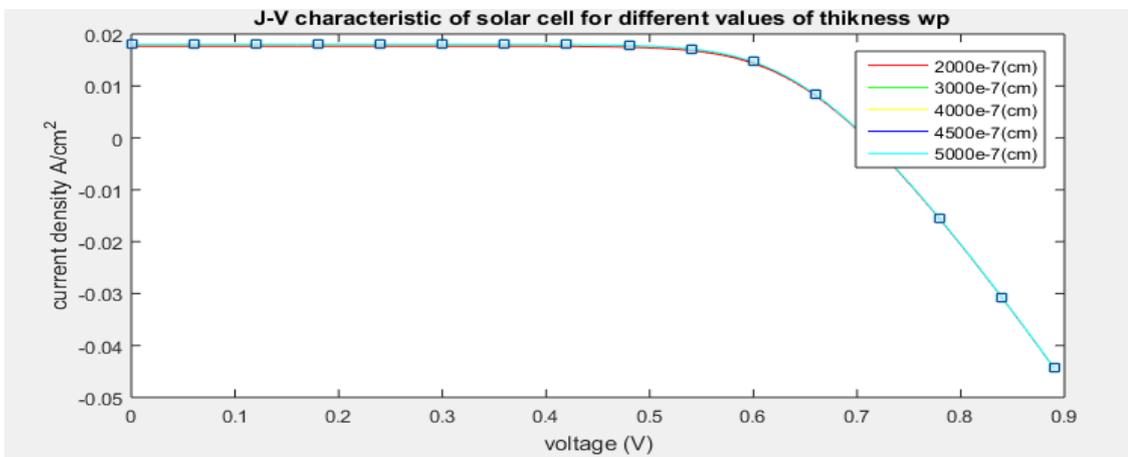


Figure III.6 : Caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire CdS/CIGS pour plusieurs valeurs de w_p .

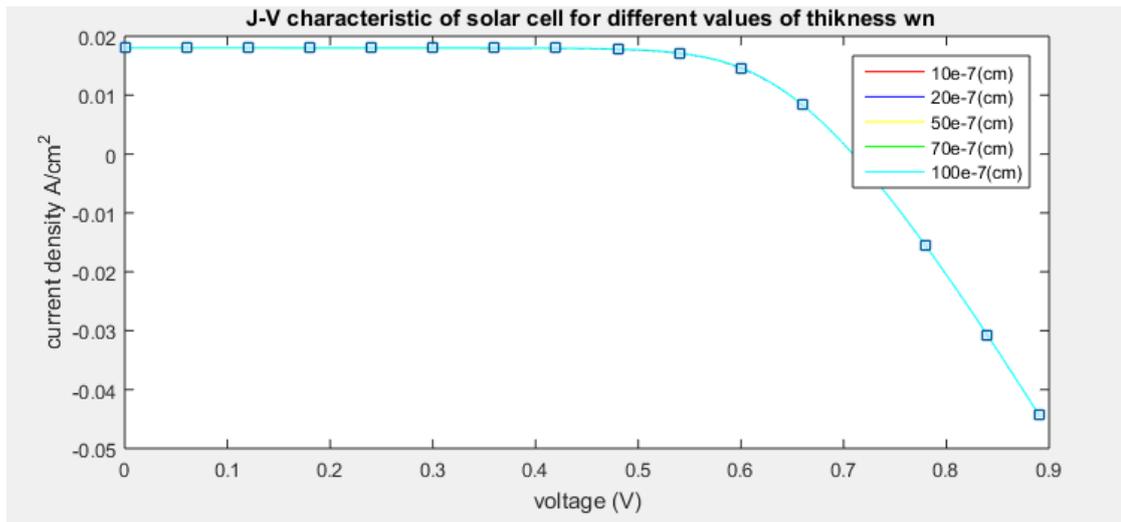


Figure III.7 : Caractéristique J (V) de la cellule solaire CdS/CIGS pour plusieurs valeurs de W_n .

Les figures (III.4, III.5, III.6, III.7) représentent la variation de la densité de courant en fonction de la tension pour plusieurs valeurs de dopage N_d de la couche CdS, N_a de la couche CIGS et l'épaisseur W_n de la couche CdS et W_p de la couche CIGS. D'après les résultats trouvés, l'augmentation du dopage N_d augmente légèrement les paramètres électriques de la cellule. Par contre, la croissance du dopage N_a booste les performances de la cellule en terme de J_{SC} et V_{OC} . en 3^{ème} cas après l'augmentation de W_p on remarque que V_{oc} fixe et J_{sc} augmente et en 4^{ème} cas après l'augmentation de W_n on remarque que V_{oc} augmente et J_{sc} augmente.

III.3.4. Influence du dopage du substrat de silicium sur les performances de la cellule solaire CdS/CIGS :

L'effet de variation de la concentration du dopage du substrat de la couche CdS sur les performances photovoltaïques des cellules solaires en couche mince à hétérojonction CdS/CIGS est illustré sur la figure III.8. le tableau suivant présente les paramètres électriques utilisés.

Nd (cm ⁻³) / CdS	10 ¹⁶	5×10 ¹⁶	10 ¹⁷	5×10 ¹⁷	10 ¹⁸
Jsc (mA/cm ²)	17.1	17.6	17.8	18	18
Voc (V)	0.7	0.71	0.712	0.714	0.715
FF (%)	72.74	72.69	72.35	72.15	72.25
η (%)	12.5303	13.0707	13.1951	13.3445	13.3804

Tableau III.2: Tableau comparatif des performances de la cellule solaire en fonction du dopage de la couche tampon de CdS.

