

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Thème :

**Amélioration de l'efficacité d'une cellule solaire CIGS par l'ajoute d'une
nouvelle couche de surface arrière : une approche de simulation
numérique par SCAPS-1D**

Préparé par :

- HADJ ALI Moussa
- BANOUNE Fatah

Dirigé par :

M. LAHRECHE Abderrezak
Mme. IDJDARENE Souad

Examiné par :

M. SADJI Mustapha
Mme. OUALI Kahina

Année universitaire : 2024/2025

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien sans faille.

À ma sœur Sabrina, pour sa tendresse, sa patience et sa confiance en moi. Je tiens également à dédier ce travail à mon binôme HADJALI Moussa, mon bras droit, avec qui j'ai partagé chaque étape de ce parcours. Tu ne m'as jamais laissé seul, toujours prêt à aider, à collaborer, à soutenir. Tu as été un véritable frère de route, et je te considère aujourd'hui comme un membre à part entière de ma famille. Merci pour ta loyauté, ta patience et ton sérieux.

À mes camarades de classe du Master 01, promotion 2021/2022, pour leur solidarité, leur esprit d'équipe et tous les moments partagés.

À mes amis, pour leur soutien indéfectible et leur présence précieuse. Un remerciement tout particulier à : Hocine Oulaid, Soltana Abdelkrim, Ahouari Mohand, Chikhounne Mohamed Taher, Boutellaa Abdenour, Kaci Mellisa, Yahaoui Salim, Hachemaoui Hamza, Bendjaouadi Fadila, et Boudjamline Milinda,

Je remercie aussi tous mes enseignants pour leurs efforts, leurs conseils et leurs partages de connaissances.

Enfin, un grand merci à mes amis et à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce projet. Que Dieu vous bénisse tous.

BANOUNE FATAH

Dédicace

Ce mémoire représente bien plus qu'un simple travail académique. Il constitue le résultat de plusieurs années d'efforts, de doutes, de remises en question, mais également de découvertes, de rencontres et croissance personnel. Je le dédie avant tout à mes parents, qui sont les fondations de ma vie, pour leur amour inconditionnel, leur patience sans limite et leurs sacrifices discrets. Sans leur soutien, rien de tout cela n'aurait été réalisable. Leur force et leur confiance en moi m'ont soutenu durant les périodes les plus incertaines. À mes frères, pour leur chaleur, leur bienveillance et leur soutien moral à chaque étape de ce parcours. Merci d'avoir été présents, que se soit dans les moments de stress ou dans les petites joies du quotidien.

À mes amis les plus proches, compagnons de l'université, je vous remercie pour votre amitié, vos conseils.

Je tiens à remercier mes enseignants et encadrants pour la richesse de leur enseignement et leur rigueur intellectuelle. Leur altruisme, ainsi que leur enthousiasme et leur sérieux, ils ont influencé ma curiosité et affûté mon esprit critique.

En conclusion, je désire exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont croisé mon chemin et m'ont offert leur soutien, leur écoute ou simplement leur confiance. Même de manière discrète, votre impact a laissé une empreinte durable..

HADJALI Moussa

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos encadrants universitaires, Monsieur LAHRECHE Abderrezak et Madame IDJEDARENE Souad, pour leur accompagnement tout au long de ce mémoire. Leurs conseils, leur disponibilité et leur soutien nous ont été d'une grande aide.

Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour l'intérêt qu'ils lui ont accordé.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos familles et nos amis, pour leur encouragement et leur soutien moral durant toutes les étapes de ce projet.

Table des matières

Liste des Figures	vi
-------------------	----

Liste des tableau	vii
-------------------	-----

I Généralités sur les sources de l'énergie photovoltaïque	4
I.1 Introduction	5
I.2 Généralités sur les sources de l'énergie photovoltaïque	5
I.2.1 Le spectre solaire	6
I.2.2 Air masse	7
I.3 jonction PN	8
I.4 Effet photovoltaïque	10
I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque . . .	11
I.5.1 Absorption des photons	11
I.5.2 Création de paires électron/trous	12
I.5.3 collecte de charge	12
I.6 la structure d'une cellule photovoltaïque	12
I.6.1 texturation de la surface	12
I.6.2 couche antireflet	12
I.6.3 la couche BSF	13
I.6.4 les contact face avant et arrière	13
I.7 Schéma électrique équivalent et la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	14
I.8 Les paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire	16
I.8.1 Courant de court-circuit, I_{cc}	16
I.8.2 Tension a circuit ouvert, V_{oc}	17
I.8.3 Facteur de forme FF	18
I.8.4 Puissance maximale	18
I.8.5 Rendement de conversion	18
I.8.6 Réponse spectrale d'une cellule solaire	19

I.8.7	Rendement quantique externe et interne	20
I.8.7.1	Rendement quantique externe	20
I.8.7.2	Rendement quantique interne	20
I.9	Les différents types de pertes dans une cellule solaire	21
I.9.1	Pertes extrinsèques	22
I.9.2	Pertes intrinsèques	22
I.9.3	Résistance série	22
I.9.4	Résistance shunt	22
I.9.5	Recombinaison	23
I.9.5.1	Recombinaison radiative	23
I.9.5.2	Recombinaison indirecte	23
I.9.5.3	Recombinaison Auger	23
I.10	Différentes générations des cellules photovoltaïques	23
I.10.1	cellules de première génération	23
I.10.2	cellules de deuxième génération	24
I.10.3	cellules de troisième génération	24
I.11	Conclusion	24
II	Les cellule solaire à base de CIGS	25
II.1	Introduction	26
II.2	Structures d'une cellule CIGS	26
II.2.1	substrats	26
II.2.2	le contact arrière :	27
II.2.3	L'absorbeur :	27
II.2.4	La couche tampon :	27
II.2.5	La couche fenêtre :	27
II.2.6	La grille :	28
II.3	Structure cristalline	28
II.3.1	Architecture des cellule CIGS :	28
II.3.2	Structure du matériau CIGS	29
II.3.3	Dopage : influence des imperfections intrinsèques	31
II.3.4	propriétés optiques	31
II.4	Avantages et inconvénient [40]	32
II.4.1	Les avantages :	32
II.4.2	Les inconvénients :	32
II.5	conclusion :	33
III	Simulation et résultats	34
III.1	Introduction	35

III.2 Logiciels de simulation SCAPS :	35
III.2.1 Présentation SCAPS :	35
III.3 Utilisations du logiciel :	36
III.3.1 Action panel :	36
III.3.2 Définition panel (définition du problème)	36
III.3.3 Fenêtre des résultats	43
III.4 Protocole de simulation	44
III.5 présentations de la simulation	44
III.6 Les paramètres du dispositif étudié	45
III.7 Résultat de la simulation	45
III.7.1 l'effet de l'épaisseur et du dopage de la couche CIGS sans BSF	45
III.7.2 l'effet de l'épaisseur et du dopage de la couche CIGS avec BSF	48
III.7.3 l'effet de l'épaisseur et du dopage de la couche arriere BSF (Sb_2S_3)	51
III.7.4 l'impact des défauts d'interface sur la cellule solaire . .	53
III.7.5 l'impact des défauts de volume de la couche CIGS sur la cellule solaire	56
Conclusion Générale	60
Bibliographie	62

Table des figures

I.1	puissance du rayonnement solaire dans l'espace [2].	6
I.2	Différentes incidences du solaire sur la terre. [4]	8
I.3	dopage N et P [6].	9
I.4	variation des concentrations de porteurs et du potentiel élec- trostatique à travers une jonction PN non polarisée. [7].	9
I.5	au cœur de la cellule solaire [6].	10
I.6	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8].	11
I.7	Structure d'une cellule solaire [12].	14
I.8	Schéma électrique d'une cellule solaire idéale [12].	14
I.9	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [13]. .	16
I.10	caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [8].	16
I.11	Variation spectrale du rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque. On distingue ensuite différents types de rendement quantique [20].	20
I.12	Différents types de pertes électriques et optiques existant dans une cellule solaire.[22].	21
II.1	Structure standard d'une cellule à base de CIGS.[30]	26
II.2	Structure d'une cellule solaire à base de CIGS.[34]	29
II.3	Comparaison des mailles élémentaires des structures cris- tallines du Si, CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite [37].	30
III.1	définition du problème.	37
III.2	Fenêtre d'exécution, de conception du dispositif et des ré- sultats du logiciel.	37
III.3	bloc working point.	38
III.4	Bloc illumination.	39

III.5	Résistance série et parallèle.	39
III.6	bloc d'action.	40
III.7	Fenêtre de définition, définition panel.	41
III.8	Propriétés de la couche ajoutée.	42
III.9	Propriétés de la couche ajoutée.	43
III.10	Schéma simplifié d'une cellule utilisée ayant la structure (TCO / SnO_2 / CIGS / Sb_2S_3).	44
III.11	Effet de la variation de l'épaisseur et du dopage de la couche CIGS sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.. . . .	46
III.12	Effet de la variation de l'épaisseur et du dopage de la couche CIGS sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule avec BSF.	49
III.13	Variation des paramètres électrique (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cel- lule en fonction de variation de l'épaisseur et du dopage de la couche BSF	51
III.14	illustre la Variation des paramètres électrique (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) en fonction de la densité des défauts aux interfaces CIGS / Sb_2S_3 et CIGS / SnO_2	54
III.15	Effet de variation de la concentration des défauts de volume de la couche CIGS sur les paramètres électrique (J_{SC}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	57

Liste des tableaux

III.1 Les paramètres des différents matériaux utilisés pour la simulation [43]	45
III.2 Les valeurs des principaux paramètres électrique de la cellule optimisée sans BSF	48
III.3 Les valeurs des principaux paramètres électrique de la cellule optimisée avec BSF	53

Liste des acronymes

SRH	<i>Shockley-Read-Hall</i>
SLG	<i>Soda Lime Glass</i>
ZCE	<i>Zone de charge d'espace</i>
CIS	<i>Cuivre Indium Sélénium</i>
CIGS	<i>Cuivre Indium Gallium Sélénium</i>
SCAPS-1D	<i>A One-Dimensional Solar Cell Capacitance Simulation Program</i>
Sb_2S_3	<i>Tri-sulfure d'antimoine</i>
SnO_2	<i>l'oxyde d'étain</i>
TCO	<i>Oxyde Conducteur Transparent</i>
CdTe	<i>Tellurure de Cadmium</i>
PV	<i>Photovoltaïque</i>
IR	<i>Infrarouge</i>
UV	<i>Ultraviolet</i>

Liste des grandeurs physiques utilisées

- L_n, L_p : Longueurs de diffusion des électrons (L_n) et des trous (L_p).
- N_A, N_D : Concentrations de dopage dans les régions p (accepteurs) et n (donneurs).
- J_{obs} : Densité de courant sous obscurité.
- J_{ph} : Courant photonique.
- J_{SC} : Densité de courant de court-circuit.
- $F(\lambda)$: Densité du flux lumineux incident par unité de surface et par unité de temps.
- $R(\lambda)$: Coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde.
- RQI : Rendement quantique interne (*Internal Quantum Efficiency*).
- RQE : Rendement quantique externe (*Internal Quantum Efficiency*).
- V_{OC} : Tension en circuit ouvert (*Open Circuit Voltage*).
- FF : Facteur de forme (*Fill Factor*).
- P_{max} : Puissance maximale délivrée par la cellule.
- V_{max} : Tension correspondant au point de puissance maximale.
- I_{max} : Densité de courant au point de puissance maximale.
- P_{in} : Puissance incidente du rayonnement lumineux.
- QE : Rendement quantique global (*Quantum Efficiency*).
- E_{ph} : Énergie du photon incident.
- E_g : Énergie de gap (bande interdite).
- E_F : Niveau d'énergie de Fermi.
- N_t : Concentration des défauts ou pièges.
- σ_n : la durée de vie de l'électron (trous).
- V_{th} : Vitesse thermique.
- E_I : Niveau de Fermi intrinsèque.
- t_c : Température absolue exprimée en Kelvin.
- $V_n(p)$: La vitesse thermique de l'électron
- $L_n(p)$: La longueur de diffusion des porteurs.
- $T(\lambda)$: Fraction du rayonnement transmis à travers la cellule.
- μ : La mobilité électrique.

- c : La vitesse de la lumière.
- I_s : Courant de saturation inverse de la jonction p-n.
- q : Charge de la particule.
- R_{sh} : Résistance Shunt.
- R_s : Résistance série.
- R_{sint} : La réponse spectrale interne.
- λ : La longueur d'onde.
- η : Rendement de conversion.
- $A(\lambda)$: Coefficient d'absorption.
- I_{cc} : Courant de court-circuit.

Introduction Générale

Depuis plusieurs années, la température moyenne de notre planète ne cesse d'augmenter mettent en danger la venir de l'être humain et des écosystèmes. Les preuves montrent que ce réchauffement climatique est surtout causé par la croissance de la population mondiale et par l'augmentation de la demande en énergie des pays émergents et en développement. Les énergies fossiles, comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel, représentent la majorité des ressources énergétiques que nous utilisons aujourd'hui. Environ 70 % du besoin mondial de l'énergie est obtenue à partir de ces ressources ce qui a conduit à une nette augmentation des émissions à effet de serre tel que CO₂ et un épuisement rapide de ces recoures.

Dans l'objectif de limiter l'impact de la croissance de la demande énergétique sur les émissions de carbone, les énergies renouvelables suscitent un intérêt croissant, en particulier dans le secteur de la production d'électricité. Elles incluent principalement l'énergie solaire, l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, la géothermie, etc.

L'énergie solaire photovoltaïque, avec sa source inépuisable, constitue la voie la plus prometteuse pour produire d'une énergie électrique propre et durable. Son principe repose sur la conversion directe du rayonnement solaire en électricité, grâce à l'utilisation d'un composant électronique appelé cellule solaire photovoltaïque, fondé sur une jonction p-n. Ce composant capte l'énergie lumineuse incidente et la convertit en courant électrique continue.