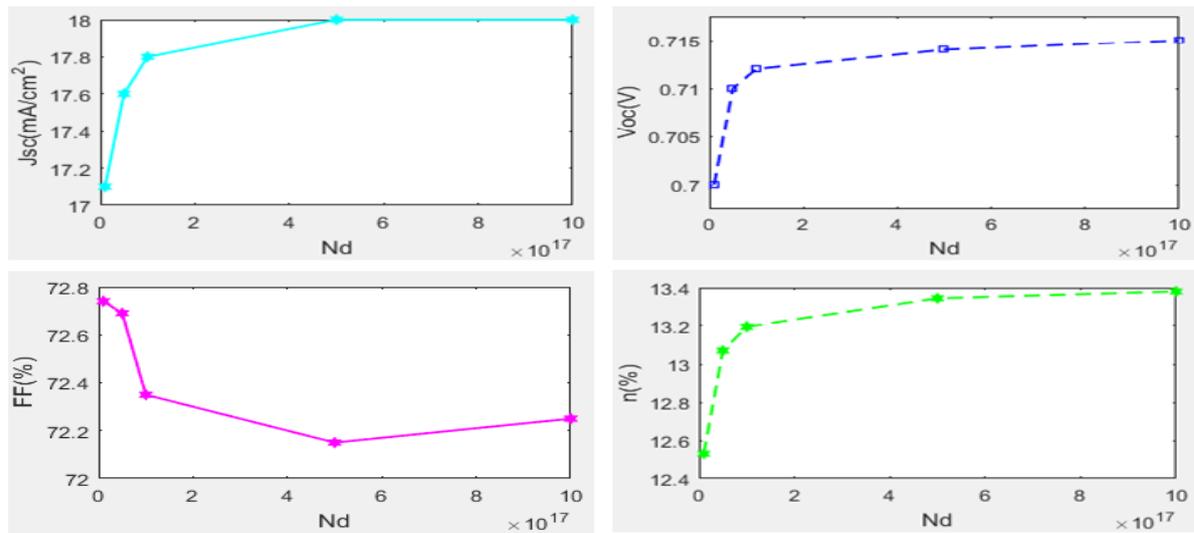


Figure III.8 : Performances de la cellule en fonction du dopage de la couche tampon (CdS).

D'après les résultats ci-dessus, le courant de court-circuit augmente avec l'augmentation du dopage de la couche tampon CdS jusqu'à une concentration du dopage de $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, où le courant de court-circuit égale à 18 mA et après il reste constant malgré le dopage de la couche tampon augmente. Pour la tension en circuit ouvert elle commence à croître avec le dopage de la couche tampon où la tension en circuit ouvert atteint sa valeur maximale de 0.715 V pour un dopage de 10^{18} cm^{-3} . Le facteur de forme montre une petite diminution avec l'augmentation du dopage de la couche CdS jusqu'à la valeur de $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ où le facteur de forme prend sa valeur minimale de 72.15 %, puis il commence à croître lorsque le dopage de la couche tampon CdS augmente. Finalement le rendement commence à croître avec le dopage de la couche tampon où le rendement atteint sa valeur maximale de 13.38 % pour un dopage de 10^{18} cm^{-3} .

III.3.5. Influence du dopage de la couche CIGS sur les performances de la cellule solaire CdS/CIGS :

L'effet de la variation de la concentration du dopage de la couche absorbeur (CIGS) sur les performances des cellules solaires simulées est illustré sur la figure III.9. Les paramètres électriques de cette cellule solaire pour différentes concentrations de dopage présentées sur le tableau III.3.

Na (cm⁻³) / CIGS	10¹⁵	5×10¹⁵	10¹⁶	5×10¹⁶	10¹⁷
Jsc (mA/cm²)	23.2	19.1	18	16.4	16
Voc (V)	0.63	0.68	0.71	0.77	0.79
FF (%)	68.23	72.29	72.75	74.58	75.78
η (%)	14.3518	13.5120	13.3804	13.5533	13.7849

Tableau III.3 : Tableau comparatif des performances de la cellule solaire en fonction du dopage de la couche absorbeur CIGS.