Les cellules solaires à couche mince à base de Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium (CIGS) constituent l'une des technologies photovoltaïques les plus prometteuses, grâce à leur rendement de conversion élevé (dépassant les 23 %), leur flexibilité mécanique et leurs coûts de fabrication relativement faibles. Ces performances remarquables s'expliquent en grande partie par les propriétés électriques et optiques particulièrement intéressantes du CIGS. Cependant, malgré ces atouts, les performances électriques réelles de ces dispositifs demeurent limitées par plusieurs phénomènes de perte, notamment la recombinaison des porteurs de charge au sein du volume des différentes couches constitutives de la cellule et à leurs interfaces. À cela s'ajoute une collecte parfois incomplète des porteurs générés, ce qui freine l'atteinte du rendement optimal théorique.

L'interface entre la couche absorbante (la couche CIGS) et le contact arrière constitue une zone critique. Elle est souvent associée à divers mécanismes de recombinaison des porteurs de charge. À ce niveau, des recombinaisons importantes peuvent survenir, accompagnées de barrières énergétiques défavorables et de défauts d'interface susceptibles de compromettre l'efficacité de conversion d'énergie de la cellule. L'une des stratégies prometteuses pour atténuer ces limitations et améliorer la structure interne de la cellule est l'introduction d'une couche arrière, appelée back surface field layer (BSF).

Au cours des dernières années, les chercheurs se sont de plus en plus orientés vers la simulation en tant qu'outil d'optimisation et de prédiction du comportement électrique des cellules solaires. Ceci est due au coût élevé de l'expérimentation (méthodes d'élaboration et techniques de fabrication). L'utilisation de simulateurs spécialisés permet ainsi d'analyser en détail les mécanismes physiques sous-jacents, d'identifier les sources de pertes et de guider efficacement l'optimisation des performances des cellules solaires.

Dans cette étude, une simulation d'une cellule solaire à base de CIGS est menée à l'aide du logiciel de simulation SCAPS-1D, pour but d'examiner :

- L'influence de l'épaisseur et de la concentration de dopage de la couche CIGS sur les performances électriques de la cellule, notamment sur le courant de court-circuit J_{sc} , le rendement η , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le facteur de forme FF ;
- L'impact de l'introduction d'une couche (BSF) sur les performances globales de la cellule ;
- Enfin, l'effet de la présence de défauts, tant en volume qu'aux interfaces, sur le rendement de conversion.

Cette étude est structurée en trois chapitres

- Le premier chapitre est consacré à la présentation générale de l'énergie photovoltaïque. Il expose le principe fondamental de fonctionnement d'une cellule solaire, décrit ses principaux paramètres électriques, ainsi que son schéma électrique équivalent. Par ailleurs, une attention particulière est portée à la réponse spectrale de la cellule, ainsi qu'aux différentes sources de pertes des porteurs de charge susceptibles d'affecter son rendement global.
- Le deuxième chapitre est dédié à la présentation de la cellule à base de Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) et les propriétés structurales et optoélectroniques de ces matériaux.
- Le troisième chapitre s'ouvre sur la présentation du principe de fonctionnement du logiciel de simulation SCAPS-1D, outil utilisé dans le cadre de cette étude. Il se poursuit par l'analyse des résultats de simulation obtenus pour des cellules solaires à base de CIGS, en présence ou non d'une couche BSF (Back Surface Field). Dans un premier temps, l'étude est menée sur l'influence de l'épaisseur et du niveau de dopage de la couche absorbante CIGS sur les performances de la cellule, dans le but d'identifier une configuration optimale. Cette étape a permis de définir une structure de référence performante, servant de base à l'investigation suivante, qui porte sur l'impact de la présence de défauts aussi bien en volumes qu'aux interfaces sur les performances de la cellule.
- En fin, une conclusion générale est exposée afin de clôturer le manuscrit.

Généralités sur les sources de l'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction

Ce chapitre est dédié aux généralités sur l'énergie solaire. Nous explorons brièvement le domaine de la conversion photovoltaïque. Nous mettons en avant les généralités sur les sources de l'énergie photovoltaïque en l'occurrence le spectre solaire et l'air mass. Nous exposons le principe de fonctionnement de la diode et de la cellule solaire. Nous donnons la définition des principaux paramètres électriques à savoir, le courant de court-circuit, la tension à circuit ouvert, le facteur de forme et en fin le rendement de conversion. On expose les principales sources de pertes qui influent le rendement de conversion d'une cellule et les différents mécanismes de recombinaison et on finit par donner les différentes générations de la cellule photovoltaïques.

I.2 Généralités sur les sources de l'énergie photovoltaïque

La conversion directe de la lumière du soleil en électricité, appelée conversion photovoltaïque (PV), repose sur un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. Comme les autres énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque s'est développée dans le but de protéger notre environnement, de limiter les effets du changement climatique, et de proposer une source d'énergie propre, fiable et durable. Concrètement, cette conversion se fait grâce à un petit composant électronique : la cellule solaire. Ce composant, fait de matériaux semi-conducteurs, transforme la lumière en électricité. Chaque cellule génère une certaine quantité d'énergie, définie par une tension et un courant de sortie. Mais pour alimenter nos appareils du quotidien qu'il s'agisse d'une lampe, d'un téléphone ou même d'une maison entière, une seule cellule ne suffit pas. On assemble donc plusieurs cellules entre elles, en série ou en parallèle, pour former ce qu'on appelle un module photovoltaïque, ou plus simplement, un panneau solaire [1].

I.2.1 Le spectre solaire

Le Soleil émet en permanence une quantité considérable d'énergie rayonnante à travers le système solaire. Ce rayonnement, composé d'ondes électromagnétiques, se propageant dans le vide à la vitesse constante de $c = 3 \times 10^8$ m/s. Ce rayonnement couvre une large gamme de longueurs d'onde, organisée en spectre continu dont l'intensité suit approximativement la loi de Planck pour un corps noir à $T \approx 5778$ K et présente un maximum aux alentours de 500 nm, dans le domaine du visible (figure I.1). Toutefois, le spectre solaire présente des raies d'absorption discrètes, dues à l'interaction des photons avec les éléments chimiques (hydrogène, calcium, fer, etc.) présents dans l'atmosphère solaire. L'énergie E transportée par un photon est quantifiée par la relation fondamentale :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

où h est la constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js), ν la fréquence, λ la longueur d'onde, et c la vitesse de la lumière.

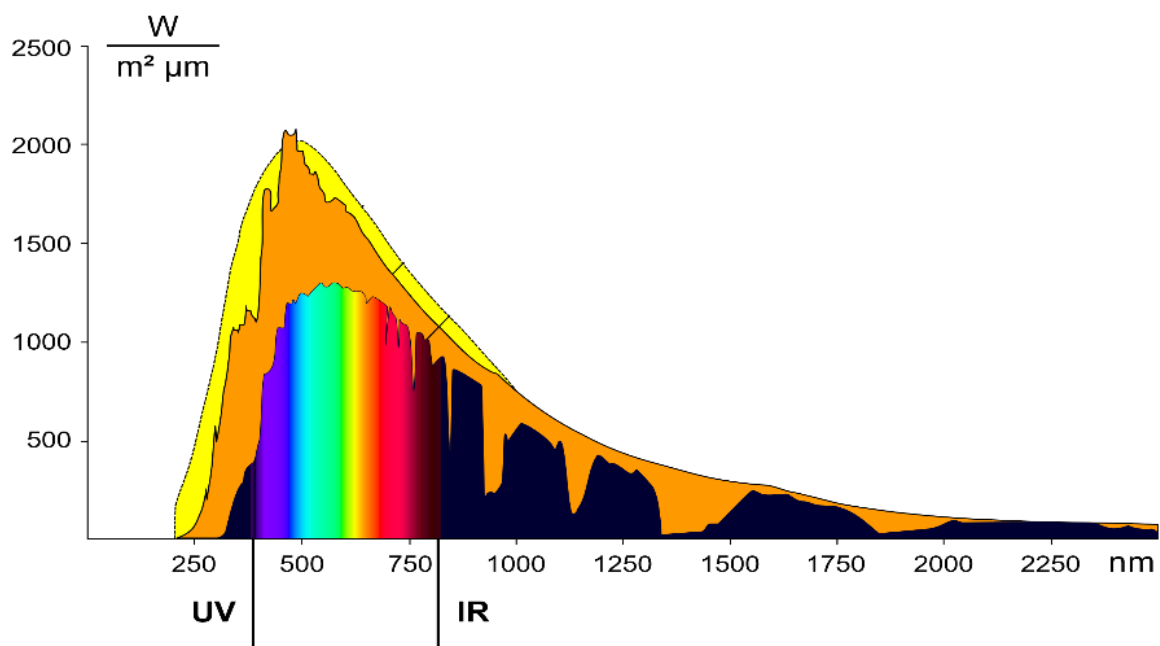


FIGURE I.1 – puissance du rayonnement solaire dans l'espace [2].

Le spectre solaire extraterrestre, standardisé sous le nom d'AM0 (Air Mass 0), représente la distribution spectrale mesurée hors atmosphère terrestre, principalement à partir de données satellitaires. Il se répartit en trois domaines majeurs :

- Ultraviolet (UV) : $0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$, environ 6,4 % de l'énergie totale.
- Visible : $0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$, soit 48 % de l'énergie. Cette région correspond à la sensibilité maximale de l'œil humain et joue un rôle clé dans la photosynthèse végétale.
- Infrarouge (IR) : $0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$, environ 45,6 %. Le proche IR ($0,78 - 3 \mu\text{m}$) contribue au réchauffement des surfaces terrestres, tandis que le moyen IR ($> 3 \mu\text{m}$) est absorbé par les gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , vapeur d'eau). Cette répartition énergétique souligne l'importance du domaine visible et IR pour les applications terrestres, comme le photovoltaïque ou le chauffage solaire.[3]

I.2.2 Air masse

Avant d'atteindre la surface terrestre, le rayonnement solaire doit traverser l'épaisseur de l'atmosphère. Pour quantifier cette atténuation, la notion de « masse d'air » (Air Mass, AM) a été introduite. Elle désigne la distance parcourue par la lumière à travers l'atmosphère, ajustée au trajet le plus court possible, comme lorsque le soleil est juste au-dessus de nous. La masse d'air est calculée à partir de l'angle par rapport à la verticale, appelé angle zénithal.

$$Airmass = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (\text{I.2})$$

Lorsque le soleil est directement au-dessus de nous, la valeur de la masse d'air est de 1. [4] En l'absence d'atmosphère, on parle du spectre AM0, caractérisé par une irradiance de 1367 W/m^2 au sommet de l'atmosphère. Au niveau de l'équateur, le Soleil étant à son zénith, le rayonnement parcourt une masse d'air unité, d'où le spectre AM1. Lorsque le Soleil se trouve à 60° de l'horizon, l'épaisseur traversée double, ce qui définit le spectre AM2. La nomenclature AM1.5 correspond à un angle solaire de $41,8^\circ$, soit 1,5 fois l'épaisseur atmosphérique standard ; dans ces conditions, l'irradiance réelle est d'environ 827 W/m^2 . Un facteur de normalisation est alors appliqué pour ramener cette valeur à 1000 W/m^2 , facilitant ainsi la comparaison des performances des dispositifs photovoltaïques.[1]

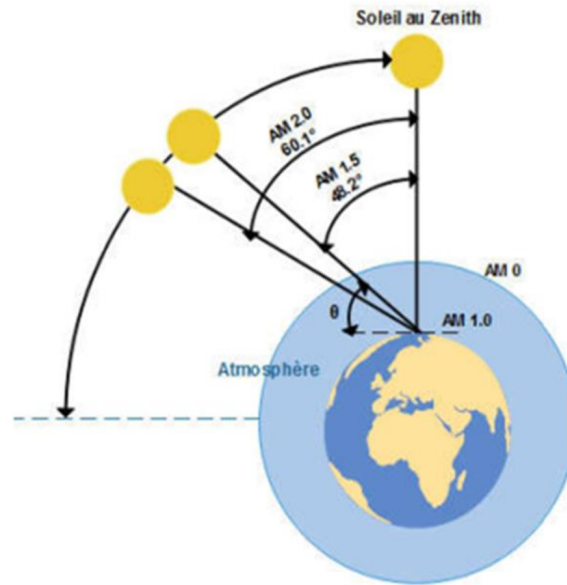


FIGURE I.2 – Différentes incidences du solaire sur la terre. [4]

I.3 jonction PN

Lorsque l'on juxtapose deux semiconducteurs, l'un de type N (riche en électrons) et l'autre de type P (riche en trous), une magie physique se produit à leur interface : la formation de la jonction p-n. Dès que les deux semiconducteurs sont mis en contact, les électrons du côté N qui sont majoritaires se migrent du côté P où ils sont minoritaires, tandis que les trous qui sont porteurs majoritaires du côté P migrent vers le semiconducteur de type N. Ce phénomène de transport des porteurs de charge s'appelle diffusion. En chemin, ces porteurs se rencontrent et se recombinent, laissant derrière eux des ions fixes immobiles. C'est ainsi que naît la zone de déplétion (zone de charge d'espace), une zone entre les deux semiconducteurs dépourvue de charges libres. Au cœur de cette zone, un déséquilibre dans la neutralité des charges s'installe. Du côté N, les ions positifs fixes ND^+ se retrouvent en sur-nombre, tandis que du côté P, ce sont les ions négatifs NA^- qui prédominent. Cette séparation de charges génère un champ électrique interne qui freine toute nouvelle migration d'électrons ou de trous. Ce champ va provoquer l'alignement du niveau de Fermi, qui reflète l'équilibre énergétique, ce qui entraîne une courbure des bandes de valence et de conduction. Le résultat : une barrière de potentiel, V_a , se dresse comme un portail que les porteurs doivent franchir pour passer d'une région à l'autre[5].

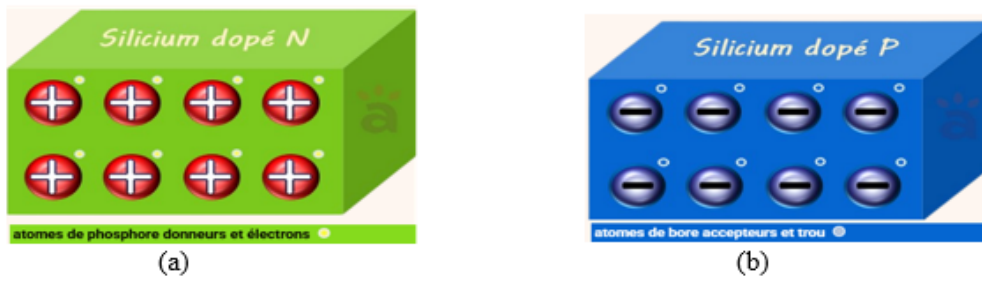


FIGURE I.3 – dopage N et P [6].

La taille de la ZCE, ainsi que l'intensité du champ électrique et de la barrière de potentiel, dépendent de la concentration en dopants (N_A et N_D). Plus les régions P et N sont fortement dopées, plus la zone de déplétion est étroite, mais le champ électrique est plus intense. Un exemple de la Junction PN est illustré sur La Figure I.3.

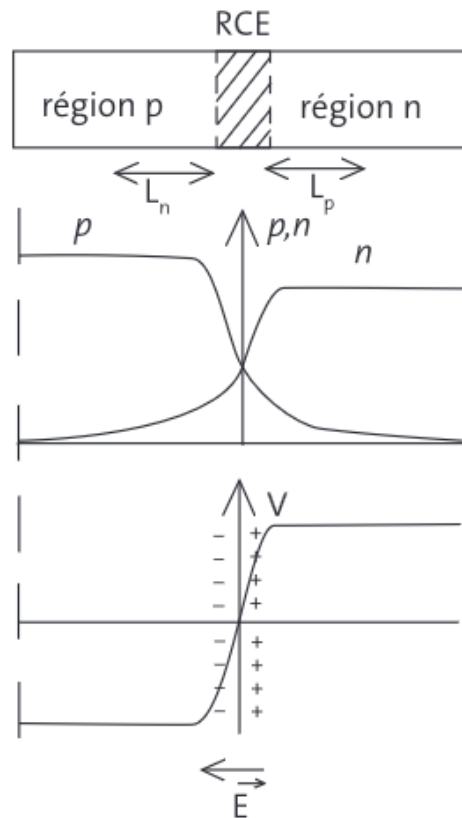


FIGURE I.4 – variation des concentrations de porteurs et du potentiel électrostatique à travers une jonction PN non polarisée. [7].

I.4 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semiconducteur qui génère alors une tension électrique. L'absorption des photons par le semiconducteur résulte de la création d'électrons ou de trous (des défauts d'électrons) mobiles. Cette création entraîne une séparation des charges de signes opposés, générant ainsi une photo-tension qui peut produire un photo-courant, fournissant ainsi une énergie électrique à un circuit extérieur. Une cellule solaire peut réaliser cette conversion d'énergie.

L'effet photovoltaïque qui se produit dans une diode à jonction PN, lorsqu'elle est exposée à des photons dont l'énergie $h\nu$ dépasse la largeur de bande interdite (ou gap) E_g . Ces photons, ayant une énergie $h\nu$ supérieure à E_g , engendrent des électrons de conduction et des trous en rompant des liaisons de valence.[7]

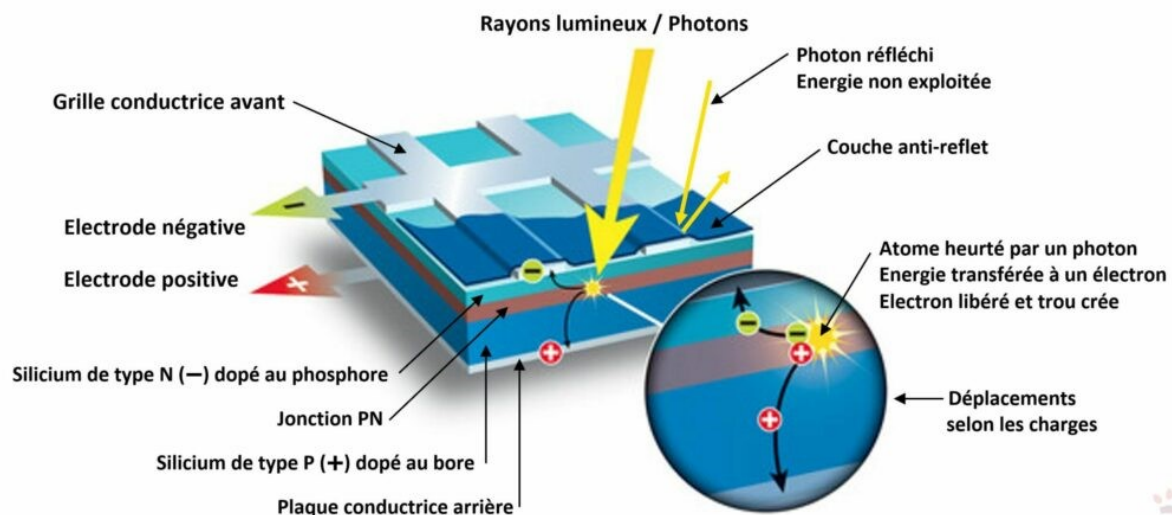


FIGURE I.5 – au cœur de la cellule solaire [6].

I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur les trois étapes qui sont l'absorption des photons, la génération des paires électron-trous et en fin la séparation et la collecte des charges comme le montre la figure ci dessous :

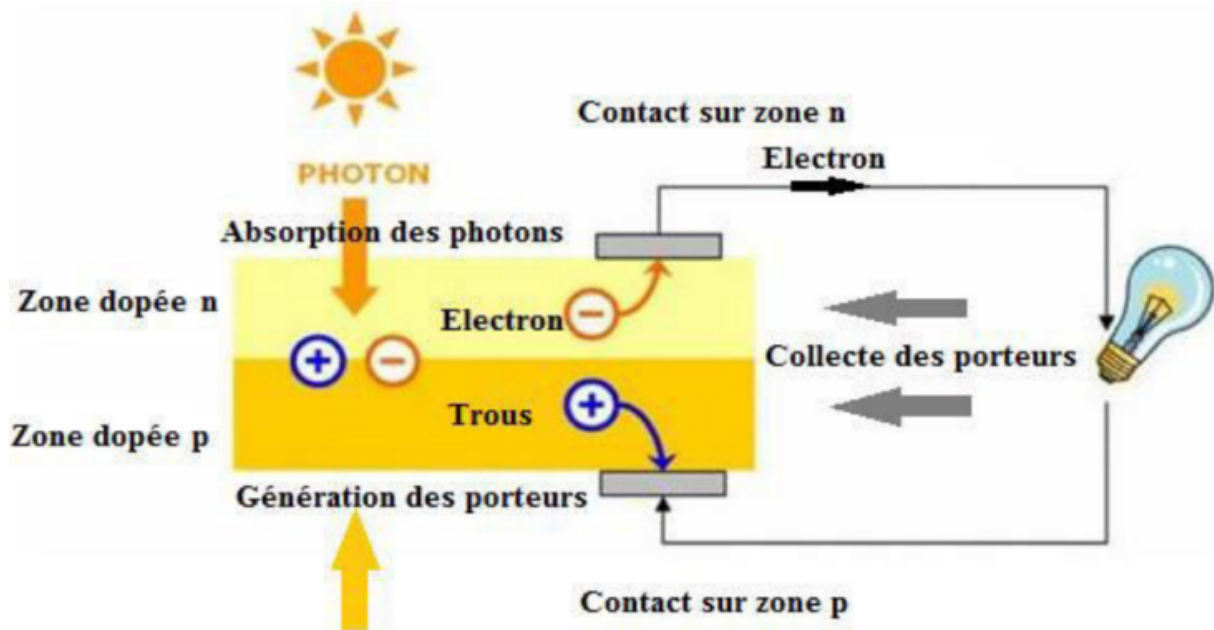


FIGURE I.6 – Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8].

I.5.1 Absorption des photons

Le phénomène d'absorption est une étape clé dans la conversion de l'énergie lumineuse en électricité. Il représente la capacité d'un matériau semi-conducteur à interagir avec les photons incidentes. Il est directement lié à la structure électronique du semi-conducteur. Plus précisément, l'absorption est déterminée par la valeur du gap énergétique (ou bande interdite), qui correspond à l'écart entre le maximum de la bande de valence, entièrement occupée par les électrons, et le minimum de la bande de conduction, initialement vide. Lorsqu'un photon possède une énergie inférieure à celle du gap, il traverse le matériau sans y être absorbé. En revanche, si son énergie est suffisante pour franchir cet écart, dans ce cas, il va faire passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Ce qui veut dire qu'il va créer une paire électron-trou, modifiant localement la conductivité électrique du matériau et amorçant ainsi le mécanisme de génération du courant électrique.[9]

I.5.2 Création de paires électron/trous

Lorsque les photons avec suffisamment d'énergie frappent la surface de la cellule solaire, cela déclenche la création de porteurs de charges (les paires électron-trous) dans les zones N, P et la zone de charge d'espace. Le comportement des photo-porteurs variera selon la région [9] : Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires (les trous dans la zone N, les électrons dans zone P) vont se diffuser sous l'effet de leur gradient de concentration vers la zone de charge d'espace (ZCE). Ceux qui atteignent les frontières de cette zone seront renvoyés par un champ électrique, soit vers la zone P pour les trous, soit vers la zone N pour les électrons. Cette accumulation va générer un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge, les paires électron/trou créées par les photons seront immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, les électrons se dirigeant vers la région N et les trous vers la région P. Cela permettra de générer un photo-courant de génération.

I.5.3 collecte de charge

Une fois les paires électron-trou séparées, les charges libres générées doivent diffuser à travers le matériau jusqu'aux électrodes afin d'être collectées. La mobilité de ces porteurs de charge est caractérisée par une grandeur physique qui s'appelle la mobilité électrique qui est exprimée en $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette dernière dépend de la nature du matériau et des interactions entre les porteurs et le réseau cristallin. Sa formule générale est donnée par la relation suivante :

$$\mu = \left| \frac{q \cdot t_c}{2m} \right| \quad (\text{I.3})$$

I.6 la structure dune cellule photovoltaïque

I.6.1 texturation de la surface

La texturation du silicium sert à réduire la réflexion de la surface de la cellule. Cette opération a pour but de créer un relief micrométrique en surface, souvent sous forme de pyramide. Cela aide à mieux capter le spectre solaire.[10]

I.6.2 couche antireflet

Pour résoudre le problème de la perte de la lumière due à l'effet d'ombre. En texturant la surface avant du module de contact métallique avec un motif

triangulaire présentant un indice de réfraction inférieur à celui de son environnement, nous pouvons induire une réflexion totale de la lumière incidente. Ainsi, la lumière réfléchie atteint la couche absorbante au lieu d'être bloquée par le contact métallique, minimisant ainsi efficacement l'effet d'ombre.[11]

I.6.3 la couche BSF

Un BSF (Back Surface Field) est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure P^-P^+ . Ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base dans une région loin de l'interface ce qui va empêcher leur recombinaison. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison. [12]

I.6.4 les contact face avant et arrière

Les contacts métalliques de l'émetteur et du substrat ont pour but de collecter le courant des porteurs photo générée. Il est essentiel que ces contacts soient ohmiques, ce qui signifie que la relation $I = f(V)$ doit être linéaire. La résistance des contacts est un facteur clé à prendre en compte. Une résistance élevée peut augmenter la résistance série de la cellule, ce qui, à son tour, réduit le facteur de forme et l'efficacité. En général, pour le cas des cellules à base de silicium ces contacts sont fabriqués par sérigraphie, avec des doigts de sérigraphie ayant une largeur minimale de 100 μm et une épaisseur variante entre 10 μm et 30 μm , ce qui permet de gérer une forte densité de courant. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, des techniques comme la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont souvent employées.[12]

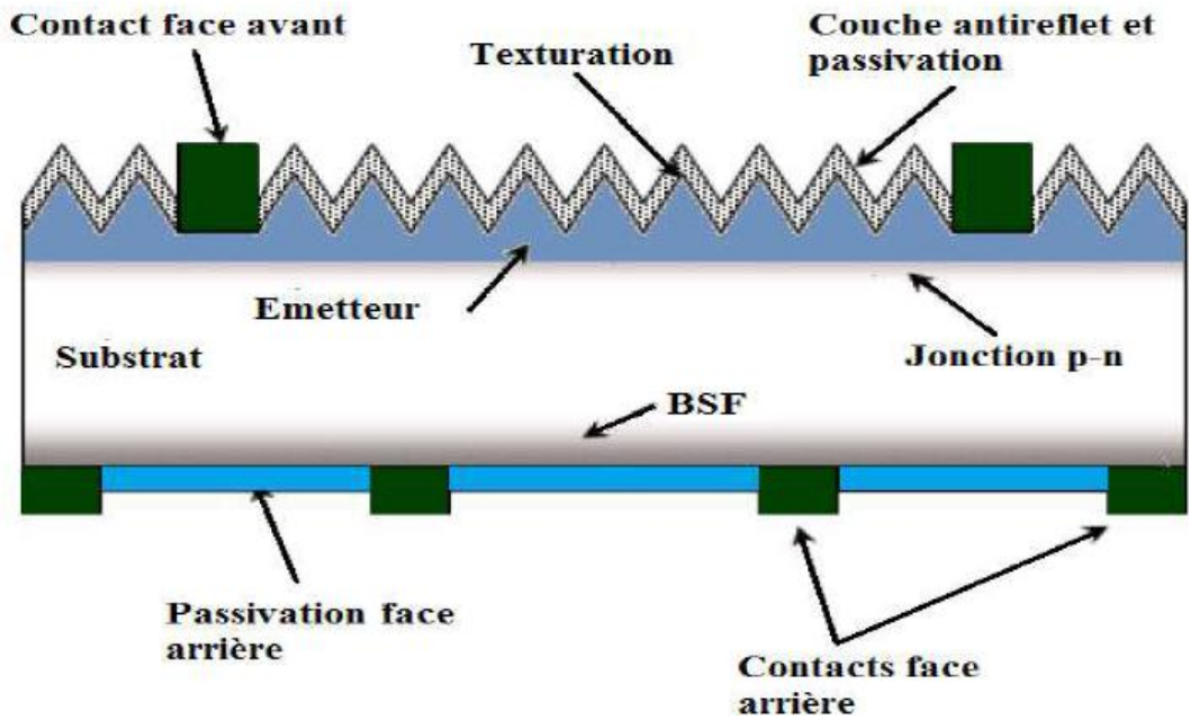


FIGURE I.7 – Structure d'une cellule solaire [12].