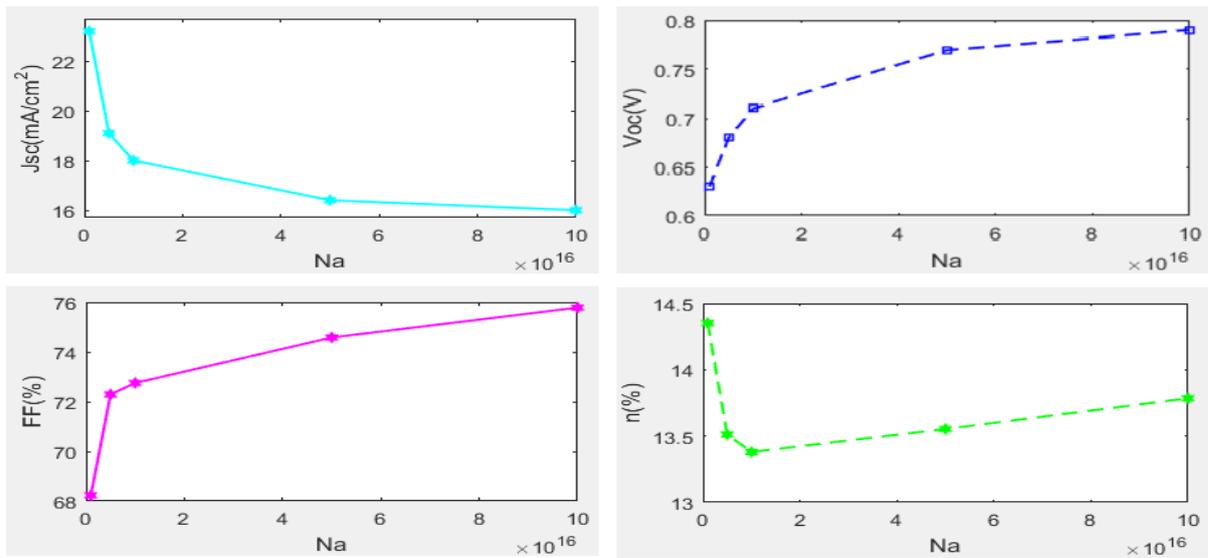


Figure III.9 : Performances de la cellule solaire en fonction du dopage de la couche absorbeur (CIGS).

D'après les résultats ci-dessus. On montre qu'il y a une diminution du courant de court-circuit avec l'augmentation du dopage de la couche CIGS et pour la tension du circuit ouvert et le facteur de forme on remarque qu'ils commencent à croître avec le dopage de la couche absorbante où la tension du circuit ouvert atteint sa valeur maximale de 0.79 V pour un dopage de 10^{17}cm^{-3} et le facteur de forme atteint sa valeur maximale de 75.78 % pour un dopage de 10^{17}cm^{-3} . Le rendement montre qu'il y a une petite diminution avec l'augmentation du dopage de la couche CIGS jusqu'à la valeur de 10^{16}cm^{-3} où le rendement prend sa valeur minimale de 13.38 %, puis il commence à croître lorsque le dopage de la couche absorbante CIGS augmente.

III.3.6. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur sur les performances de la cellule solaire CdS/CIGS :

La figure III.10 représente l'influence de l'épaisseur de la couche absorbeur (CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire simulée : courant de court-circuit (J_{SC}), tension de circuit ouvert (V_{CO}), facteur de forme (FF) et rendement (η). Les valeurs numériques de ces paramètres correspondants à différentes valeurs d'épaisseur de la base sont illustrées en tableau III.4.

W _p (μm) / CIGS	200	1000	1500	2500	3000
J _{sc} (mA/cm ²)	5.1	14.8	16.9	17.9	18
V _{oc} (V)	0.66	0.7	0.71	0.715	0.715
FF (%)	76.18	73.83	72.68	72.33	72.25
η (%)	3.6899	11.0069	12.5495	13.3209	13.3804

Tableau III.4 : Tableau comparatif des performances de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbeur CIGS.

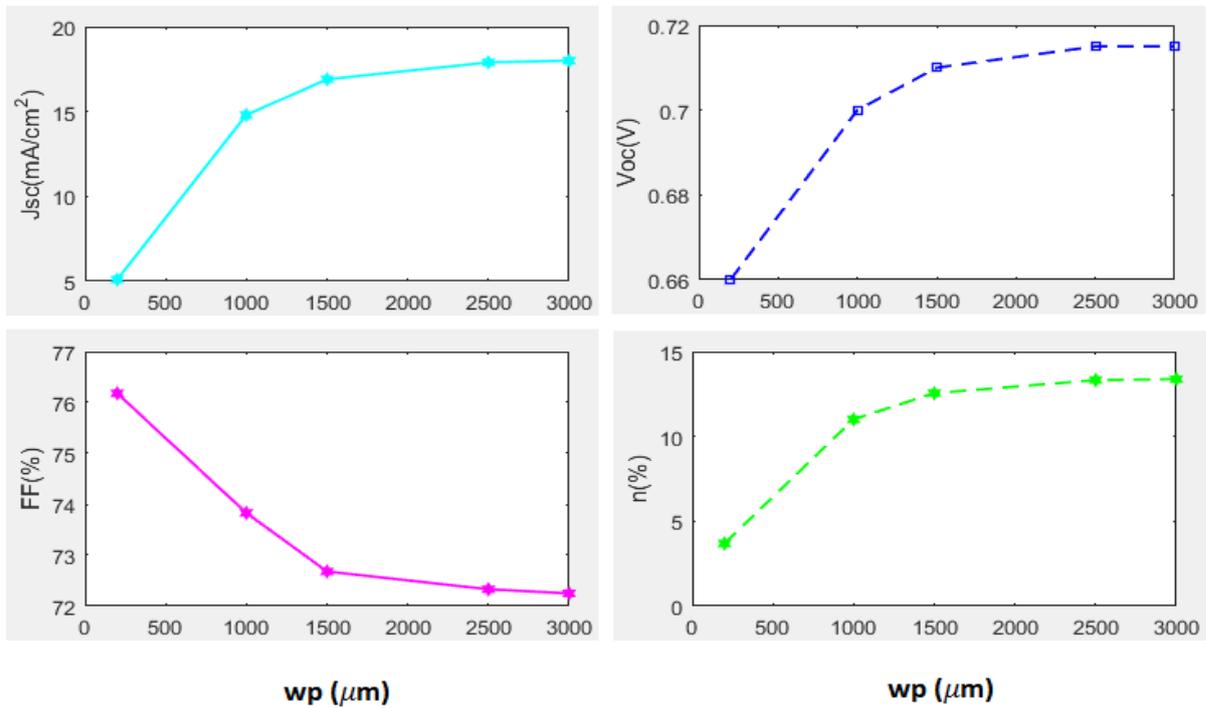


Figure III.10 : Performances de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche absorbant (CIGS).

Figure III.10 et Le tableau III.4 montrent comment l'épaisseur de la couche absorbante CIGS affecte les performances des cellules avec $W_n=50 \text{ nm}$, $E_g\text{CdS} = 2.12 \text{ eV}$, $E_g\text{CIGS} = 1.15 \text{ eV}$, L'épaisseur de la couche absorbante CIGS était varié de 1 μm à 4 μm . On remarque que si w_p augmente, seul le courant de court-circuit J_{sc} augmente puisque l'absorption augmente. Mais, V_{oc} et FF ne sont presque pas affectés par w_p . Ceci permet d'augmenter le rendement vers une valeur maximale d'environ 21%. Par conséquent, l'épaisseur optimale de la couche d'absorption CIGS serait d'environ 3 μm , une valeur à partir de laquelle le rendement n'a pas d'augmentation significative.

Nous remarquons d'après la figure III.10 que le courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbant CIGS jusqu'à une concentration d'épaisseur de la couche absorbant de 3000 μm , où le courant de court-circuit égale 18 mA . La tension en circuit ouvert commence à croître avec l'épaisseur de la couche absorbant où la tension en circuit ouvert atteint sa valeur maximale de 0.715 V et le facteur de forme montrent une diminution quand l'épaisseur augmente de la couche absorbant jusqu'à la valeur de 3000 μm où le facteur de forme prend sa valeur minimale de 72.25 %. Finalement le rendement commence à croître au long de l'épaisseur de la couche absorbant où le rendement atteint sa valeur maximale de 13.3804 % pour une épaisseur de la couche absorbant de 3000 μm .

III.3.7. Influence de l'épaisseur de la couche tampon (CdS) sur les performances de la cellule solaire CdS/CIGS :

La figure ci-dessous représente les variations des paramètres photovoltaïques des cellules solaires simulées en utilisant différentes épaisseurs d . Les valeurs numériques correspondantes à ces paramètres sont données en tableau III.5.

Wn (nm) / CdS	10	20	50	70	100
Jsc (mA/cm ²)	18	18	18	18	18
Voc (V)	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715
FF (%)	72.18	72.20	72.25	72.28	72.31
η (%)	13.3680	13.3713	13.3804	13.3861	13.3939

Tableau III.5 : Tableau comparatif des performances de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche tampon de CdS.

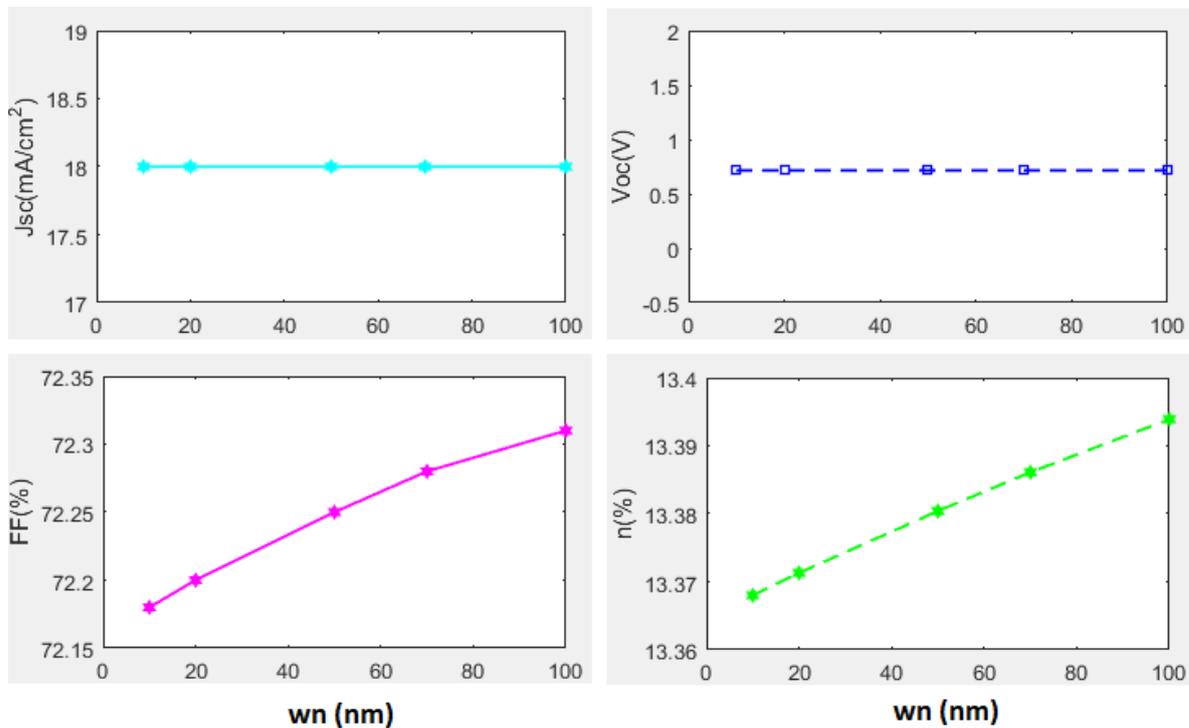


Figure III.11: Performances de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (CdS).