I.7 Schéma électrique équivalent et la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

Dans le cas idéal, la cellule solaire (jonction PN) sous éclairement et connectée à une charge peut être modélisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode délivrant un courant. La figure I.7 représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.

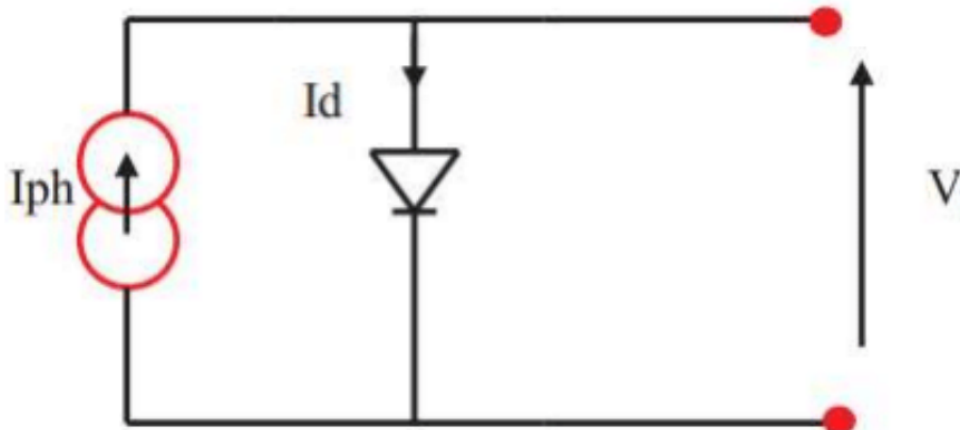


FIGURE I.8 – Schéma électrique d'une cellule solaire idéale [12].

Sous l'obscurité, le courant de la cellule est appelé **courant d'obscurité** et a la forme suivante :

$$I_{\text{obs}} = I_s \left(e^{\left(\frac{-qV}{nkT}\right)} - 1 \right) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

- q : charge élémentaire, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$,
- V : tension aux bornes de la jonction (V),
- k : constante de Boltzmann, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$,
- T : température absolue (K),
- I_s : courant de saturation inverse de la jonction p-n,
- n : coefficient d'idéalité de la jonction.

Ce courant d'obscurité correspond au **courant de diode** : il résulte de la polarisation de la jonction PN sous obscurité.

Sous éclairement, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré, est rajouté. On obtient alors le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement, représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{\text{ph}} - I_{\text{obs}} = I_{\text{ph}} - I_s \left(e^{\left(\frac{-qV}{nkT}\right)} - 1 \right) \quad (\text{I.5})$$

Dans le cas réel, la performance d'une cellule solaire est limitée par les pertes dues aux recombinaisons des porteurs de charge sur les défauts, les surfaces de la cellule et aux contacts de collection. Ces pertes sont électriquement modélisées par deux résistances R_s et R_p (figure I.9).

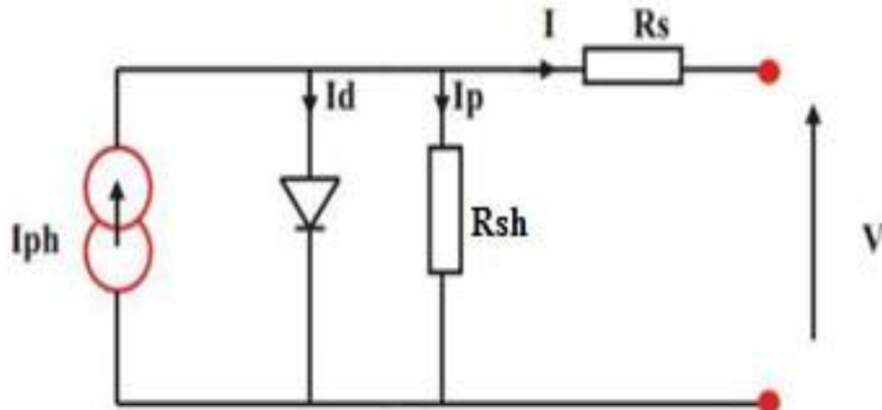


FIGURE I.9 – Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [13].

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule sous obscurité et sous éclairement est représenté sur la figure I.10

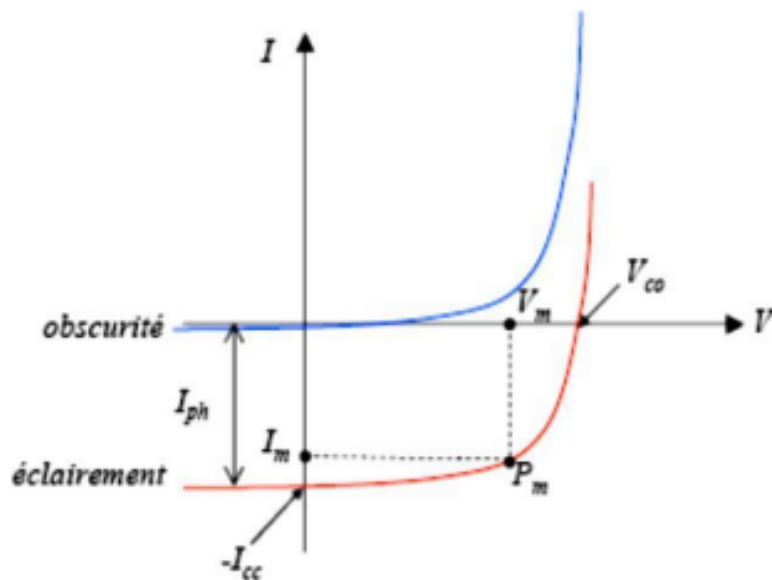


FIGURE I.10 – caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [8].

I.8 Les paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

I.8.1 Courant de court-circuit, I_{cc}

Le courant de court-circuit, I_{cc} , représente la valeur du courant lorsque la tension est à zéro. Dans un scénario idéal, où la résistance est nulle et la résistance de charge est infinie, ce courant coïncide avec le photo-courant. On obtient [14].

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{qR_s I_{cc}}{nkT} \right)} - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_p} \quad (\text{I.6})$$

I.8.2 Tension a circuit ouvert, V_{oc}

Il s'agit de la tension mesurée aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas reliée à une charge, ou lorsqu'elle est connectée à une charge avec une résistance infinie. Cette tension dépend principalement du type de la cellule solaire utilisée (comme la jonction PN ou la jonction Schottky), des matériaux qui composent la couche active, ainsi que de la nature des contacts entre la couche active et l'électrode. De plus, elle est influencée par l'éclairement reçu par la cellule.

La tension en circuit ouvert est donnée par l'équation suivante :

$$V_{oc} = \frac{kT_c}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{I.7})$$

où :

- $\frac{kT_c}{q}$: représente le potentiel thermodynamique,
- T_c : température absolue (K),
- q : charge de l'électron, $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C,
- k : constante de Boltzmann, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K,
- I_{ph} : courant photonique,
- I_s : courant de saturation inverse.

Deux régimes peuvent être observés selon le niveau d'éclairement :

- Régime des faibles flux lumineux ($I_{ph} \ll I_s$)

Dans ce cas, on peut approximer le logarithme :

$$\ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \approx \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{I.8})$$

Ce qui donne :

$$V_{oc} \approx \frac{kT_c}{q} \cdot \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{I.9})$$

- Régime des flux lumineux intenses ($I_{ph} \gg I_s$)

Dans ce cas, on peut écrire :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (\text{I.10})$$

Ce qui donne une autre approximation de la tension en circuit ouvert :

$$V_{oc} \approx \frac{kT_c}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{I.11})$$

I.8.3 Facteur de forme FF

Un élément clé souvent utilisé pour évaluer la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque est le facteur de remplissage, ou fill factor (FF). Ce coefficient indique le rapport entre la puissance maximale que la cellule peut fournir, notée P_{max} , et la puissance représentée par le rectangle formé par I_{cc} multiplié par V_{oc} . Plus ce facteur est élevé, plus la puissance que l'on peut exploiter est importante. Les cellules les plus performantes auront donc nécessité des compromis technologiques pour se rapprocher le plus possible des caractéristiques idéales.[16] Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} \quad (\text{I.12})$$

I.8.4 Puissance maximale

L'utilisation optimale d'une cellule photovoltaïque consiste à la faire fonctionner à la tension et au courant qui permettent de produire la puissance maximale. la puissance est maximale lorsque le produit de la tension et du courant atteint son maximum. Ce point particulier est appelé point de puissance maximale (P_m), et correspond aux conditions idéales de fonctionnement de la cellule [9].

I.8.5 Rendement de conversion

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident P_{in} :

$$\eta = \frac{V_{max} \times I_{max}}{P_{in}} \quad (\text{I.13})$$

Si S est la surface de la cellule en (m^2) et E est l'éclairement « irradiance » (en W/m^2) le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{cc}}{S \times E} \quad (I.14)$$

le rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [18].

I.8.6 Réponse spectrale d'une cellule solaire

Les mesures de la réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque permettent de compléter sa caractérisation électrique en déterminant le rapport entre le flux d'électrons collectés et le flux de photons incidents en fonction de la longueur d'onde du rayonnement monochromatique incident. De manière générale, la réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque correspond au courant de court-circuit I_{cc} produit par unité de flux lumineux monochromatique incident.

$$R_s(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_g(\lambda)} \quad (I.15)$$

La réponse spectrale $R_s(\lambda)$ représente le courant de court-circuit $I_{cc}(\lambda)$ généré par la cellule pour une unité de flux lumineux monochromatique incident $P_g(\lambda)$. Elle est exprimée en ampères par watt (A/W), où :

- $R_s(\lambda)$ est la réponse spectrale,
- $P_g(\lambda)$ est l'éclairement monochromatique global en W/m^2 ,
- $I_{cc}(\lambda)$ est le courant de court-circuit en A/cm^2 .

La réponse spectrale interne correspond spécifiquement au courant généré par unité de flux lumineux réellement absorbé par la cellule après traversée de la surface active. Elle est donnée par la relation suivante :

$$R_{s,int}(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_g(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda))} \quad (I.16)$$

où $R(\lambda)$ représente le coefficient de réflexion à une longueur d'onde donnée.

Le photo-courant collecté à chaque longueur d'onde, par rapport au nombre de photons incidents sur la surface de la cellule, détermine la réponse spectrale du dispositif[19].

I.8.7 Rendement quantique externe et interne

Le rendement quantique $QE(\lambda)$ d'une cellule solaire est définie comme le rapport entre le nombre d'électrons collectés et le nombre de photons incidents, pour chaque longueur d'onde. Si tous les photons d'une certaine énergie sont efficacement convertis en électrons et récupérés aux bornes de la cellule, le rendement quantique atteint alors sa valeur maximale. Cette analyse permet de déterminer les zones limitantes au sein de la cellule par rapport au rendement quantique idéal comme il est présenté sur la figure I.11.

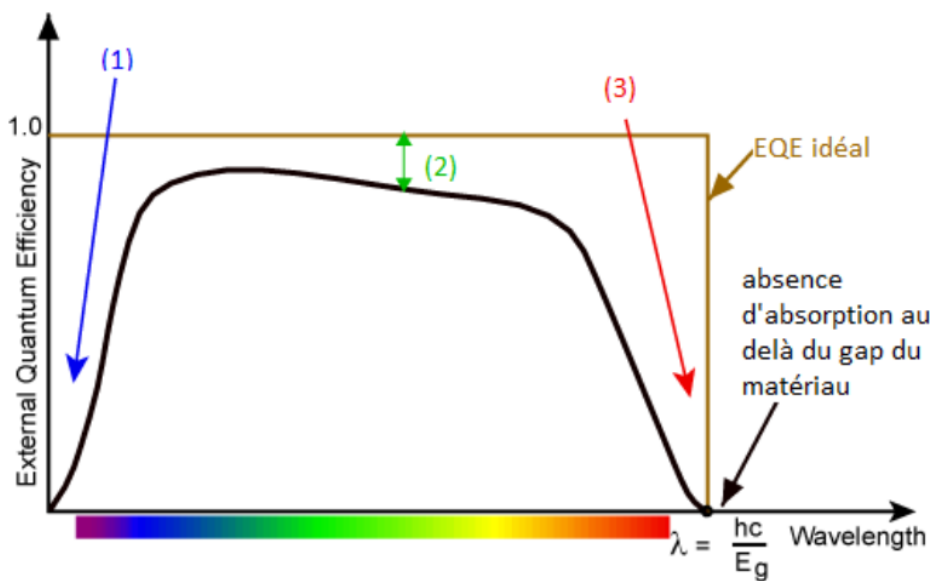


FIGURE I.11 – Variation spectrale du rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque. On distingue ensuite différents types de rendement quantique [20].

I.8.7.1 Rendement quantique externe

Le rendement quantique externe (RQE) correspond au pourcentage d'électrons collectés qui contribuent au photo-courant, par rapport au nombre total de photons incidents sur la cellule[21]. Il est défini par l'expression suivante :

$$RQE(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} \cdot R_s(\lambda) \quad (I.17)$$

I.8.7.2 Rendement quantique interne

Le rendement quantique interne (RQI) analyse uniquement les mécanismes internes de la cellule. Il tient compte uniquement des photons réellement absorbés par la cellule, en excluant ceux qui sont réfléchis, transmis ou absorbés par des couches non actives comme la couche antireflet. Le RQI

mesure donc le pourcentage d'électrons collectés par rapport au nombre de photons effectivement absorbés dans la cellule[21]. :

$$RQI(\lambda) = \frac{RQE(\lambda)}{1 - R(\lambda) - A(\lambda) - T(\lambda)} \quad (I.18)$$

avec :

- $RQI(\lambda)$: rendement quantique interne (en %),
- $R(\lambda)$: réflectivité de la cellule (en %),
- $A(\lambda)$: absorption dans les couches non actives (en %),
- $T(\lambda)$: fraction du rayonnement transmis à travers la cellule (en %).

I.9 Les différents types de pertes dans une cellule solaire

Les pertes observées dans une cellule solaire peuvent être d'origine soit optique, soit électrique, comme l'illustre la figure I.12.

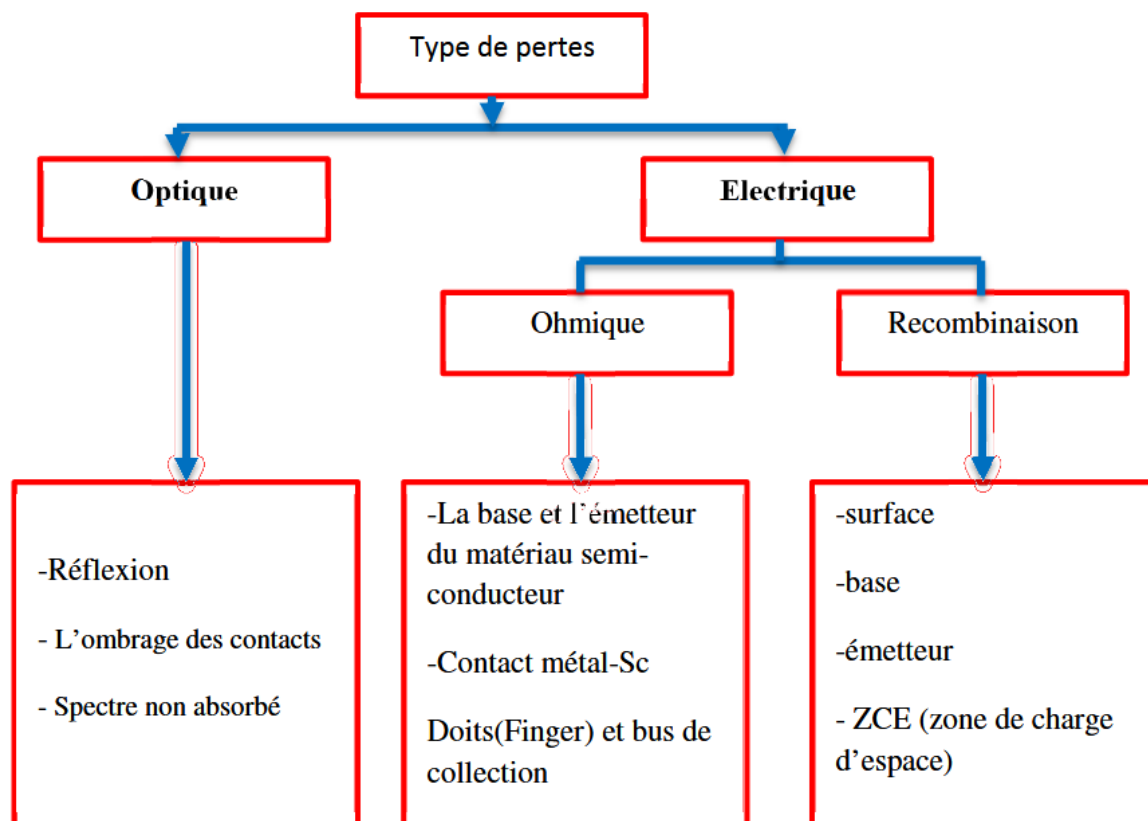


FIGURE I.12 – Différents types de pertes électriques et optiques existant dans une cellule solaire.[22].

I.9.1 Pertes extrinsèques

Ce sont les pertes que l'on peut éviter. Cela inclut des pertes causées par la réflexion, l'ombre due aux contacts, la résistance en série, la collecte incomplète des porteurs de photons générés, l'absorption dans la couche de fenêtre et la recombinaison non radiative [23].

I.9.2 Pertes intrinsèques

Les pertes intrinsèques sont de nature fondamentales, et elles ne peuvent pas être évitées. Parmi elles, on distingue notamment la non-absorption des photons dont l'énergie est inférieure à celle du gap du matériau semi-conducteur, ainsi que les pertes thermiques liées à l'excès d'énergie des photons absorbés. En effet, la cellule devient transparente aux photons dont l'énergie est inférieure à la bande interdite $E_{ph} < E_g$, ces derniers n'étant pas capables de générer de paires électron-trou. À l'inverse, lorsque l'énergie des photons est supérieure à la bande interdite $E_{ph} > E_g$, l'excédent d'énergie est rapidement dissipé sous forme de chaleur par relaxation thermique, ce qui constitue une perte énergétique intrinsèque au processus de conversion photovoltaïque [23].

I.9.3 Résistance série

La résistance série R_s provient de l'impédance des électrodes, notamment la métallisation de la grille et de la face arrière, ainsi que d'un dopage insuffisant dans les zones presque neutres (Émetteur-Base). Bien que la faible valeur de la résistance série n'ait pas d'impact sur J_{cc} et V_{co} , elle réduit le facteur de forme. Pour garantir une cellule de bonne qualité, R_s doit être inférieure à 1Ω [24].

I.9.4 Résistance shunt

Les pertes causées par la résistance shunt R_{sh} sont généralement dues à des défauts de fabrication (la diffusion des contacts métalliques à haute température qui perfore l'émetteur). Ceci correspond à une résistance de fuite dans la jonction qui devient significative quand la jonction PN est placée proche de la surface [25]. Une cellule solaire de bonne qualité a une R_{sh} supérieure à $10^4 \Omega$ [26].

I.9.5 Recombinaison

I.9.5.1 Recombinaison radiative

Quand un électron et un trou se rencontrent et qu'ils émettent un photon, on parle de recombinaison radiative. C'est le principe fondamental de l'électroluminescence, qui trouve sa principale application dans les LEDs. Ce type de recombinaison est bien plus efficace dans les semi-conducteurs à gap direct, où il suffit de deux particules : un électron dans la bande de conduction et un trou dans la bande de valence. La recombinaison radiative ne se produit que grâce à l'intervention d'un phonon. Par conséquent, la probabilité qu'un tel événement se produise est donc réduite.[27]

I.9.5.2 Recombinaison indirecte

Dans un semi-conducteur, la structure cristalline n'est jamais tout à fait parfaite on y trouve des dislocations, surtout dans les hétérostructures. Les dislocations et les impuretés sont parmi les principales raisons pour lesquelles des niveaux d'énergie apparaissent dans la bande interdite des semi-conducteurs. Ces niveaux rendent la recombinaison des porteurs de charges plus facile et fonctionnent comme des centres de recombinaison non-radiatifs, autrement dit, ce sont des pièges [9].

I.9.5.3 Recombinaison Auger

L'effet Auger se produit lorsqu'un électron dans un état excité se recombine avec un trou, et l'énergie qui en résulte est transférée à un électron dans la bande de conduction ou à un trou dans la bande de valence. [9]. L'effet Auger nécessite donc au moins trois particules : deux électrons et un trou $e^- e^- t^+$ ou bien deux trous et un électron $e^- t^+ t^+$ selon que les porteurs de charges se trouvent dans la bande de valence ou dans la bande de conduction.[28]

I.10 Différentes générations des cellules photovoltaïques

I.10.1 cellules de première génération

Les cellules de première génération sont principalement fabriquées à partir de silicium cristallin, sous forme de wafers d'environ 0,5 mm d'épaisseur. Elles sont réalisées à partir de silicium monocristallin ou polycristallin, traitées pour créer des jonctions p-n qui génèrent un courant électrique sous lumière. Ces cellules offrent une efficacité d'environ 15 à 22 %, mais leur production

reste coûteuse en raison de la pureté du silicium et des procédés complexes. Elles sont fiables et ont une longue durée de vie, mais leur coût et l'utilisation intensive de matériaux restent des inconvénients majeurs.[29]

I.10.2 cellules de deuxième génération

Les cellules de deuxième génération sont fabriquées à partir de films minces de matériaux comme le silicium amorphe, le tellurure de cadmium (CdTe) ou le di-sélénure de cuivre-indium-gallium (CIGS), d'une épaisseur d'environ 10 micromètres. Ces films sont déposés sur du verre ou la céramique. Elles sont plus abordables à produire que les cellules de première génération, mais leur rendement est généralement plus faible (10 à 18 %). Elles sont adaptées à des applications nécessitant flexibilité et légèreté, bien que leur fiabilité à long terme et l'impact environnemental de certains matériaux puissent poser des défis.[29]

I.10.3 cellules de troisième génération

ces cellules utilisent des structures multicouches, de l'électronique imprimée (comme les cellules à colorants) ou des nanoparticules de silicium ou de germanium, d'environ 5 nanomètres de diamètre, implantées dans une fine couche de verre à la surface de la cellule pour optimiser l'absorption de la lumière solaire [29].

I.11 Conclusion

Ce chapitre a d'abord permis de présenter une description approfondie de l'énergie solaire, en examinant ses différentes gammes de rayonnement. Nous avons également proposé un aperçu sur ces cellules solaires et de leur développement, en soulignant les diverses technologies employées. Par la suite, nous avons clarifié des notions essentielles relatives à l'effet photovoltaïque. Nous avons ensuite analysé en détail le fonctionnement interne des cellules solaires, en précisant les nombreux paramètres qui les influencent. Enfin, nous avons identifié et étudié les différents phénomènes affectant le rendement des cellules solaires, tels que les pertes électriques et optiques, les résistances parasites, ainsi que la recombinaison.

Chapitre II

Les cellule solaire à base de CIGS

II.1 Introduction

Les cellules solaires en couches minces constituées de CIGS sont des dispositifs à hétérojonction. Le CIGS, qui est un semi-conducteur de type p, fonctionne comme un absorbeur en produisant des paires électron-trou lorsqu'il est soumis à la lumière. Nous examinerons la structure de la cellule CIGS et sa structure cristalline, et à la fin on mettra en évidence les différents avantages et inconvénients du matériau CIGS.

II.2 Structures d'une cellule CIGS

Dans sa forme la plus courante, une cellule CIGS est constituée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces, qui sont déposées successivement sur un substrat. Ce substrat est généralement une plaque de verre sodocalcique (Soda-Lime Glass, SLG). La figure II.1 illustre la structure typique d'une cellule à base de CIGS.[30]

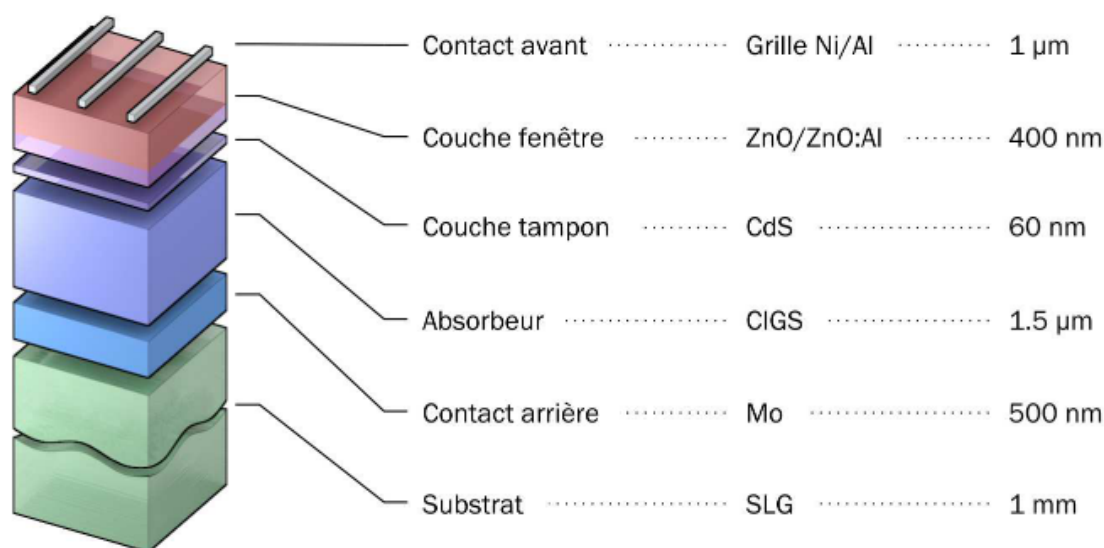


FIGURE II.1 – Structure standard d'une cellule à base de CIGS.[30]

II.2.1 substrats

Le substrat ou SLG pour soda-lime glass, est généralement fait de verre sodocalcique. Ce genre de verre est souvent utilisé en raison de sa large disponibilité, de son coût abordable et de sa compatibilité thermique avec les procédés de fabrication des cellules CIGS. Il sert de fondation sur laquelle sont superposées les différentes couches qui composent la cellule solaire CIGS, y compris les couches de matériau qui absorbent la lumière ($\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$),

les couches de jonction PN et les contacts métalliques. De plus, il offre une surface plane et stable pour le dépôt des matériaux, ce qui aide à garantir une bonne adhérence entre les différentes couches.[31]