La figure III.11 et le tableau III.5 montrent l'effet de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur les performances des cellules pour $E_{g_{CdS}} = 2,12$ eV, $E_{g_{CIGS}} = 1,15$ eV et $W_p = 3$ nm. L'épaisseur de la couche tampon CdS dans cette simulation était comprise entre 10 et 100 nm. Un grand nombre de photons de courte longueur d'onde sont émis lorsque l'épaisseur de la couche tampon de CdS augmente. Photon de courte longueur d'onde avant d'atteindre la couche

absorbante, celle-ci absorbe une quantité considérable de photons de courte longueur d'onde. Par conséquent, le nombre de photons atteignant la couche absorbante a diminué. En outre, par rapport à la couche absorbante CIGS (électrons), les porteurs minoritaires de la couche tampon CdS (trous) ont une mobilité réduite ce qui entraîne une baisse performances de la cellule solaire que W_n n'a pas d'impact significatif sur les performances de la cellule solaire seulement pour produire le champ électrique généré par la connexion des deux régions ce qui crée la zone de charge d'espace(ZCE).

Nous remarquons d'après la figure III.11 que le courant de court-circuit (J_{SC}) et la tension en circuit ouvert (V_{CO}) restent constantes avec la variation l'épaisseur de la couche tampon. Et pour le facteur de forme (FF) et le rendement (η) on remarque que commencent à croître avec l'épaisseur de la couche tampon où le facteur de forme atteint sa valeur maximale de 72.31 % pour l'épaisseur de la couche tampon de 100 nm et le rendement atteindre sa valeur maximale de 13.3939 % pour l'épaisseur de la couche tampon de 100nm.

III.4. Optimisation par les algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques constituent une approche vigoureuse et flexible qui peut être utile pour un large éventail de problèmes d'optimisation. Ils sont principalement appropriés aux problèmes où les méthodes d'optimisation habituelles deviennent obsolètes. De plus, les algorithmes génétiques fournissent une force particulière et permettent une certaine latitude dans le choix de la solution appropriée. Notre but est d'optimiser le rendement de la cellule solaire CdS/CIGS. La structure générale d'un algorithme génétique est représentée sur le digramme de la Figure III.12. Cette recherche vise à trouver des paramètres optimaux de conception pour la présente cellule solaire. Le cadre d'optimisation basé sur l'approche AG nécessite l'énoncé des fonctions objectives. Par conséquent, l'optimisation du dispositif étudié prendra en compte les critères suivants :

- Maximisation du rendement.

X est un vecteur contenant les paramètres à optimiser.

$$X = (d, N_a, N_d, W_n, W_p).$$

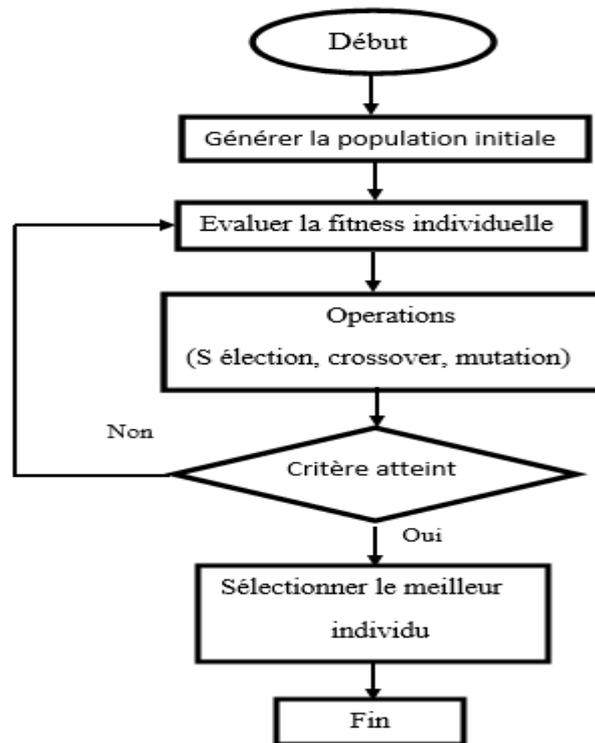


Figure III.12: structure générale d'un algorithme génétique [18].

Pour la mise en œuvre de notre approche méta heuristique basée sur des algorithmes génétiques, les individus sont évalués en utilisant le calcul de la fonction objective. Pour évoluer pendant des générations consécutives, les valeurs utilisées des paramètres pour l'algorithme génétique sont résumées dans tableaux III.6 et le tableau III.7. La meilleure valeur de la fonction de fitness obtenue au cours d'une succession de générations évolutives correspond à la combinaison optimale qui fournit des performances de la cellule solaire.

Paramètres AG	Valeur
La Population	50
La Génération	500
Croisement	0.8
Mutation	dépendant de la contrainte
Type de sélection	Tournoi
Nombre de variables	5

Tableau III.6 : Paramètres AG.

	d	Na	Nd	Wn	Wp
Min	10^{-6}	10^{15}	10^{17}	10×10^{-9}	100×10^{-9}
Max	50×10^{-6}	9×10^{16}	5×10^{19}	200×10^{-9}	3000×10^{-9}

Tableau III.7 : Valeurs des paramètres utilisées dans l'optimisation.