II.2.2 le contact arrière :

Le contact arrière, qui sert de pôle positif pour le générateur photovoltaïque, est un métal appliqué sur la partie inférieure de l'absorbeur. Son rôle est de capter les porteurs provenant de l'absorbeur et de les transmettre à la charge externe. Il doit donc répondre à plusieurs critères, qu'ils soient chimiques, mécaniques ou économiques. De nombreux métaux ont été examinés, tels que le Tungstène, le Molybdène, le Chrome, le Tantale et le Manganèse.[32]

II.2.3 L'absorbeur :

La couche qui se trouve juste au-dessus du contact arrière est faite d'un matériau absorbant, le CIGS. Ce dernier est un semi-conducteur de type p, et il constitue la première partie de l'hétérojonction p-n. C'est également dans ce matériau que la plupart des photons sont absorbés pour créer des paires électron-trou. Son épaisseur varie entre $1\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$. Il existe plusieurs méthodes pour déposer le CIGS, les plus courantes étant la Co-évaporation et le recuit de précurseurs métalliques en présence de vapeurs de sélénium.[30]

II.2.4 La couche tampon :

La couche tampon est un semi-conducteur de type n, et son gap doit être plus large que celui de l'absorbeur. Elle a principalement deux fonctions : une fonction électrique et une fonction de protection. Sur le plan électrique, cette couche ajuste la largeur de la bande interdite entre l'absorbeur et la couche fenêtre [33], tout en réduisant les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. De plus, elle protège la surface de l'absorbeur lors du dépôt de la couche de ZnO par pulvérisation cathodique, un processus qui pourrait causer des défauts à la surface du CIGS.[32]

II.2.5 La couche fenêtre :

La couche tampon est recouverte d'une couche de fenêtre, souvent appelée *oxyde transparent conducteur* (OTC). Cette couche doit être à la fois conductrice et transparente, afin de capter les électrons tout en permettant à la lu-

mière de passer, avec une transmission qui doit dépasser 80 % dans le spectre solaire. La conductivité de ces couches doit être supérieure à $10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$.

Pour obtenir de telles propriétés, on utilise des couches minces de SnO_2 , In_2O_3 , et les plus couramment utilisées sont l'oxyde d'indium et d'étain ainsi que l'oxyde de zinc (ZnO). Leur transparence est liée à la valeur de leur bande interdite, tandis que leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches et d'un éventuel dopage [33].

II.2.6 La grille :

Le contact final est établi en ajoutant une grille à l'empilement, qui va recueillir les charges produites par le dispositif. Cette grille se compose d'une couche de nickel et d'une couche d'aluminium. Le nickel agit comme une couche d'accroche, empêchant ainsi l'oxydation de l'aluminium due à la présence du *TCO* en dessous. En général, les grilles sont déposées par évaporation, en utilisant un masque de dépôt [30].

II.3 Structure cristalline

II.3.1 Architecture des cellule CIGS :

Les cellules solaires à base de CIGS sont des structures à hétérojonction, composées de plusieurs couches minces. L'empilement le plus courant pour ces cellules est illustré dans la. Dans ce type de structure, le composé CIGS agit comme le semiconducteur de type p et l'absorbeur de la cellule. En d'autres termes, c'est la couche où les paires électrons-trous se forment grâce à l'absorption des photons. Cette couche a une épaisseur d'environ $2 \mu\text{m}$, ce qui est suffisant pour capter la plupart des photons dont l'énergie dépasse son gap.[34]

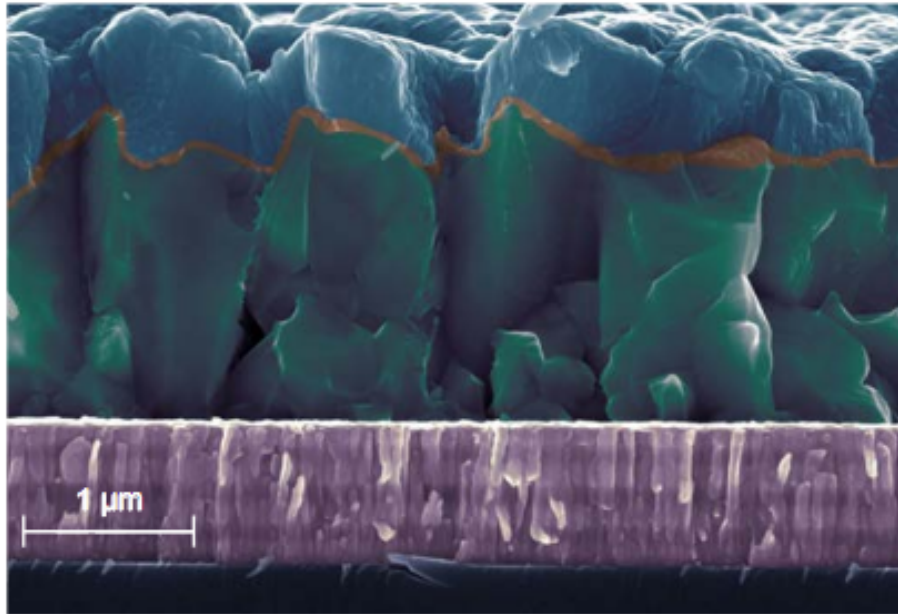


FIGURE II.2 – Structure d’une cellule solaire à base de CIGS.[34]

II.3.2 Structure du matériau CIGS

Le matériau de base du CIS (le diséléniure de cuivre et d’indium, CuInSe_2) est un semi-conducteur de type I–III–VI₂, qui présente une structure cristalline de chalcopyrite. C’est une structure tétragonale pouvant être vue comme une superposition de deux structures de zinc-blende (type diamant). Dans cette configuration, les sites tétraédriques sont occupés par des atomes du groupe VI (Se) (anions), tandis que les autres sites sont ordonnés avec des atomes des groupes I (Cu) et III (In) (cations) [35].

Le rapport des paramètres de maille c/a est légèrement différent de 2 (distorsion tétragonale), principalement en raison des différences d’énergie entre les liaisons Cu–Se et In–Se [35].

Dans le cas du CIGS, les sites cristallographiques des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d’In ou de Ga, selon des proportions dépendant de la composition de l’alliage. Autrement dit, le CIGS est une solution solide formée entre CuInSe_2 et CuGaSe_2 .

La figure II.2 montre les différentes structures cristallines des trois matériaux semi-conducteurs utilisés dans le photovoltaïque : Si, CdTe et CIGS. Elle illustre également la différence entre la structure diamant, la structure zinc-blende et celle de la chalcopyrite.

Un élément clé dans la fabrication des cellules CIGS est l’orientation cristalline du matériau, fortement influencée par les conditions de production. Les meilleures performances photovoltaïques sont obtenues avec l’orientation

cristallographique (220)/(204) [36].

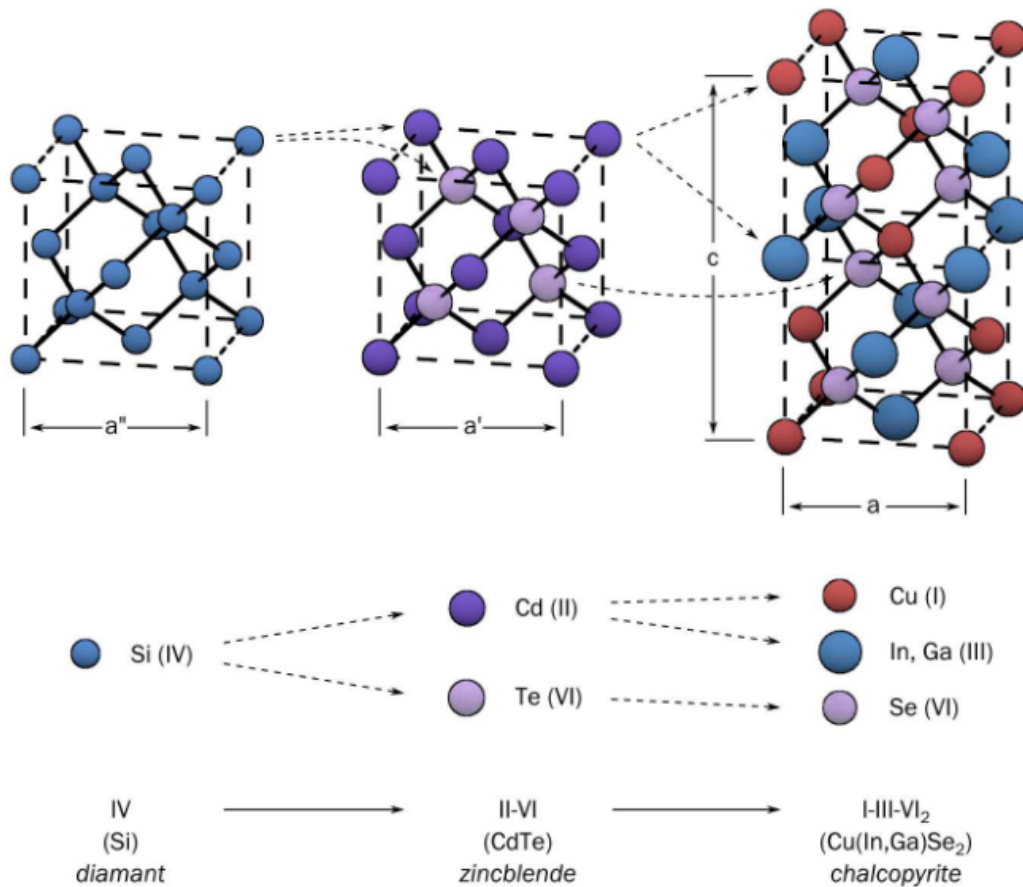


FIGURE II.3 – Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite [37].

L'introduction du gallium (Ga) dans la matrice du CuInSe_2 permet de moduler la valeur de la bande interdite de ce dernier. Le *gap* peut ainsi être ajusté dans une plage comprise entre 1,0 et 1,7 eV selon la concentration des atomes de Ga dans CuInSe_2 . À ce jour, les meilleurs rendements ont été obtenus avec des alliages Cu(In, Ga)Se_2 présentant un rapport $\text{Ga}/(\text{In} + \text{Ga})$ compris entre 25 % et 35 %, correspondant à une bande interdite de l'ordre de 1,1 à 1,2 eV [37].

Plusieurs études suggèrent que ces performances élevées pourraient être en partie attribuées à la formation d'une couche d'OVC (*Ordered Vacancy Compound*) à l'interface, une structure qui serait difficile, voire impossible, à obtenir dans les matériaux CuGaSe_2 ou CuInS_2 [37]. Par ailleurs, les défauts de type $2V_{\text{Cu}} + \text{Ga}_{\text{Cu}}$, caractéristiques du CuGaSe_2 , sont généralement moins stables que ceux impliquant l'indium, ce qui limite leur efficacité dans la compensation électronique des défauts.

Il a également été observé que la teneur optimale en gallium ($\frac{\text{Ga}}{\text{In}+\text{Ga}} \approx 0,3$) dans un alliage $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ homogène en épaisseur permet de minimiser la densité de défauts [37]. Cette réduction du nombre de défauts se traduit par une diminution des pertes par recombinaison au sein du volume de l'absorbeur, contribuant ainsi à l'amélioration des performances photovoltaïques du dispositif.

II.3.3 Dopage : influence des imperfections intrinsèques

Les propriétés électriques du CIGS sont influencées par la présence d'imperfections intrinsèques, notamment les lacunes. Ainsi, la présence de défauts intrinsèques constitue la principale source de dopage dans les matériaux à base de CIGS. Pour les couches de type p , la lacune de cuivre (V_{Cu}) joue le rôle de centre accepteur. En revanche, dans les couches de type n , c'est la lacune de sélénium (V_{Se}) qui joue le rôle principal dans le dopage donneur.

La tolérance élevée du CIGS combinée à l'absence de charge électrique pour la majorité de ses défauts intrinsèques, joue un rôle essentiel dans ses performances remarquables en tant que matériau absorbant. Par exemple, le défaut complexe $2V_{\text{Cu}} + \text{In}_{\text{Cu}}$, qui implique deux lacunes de cuivre et le remplacement d'un atome de cuivre par un atome d'indium, possède une faible énergie de formation. Ce défaut n'entraîne aucune transition électronique dans la bande interdite, ce qui permet l'intégration supplémentaire d'indium sans dégrader les performances de la cellule photovoltaïque [37].

L'agencement périodique de tels défauts peut conduire à la formation de composés OVC (*Ordered Vacancy Compounds*), dont la composition chimique s'approche de celle de CuIn_3Se_5 . Toutefois, tous les défauts ne sont pas bénéfiques pour les propriétés électroniques du matériau. Certains défauts de substitution, tels que Cu_{In} ou In_{Cu} , peuvent agir comme centres de recombinaison, réduisant ainsi l'efficacité de conversion photovoltaïque [37].

Les dispositifs à base de CIGS présentent une stabilité remarquable à long terme, notamment en environnements irradiés. Cette robustesse est attribuée à la mobilité du cuivre, ainsi qu'à la capacité des défauts à se réorganiser sous l'effet de perturbations extérieures, permettant ainsi une certaine compensation et assurant une stabilité électrique durable[37].

II.3.4 propriétés optiques

Le matériau CIGS est un excellent absorbeur de lumière. Il peut atteindre un rendement très élevé tout en n'utilisant qu'une très fine couche de matériau, de l'ordre de 1 à 2 μm , avec un coefficient d'absorption optique α situé

entre 10^4 et 10^5 cm^{-1} [38].

Le rendement des cellules solaires dépend principalement de la quantité de lumière que la couche absorbante parvient à capter. D'un point de vue technologique, il est donc essentiel que cette couche possède un *gap* optimal, afin d'absorber presque tout le spectre solaire tout en conservant un coefficient d'absorption élevé.

L'utilisation du CIGS dans les dispositifs photovoltaïques à couches minces s'explique justement par son coefficient d'absorption optique α particulièrement élevé. Ainsi, quelques micromètres d'épaisseur suffisent, notamment en comparaison avec un semi-conducteur à *gap* indirect comme le silicium [39].

II.4 Avantages et inconvénient [40]

II.4.1 Les avantages :

- Elle n'a pas de pièces mobiles, ce qui la rend vraiment adaptée aux régions éloignées.

- Le design modulaire des panneaux photovoltaïques facilite un montage simple et s'adapte à une variété de besoins énergétiques.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très bas grâce à des entretiens minimaux, et ils n'ont pas besoin de combustible, de transport, ni de personnel hautement qualifié.

II.4.2 Les inconvénients :

- La création d'un module photovoltaïque est un processus de haute technologie qui nécessite des investissements conséquents.

- L'utilisation de l'espace pour des installations de grande taille.

- le coût du générateur photovoltaïque augmente, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique, comme dans une batterie, est nécessaire.

- Le véritable rendement de conversion d'un module est assez faible.

II.5 conclusion :

Ce chapitre est consacré aux cellules solaires élaborées à partir de matériaux semi-conducteurs de type CIGS. Il se divise en trois sections principales. La première section aborde le matériau CIGS ainsi que les caractéristiques de ses diverses compositions. La deuxième section propose un aperçu sur la structure cristalline du matériau CIGS et ses différentes propriétés optiques. Pour conclure, la troisième section les différents avantage et inconvénient du matériau CIGS.

Chapitre III

Simulation et résultats

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'analyse des performances électriques d'une cellule solaire à base de CIGS, en menant une série de simulations numériques à l'aide du logiciel SCAPS-1D. Nous débuterons par une bref présentation du logiciel, en décrivant son interface graphique, son principe de fonctionnement, ainsi que les étapes clés pour la modélisation d'une cellule photovoltaïque.

Par la suite, nous étudierons la variation des principaux paramètres électriques à savoir la tension à circuit ouvert (VOC), le courant de court-circuit (JSC), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion η en fonction de l'épaisseur et du dopage de la couche absorbante CIGS. Cette analyse sera menée dans deux configurations distinctes : avec et sans l'ajout d'une couche BSF (Back Surface Field).

Nous poursuivrons ensuite par une investigation de l'influence de l'épaisseur et du niveau de dopage de la couche BSF sur les performances globales de la cellule, en vue d'identifier les conditions optimales permettant d'améliorer l'efficacité du dispositif.

Enfin, dans le but de rapprocher notre étude des conditions expérimentales réelles, nous introduirons différents types de défauts : des défauts volumiques au sein de la couche CIGS, ainsi que des défauts d'interface aux jonctions CIGS/ SnO_2 et CIGS/ Sb_2S_3 . L'impact de ces imperfections sur les performances de la cellule sera analysé en profondeur, afin de mieux cerner les limitations liées à la qualité des matériaux et des interfaces dans les cellules photovoltaïques à couches minces.

III.2 Logiciels de simulation SCAPS :

III.2.1 Présentation SCAPS :

SCAPS est un programme de simulation unidimensionnelle dédié à l'analyse des performances des cellules solaires. Il a été développé par le Département d'Electronique et de Systèmes d'Information (ELIS) de l'Université de Gand, en Belgique. Parmi les principaux contributeurs à son développement figurent Marc Burgelman, Alex Niemegeers, Koen Decock, Johan Verschraegen et Stefaan Degraeve [41].

Initialement conçu pour modéliser les cellules solaires de type CuInSe et CdTe, SCAPS a bénéficié de nombreuses améliorations au fil du temps, lui permettant de simuler une gamme plus étendue de technologies photovoltaïques. Il est désormais capable de prendre en charge aussi bien les cellules cristallines (telles que celles à base de Si ou GaAs) que les cellules amorphes (comme l'a-Si ou le silicium micromorphe), ce qui en fait un outil polyvalent dans le domaine de la recherche photovoltaïque.

III.3 Utilisations du logiciel :

III.3.1 Action panel :

SCAPS est un programme conçu pour Windows, développé avec LabWindows/CVI de National Instruments. Ici, nous faisons référence à LW/CVI en utilisant le terme «panneau » (d'autres logiciels peuvent l'appeler fenêtre, page, pop-up, etc.). Lorsque vous ouvrez SCAPS, vous êtes accueilli par le « panneau d'action »[41].

1. Exécute SCAPS
2. Définissez le problème, donc la géométrie, les matériaux, toutes les propriétés de votre cellule solaire
3. Indiquez les circonstances dans lesquelles vous souhaitez effectuer la simulation, c'est-à-dire précisez le point de fonctionnement.
4. Indiquez ce que vous allez calculer, c'est-à-dire quelle mesure vous allez simuler.
5. Démarrer le(s) calcul(s)
6. Afficher les courbes simulées

III.3.2 Définition panel (définition du problème)

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action la fenêtre de définition panel s'affichera. Sur cette fenêtre on définit une nouvelle structure comme on peut télécharger une structure déjà existante. Par exemple si on choisit d'importer une structure existante on clique sur le bouton LOAD dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne la cellule qu'on veut ouvrir et clique sur Ok (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def). les détails de la cellule seront affichés. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action[41].

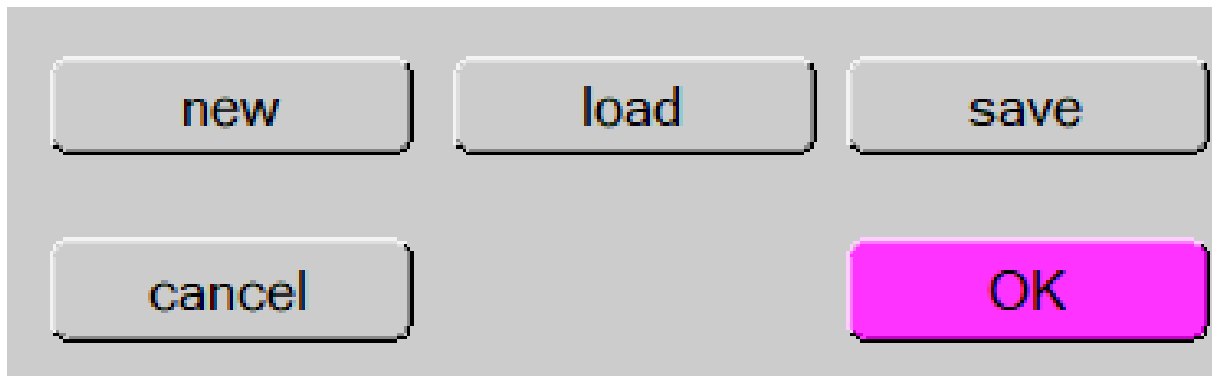


FIGURE III.1 – définition du problème.

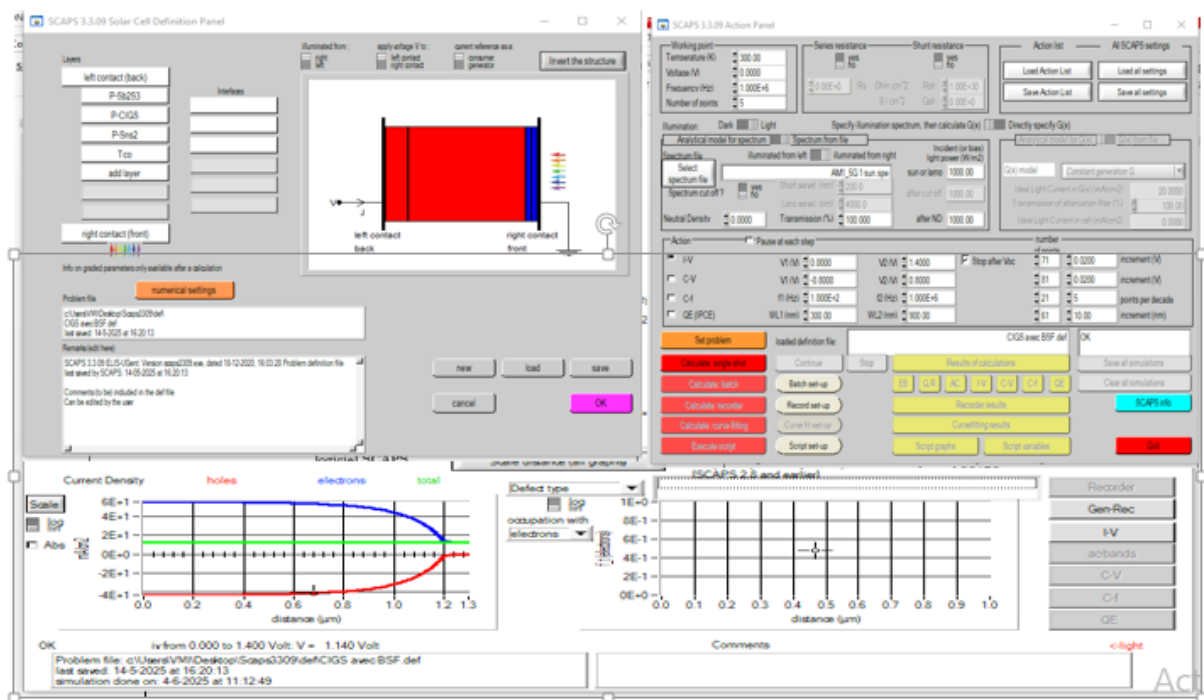


FIGURE III.2 – Fenêtre d'exécution, de conception du dispositif et des résultats du logiciel.

La fenêtre d'exécution contient également trois blocs permettant de définir les conditions de simulation :

- Le bloc « Working Point »,
- Le bloc « Illumination »,
- Le bloc « Series and Shunt Resistance »,

Présentés respectivement dans les figures III-3, III-4 et III-5. En plus de ces blocs, UN autre bloc appelé « Action » permet de spécifier les grandeurs à calculer.

-Bloc Working Point :

Ce bloc permet de définir les conditions de l'expérience ainsi que les points de fonctionnement de la simulation. Il comporte plusieurs champs impor-

tant :

Temperature (T) : C'est la température de la cellule ou du dispositif photovoltaïque.

Dans SCAPS, seules certaines grandeurs dépendent explicitement de la température :

- o Les densités d'états dans les bandes de conduction et de valence ($N_c(T)$, $N_v(T)$),
- o Les Vitesse thermiques,
- o Le voltage thermique (kT),
- o Et tous les paramètres qui en dérivent.

Pour chaque température T que vous souhaitez simuler, vous devez entrer manuellement les paramètres correspondants du matériau (car SCAPS ne les ajuste pas automatiquement).

Voltage (V) :

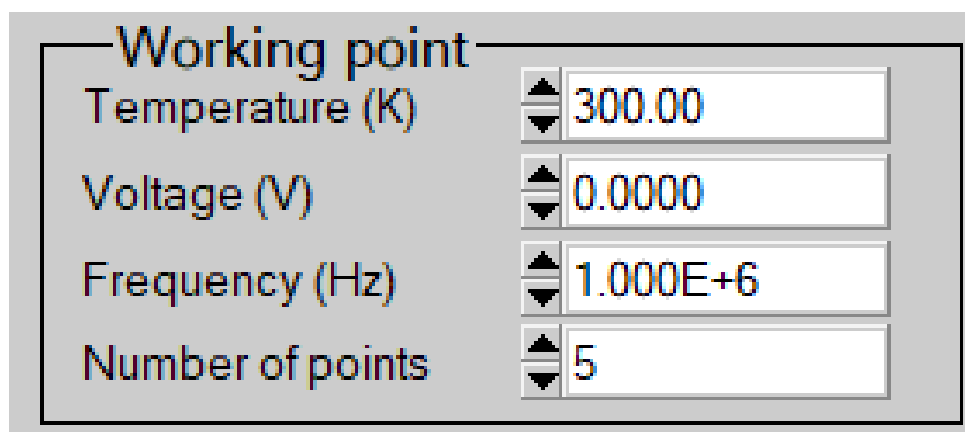
Ce champ ne s'applique pas aux simulations I-V (courant-tension) ni aux simulations C-V (capacité-tension).

Il est utilisé dans les simulations C-f (capacité-fréquence) et $QE()$ (rendement quantique en fonction de la longueur d'onde).

SCAPS commence toujours les calculs à 0V, puis simule progressivement jusqu'au voltage spécifié comme point de fonctionnement, en un nombre d'étapes à définir.

Fréquence (f) :

ce champ est utilisé uniquement pour les simulations C-V, pas pour les I-V, $QE()$, ni C-f.



Working point	
Temperature (K)	300.00
Voltage (V)	0.0000
Frequency (Hz)	1.000E+6
Number of points	5

FIGURE III.3 – bloc working point.

Il permet de fixer la fréquence à laquelle la courbe C-V est calculée.

-Bloc Illumination : Ce bloc permet de contrôler les conditions d'éclairement de la cellule. Il contient plusieurs paramètres pour simuler l'effet de la lumière :

Activation de la source lumineuse :

Vous pouvez choisir d'activer ou de désactiver l'éclairage pendant la simulation (par exemple pour comparer entre conditions sombres et éclairées).

Spectre lumineux :

Vous pouvez sélectionner un spectre monochromatique (lumière d'une seule longueur d'onde) ou polychromatique (lumière contenant plusieurs longueurs d'onde, comme la lumière solaire).

Longueurs d'onde :

Ce champ permet de définir quelles longueurs d'onde sont utilisées dans la simulation, ce qui est essentiel pour les calculs de $QE()$. Vous pouvez simuler différentes sources lumineuses, y compris le spectre solaire AM1.5, couramment utilisé pour représenter la lumière du soleil à la surface terrestre.