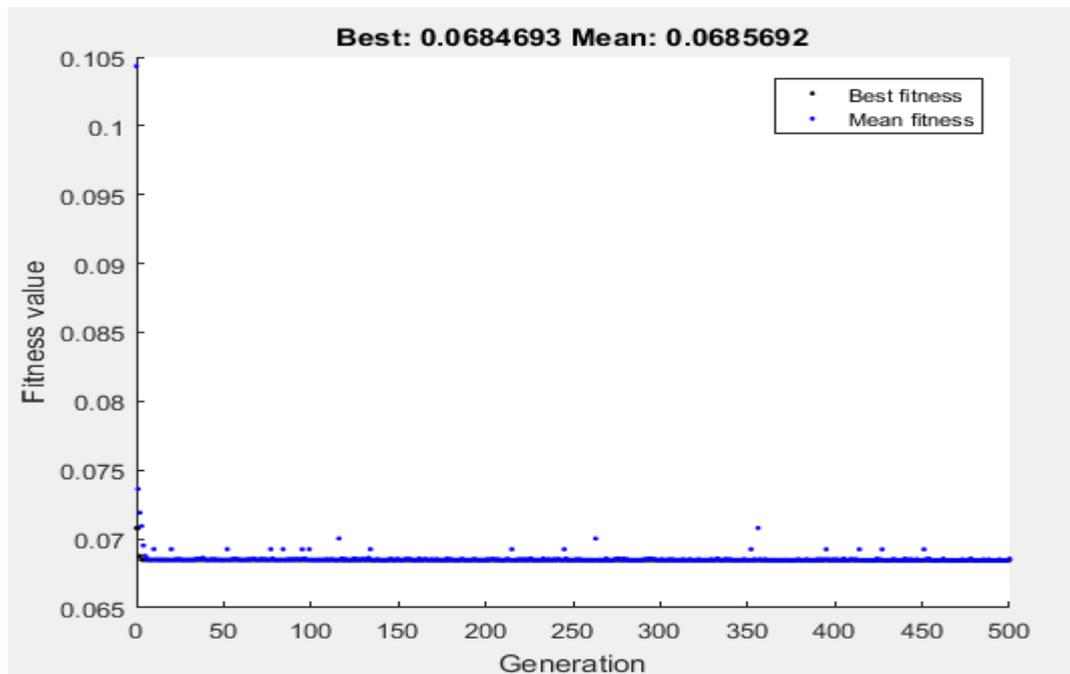


Figure III.13 : Convergence de la fonction valeur de fitness en fonction du nombre de génération (500).

Le rendement optimal obtenu est de 14.6062 (%), la figure III.13 montre la convergence de l'algorithme génétique (meilleure valeur et valeur moyenne).

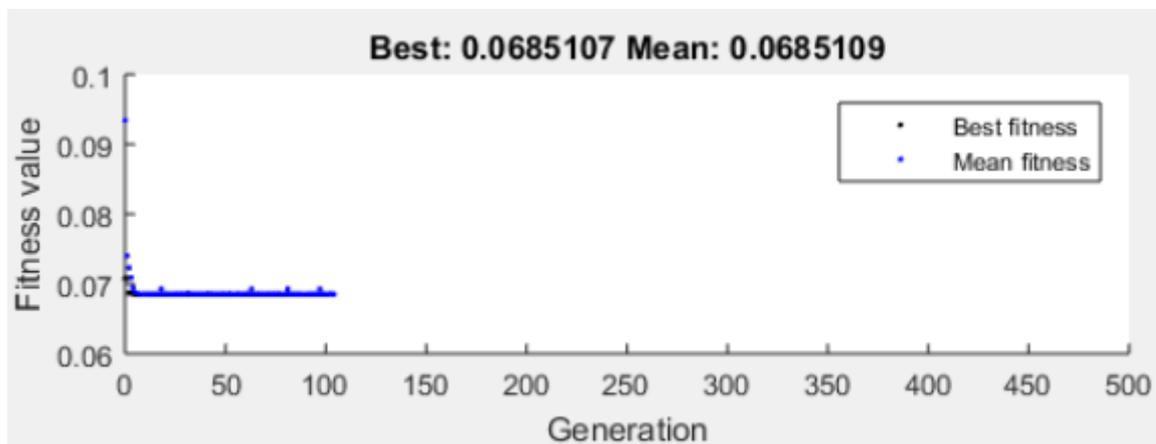


Figure III.14 : Convergence de la fonction valeur de fitness en fonction du nombre de génération (100).

La valeur d'aptitude d'un individu est la valeur de la fonction d'aptitude pour cet individu. Comme le logiciel Toolbox trouve le minimum de la fonction d'aptitude, la meilleure valeur d'aptitude pour une population est la plus petite valeur d'aptitude pour tout individu de la population.

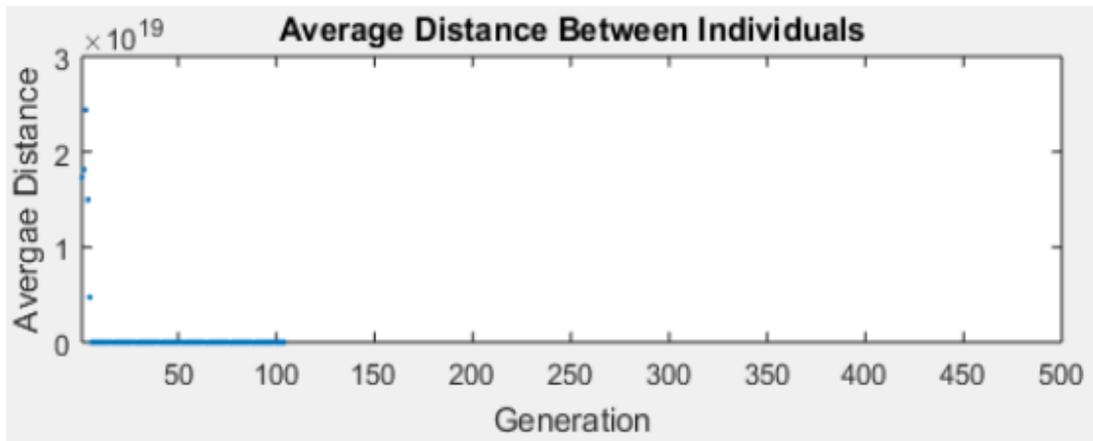


Figure III.15 : Convergence de la fonction distance moyenne en fonction du nombre de génération.

La diversité fait référence à la distance moyenne entre les individus d'une population. Une population présente une diversité élevée si la distance moyenne est grande, sinon elle présente une faible diversité. Dans la figure suivante, la population de gauche présente une forte diversité, tandis que la population de droite présente une faible diversité.

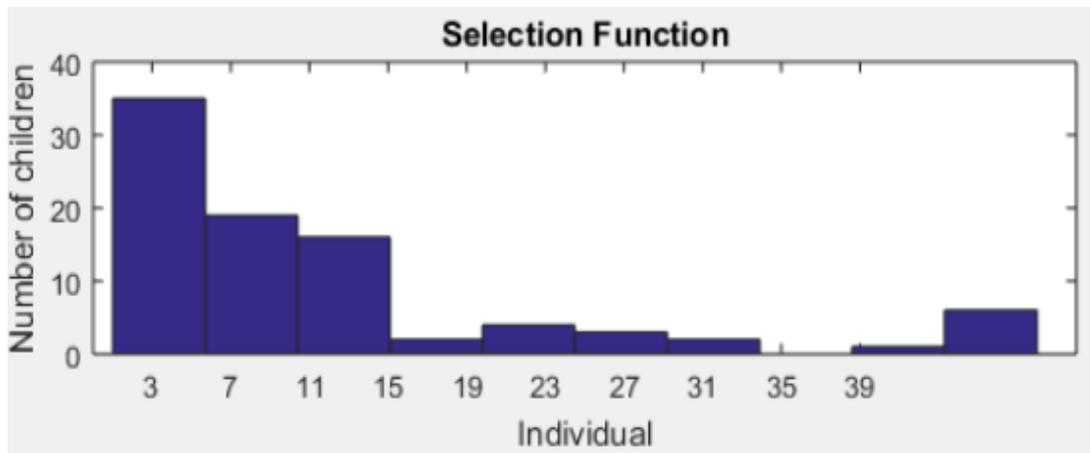


Figure III.16 : Convergence de la fonction nombre d'enfants en fonction du nombre d'individu.

La sélection est l'étape d'un algorithme génétique au cours de laquelle des génomes individuels sont choisis dans une population en vue d'une reproduction ultérieure (à l'aide de l'opérateur de croisement).

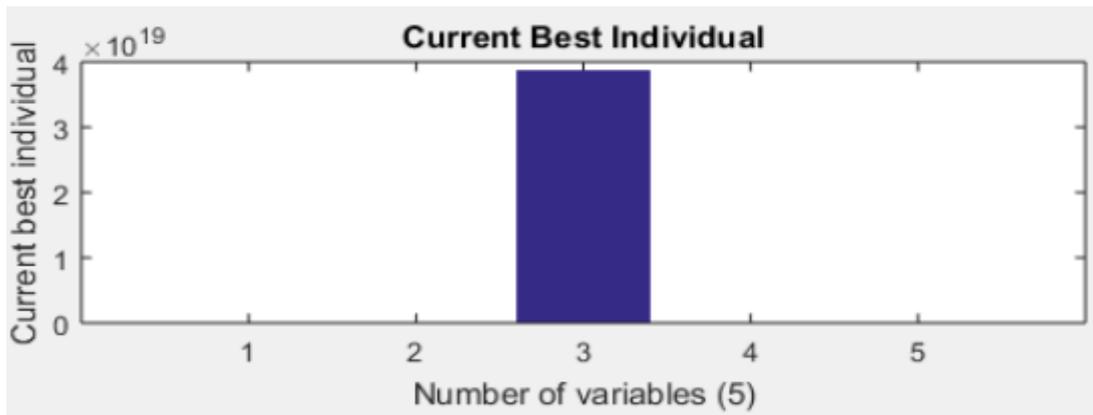


Figure III.17 : Convergence de la fonction meilleure individuelle actuelle en fonction du nombre de variables.

Un individu est un point quelconque auquel vous pouvez appliquer la fonction d'aptitude. La valeur de la fonction d'adéquation pour un individu est son score.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de l'étude analytique des cellules solaires à hétérojonction à base de CdS/CIGS. L'influence des paramètres physiques et géométriques sur les performances de la cellule solaire est étudiée. Les résultats trouvés comme ce suit η (%)=13.3939. Finalement, le model analytique adopté dans cette étude est utilisé comme une fonction objective pour l'approche des algorithmes génétiques pour trouver la meilleure combinaison de la cellule optimale souhaitée. La combinaison optimale de cette optimisation est de ($d=5\mu\text{m}$, $N_A=10^{15}\text{ cm}^{-3}$, $N_D=4*10^{18}\text{ cm}^{-3}$, $W_n=10\text{ nm}$ et $W_p=300\text{ nm}$) qui donne la valeur optimale du rendement égale à η (%)=14.6062.

Conclusion générale

L'objectif ultime de toutes ses recherches est le développement dans le domaine du photovoltaïque qui s'est considérablement développé au cours de ces deux dernières décennies. Le but de ce travail s'est donné pour objectif de simuler et d'optimiser quelques paramètres physiques et géométriques des deux couches formant l'hétérojonction de la structure de la cellule solaire CdS/CIGS. En suivant un modèle mathématique, la simulation est effectuée à l'aide du langage de programmation MATLAB. Nous avons fait une simulation basée sur des paramètres électriques, l'approche d'optimisation mathématique des cellules solaires associées à des modèles physiques pour étudier les performances optimales de différentes structures de cellules solaires à base d'une jonction pn. Les paramètres qui ont subi l'opération d'optimisation sont l'épaisseur d , le dopage N_A , le dopage N_D , W_n et W_p .

Le premier chapitre présente un historique sur le rayonnement solaire et son domaine d'application photovoltaïque puis les matériaux semi-conducteur après le fonctionnement de la jonction pn et en termine cette partie par les caractéristiques des cellules solaires (J_{sc} , V_{oc} , FF et η).

Dans le deuxième chapitre on a étudié le modèle analytique de cette cellule solaire qui nous a permis de savoir le comportement et la caractéristique d'une cellule solaire quelconque, on a commencé par le développement mathématique des propriétés optiques de la cellule solaire et on finalise par une optimisation des caractéristiques physiques et géométriques des résultats obtenus de l'analytique.

Le chapitre trois inclut la présentation et l'interprétation des résultats de notre étude, on a fait une optimisation mono-objective de l'algorithme génétique pour avoir la bonne combinaison de cette cellule de ce manuscrit.

Bibliographie

- [1] : BOUZEGANE Mhenna, GAOUAOUI Ferhat, «Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque », Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, Année universitaire : 26 septembre 2018.
- [2] : Mr Bencherif Hichem , « Etude et modélisation analytique d'une cellule solaire à base de Si-Ge », Université Hadj lakhdar Batna.
- [3] : **Antonio Luque** : (Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, Spain) **and Steven Hegedus** : (Institute of Energy Conversion, University of Delaware, USA) « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », 2003.
- [4] : Malm, « Modelling and Degradation Characteristics of Thin-film CIGS Solar Cells », 2008.
- [5] : AZIZI Rabiâa, « Etude d'une cellule solaire par le simulateur SCAPs », Université Ahmed Daria - Adrar, Année Universitaire : 2019/2020.
- [6] : Mekemeche Abdelkader, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, Soutenu Le :04/07/2017.
- [7] : Yacine Khoulane, « Étude et mise au point d'une technique d'élaboration du composé CuInGaSe₂ pour le déposer en couche absorbante dans la fabrication des cellules solaires», UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, Juin 2008.
- [8] : Abdoulwahab Adaine. « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci] », Université de Lorraine, 2018.
- [9] : BENMIR Abdelkader, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque en couche mince à hétérojonction : CdS/CIGS et CdS/CZTS », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Soutenu Le : 27 / 04 / 2017.

- [10] : YUCEF Fadila, « Rôle et influence des effets résistives et d'ombrage et, leur amélioration dans le rendement des cellules solaires », Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, Soutenu Le : 31/05/2016.
- [11] : LAGHOUAG Ahlam, BENCHEIKH Halima, « Etude et simulation d'une cellule solaire à base des éléments chalcogènes », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, Année universitaire : 2018/2019.
- [12] : Nichiporuk Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques contacts arrières interdigités », Pour obtenir Le grade de docteur, présentée devant l'institut des sciences appliquées de Lyon, soutenue le 3 mai 2005.
- [13] : REYNAUD Jean-François, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques », UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER, Soutenu Le : 4 Janvier 2011.
- [14] : Kahl Counts.THESIS , « COMPARATIVE ANALYSIS OF Cu(InGa) Se₂ SOLAR CELLS », Department of Physics In partial fulfillment of the requirements For the Degree of Master of Science Colorado State University), Spring 2016.
- [15] : Alexei O. Pudov, « IMPACT OF SECONDARY BARRIERS ON CuIn_{1-x}GaxSe₂ SOLAR-CELL », Spring 2005.
- [16] : Charles Roger, « Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques », Université de Grenoble, 2013.
- [17] : A. Benmira, M. S. Aidab, «Analytical modeling and simulation of CIGS solar cells», Université Kasdi Merbah Ouargla, Université Mentouri Constantin, 07.07.2013.article
- [18] : YOUSFI Abderrahim, « Contribution à l'étude et la modélisation d'un transistor fortement submicronique », Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, Soutenu Le : Juin 2018.