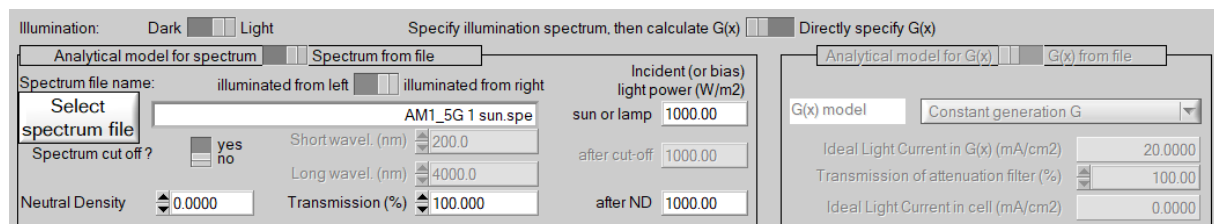


FIGURE III.4 – Bloc illumination.

-Bloc Résistance série ET shunt (parallèle) : Ce bloc permet de définir deux résistances parasites importantes dans la simulation d'une cellule photovoltaïque :

la résistance série (R_s) et la résistance shunt ou parallèle (R_{sh}).

Ces deux paramètres ont un impact direct sur la courbe I-V (courant-tension) de la cellule, car ils représentent des pertes ohmiques.

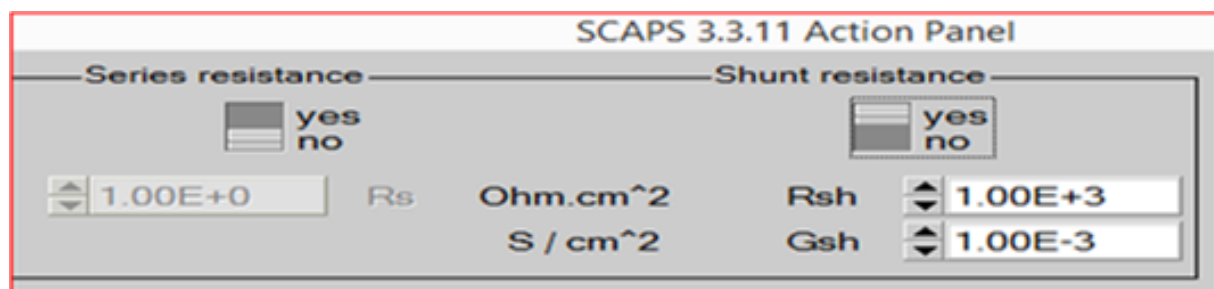


FIGURE III.5 – Résistance série et parallèle.

- *Bloc « Action »* : On peut donc grâce à ce bloc sélectionner les grandeurs voulus afin de les simuler en effet :
 - On peut mesurer la caractéristique I-V en replissant les champs associés : le point initial, le pas et le nombre de point qui s'affiche automatiquement.
 - Idem pour la capacitance-voltage, capacitance-fréquence et la
 - Réponse spectrale. On peut donc grâce à ce bloc sélectionner les grandeurs voulus afin de les simuler en effet :
 - On peut mesurer la caractéristique I-V en replissant les champs associés : le point initial, le pas et le nombre de point qui s'affiche automatiquement.
 - Idem pour la capacitance-voltage, capacitance-fréquence et la
 - Réponse spectrale.

Action		<input type="checkbox"/> Pause at each step		number of points		
<input checked="" type="checkbox"/> I-V	V1 (V) <input type="text" value="0.0000"/>	V2 (V) <input type="text" value="1.4000"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Stop after Voc	<input type="text" value="71"/>	<input type="text" value="0.0200"/>	increment (V)
<input type="checkbox"/> C-V	V1 (V) <input type="text" value="-0.8000"/>	V2 (V) <input type="text" value="0.8000"/>		<input type="text" value="81"/>	<input type="text" value="0.0200"/>	increment (V)
<input type="checkbox"/> C-f	f1 (Hz) <input type="text" value="1.000E+2"/>	f2 (Hz) <input type="text" value="1.000E+6"/>		<input type="text" value="21"/>	<input type="text" value="5"/>	points per decade
<input type="checkbox"/> QE (IPCE)	WL1 (nm) <input type="text" value="300.00"/>	WL2 (nm) <input type="text" value="900.00"/>		<input type="text" value="61"/>	<input type="text" value="10.00"/>	increment (nm)

FIGURE III.6 – bloc d'action.

Dans cette fenêtre (voir la figure III-7), SCAPS permet de définir la structure du dispositif photovoltaïque à simuler. Deux méthodes principales sont disponibles :

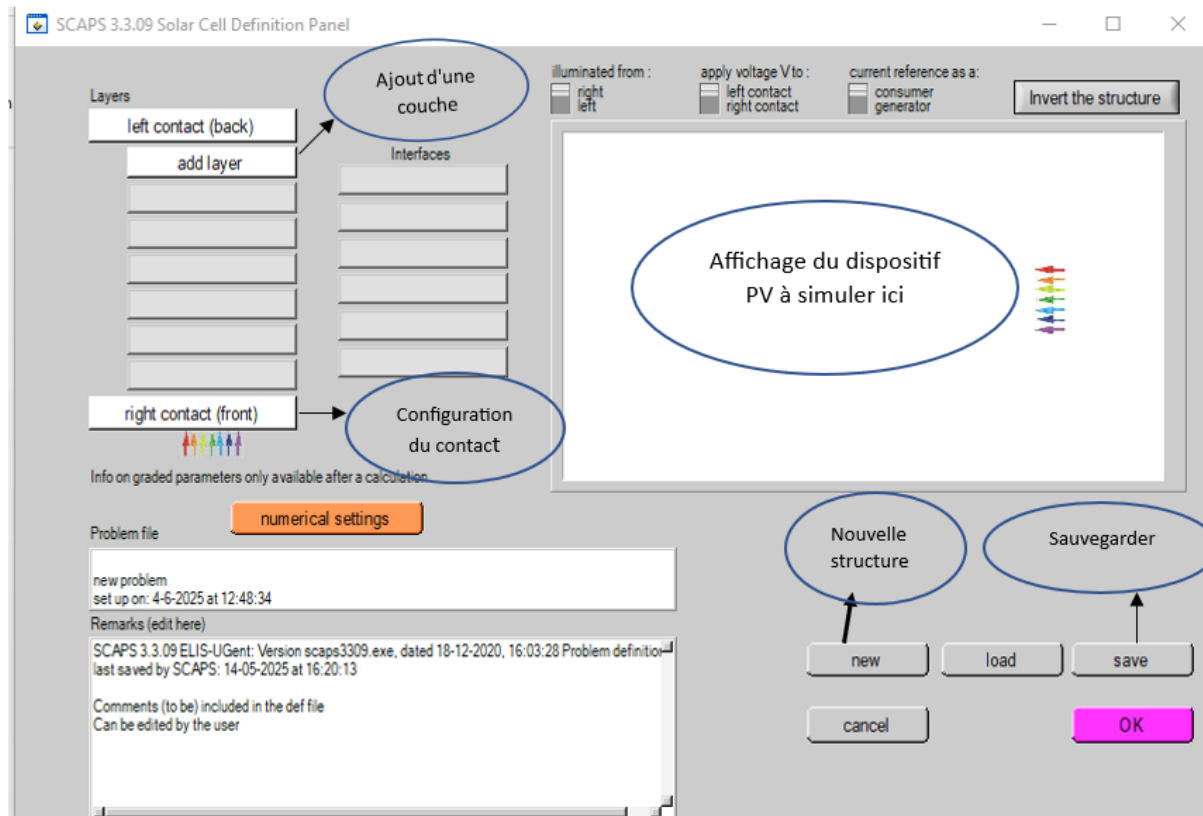


FIGURE III.7 – Fenêtre de définition, définition panel.

New

Pour créer de nouveaux dispositifs photovoltaïques à travers des champs spécifiques, à savoir :

Add layer : une fenêtre affiche lorsque l'utilisateur clique sur ce bouton. Elle contient plusieurs paramètres comme énergie de gap, permittivité électrique, l'affinité, dopage, type de dopage.

LAYER 2		P-CIGS
thickness (μm)		1.000
		uniform pure A(y=0)
The layer is pure A: y = 0, uniform		0.000
Semiconductor Property P of the pure material		pure A(y = 0)
bandgap (eV)		1.100
electron affinity (eV)		4.200
dielectric permittivity (relative)		13.600
CB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)		2.200E+18
VB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)		1.800E+19
electron thermal velocity (cm/s)		1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)		1.000E+7
electron mobility (cm^2/Vs)		1.000E+2
hole mobility (cm^2/Vs)		2.500E+1
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons	1.000E+0
	effective mass of holes	1.000E+0
no ND grading (uniform)		
shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$)		0.000E+0
no NA grading (uniform)		
shallow uniform acceptor density NA ($1/\text{cm}^3$)		1.000E+16
Absorption interpolation model		
alpha pure A material (y=0)		show
from file <input type="checkbox"/> from model <input checked="" type="checkbox"/>		save
Set absorption model		
List of absorption submodels present: sqrt(hv-Eg) law (SCAPS traditional)		

FIGURE III.8 – Propriétés de la couche ajoutée.

Figure III.8 : Propriétés de la couche ajoutée.

- Save : afin de sauvegarder la cellule à étudier.
- Load : afin de sélectionner une cellule déjà sauvegarder.
- Ok : approuver la cellule construite et revenir au panneau d'action pour finir le travail.
- Right et left contact : afin de modifier les paramètres des surfaces extérieurs gauche et droite de la cellule.

- Cancel : décliner le panneau de définition et revenir au panneau d'action.

III.3.3 Fenêtre des résultats

Après les calculs, SCAPS affiche le panneau du diagramme de bande d'énergie, comme illustré à la Figure III.09.

Ce panneau permet de visualiser les profils de bande, les densités de porteurs libres ainsi que la densité de courant, correspondant au dernier point de polarisation simulé. Pour examiner les résultats à des tensions intermédiaires, il est possible d'utiliser le bouton Pause dans le panneau d'action. Les résultats peuvent être affichés à l'aide des commandes PRINT, SAVE GRAPHS, et SHOW, après quoi les valeurs s'affichent à l'écran. Il est également possible de copier les données vers un logiciel tel qu'Excel ou Origin, ou encore de les enregistrer dans un fichier de données.[42]

Les grandeurs simulées sont :

- Caractéristique I-V.
- Capacitance en fonction de la tension « C-V ».
- Capacitance en fonction de la fréquence « C-f ».
- Rendement quantique Q-E.
- Bande d'énergie « Energy band » et bande d'énergie en régime alternatif «AC Band ».

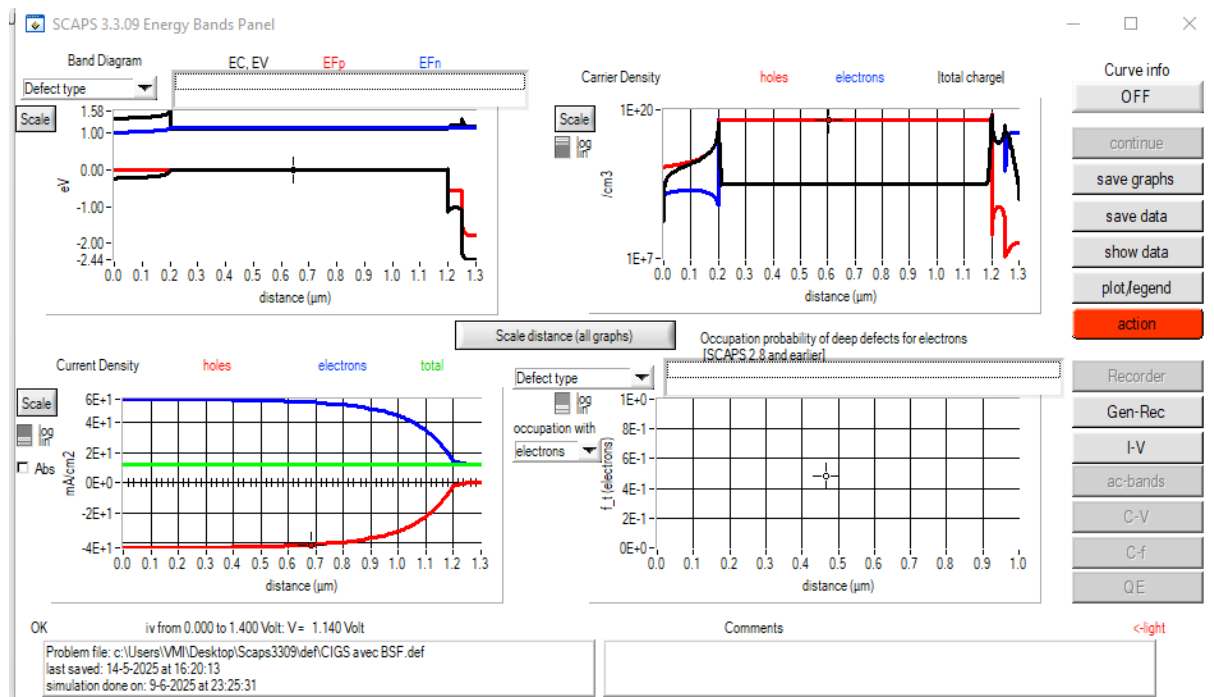


FIGURE III.9 – Propriétés de la couche ajoutée.

III.4 Protocole de simulation

Le protocole de simulation d'une cellule solaire par logiciel SCAPS est comme suit :

- Etape 1 : après le lancement du logiciel et l'ouverture de la fenêtre d'exécution on modifie les paramètres : la température, illumination... etc.
- Etape 2 : modifier la structure de la cellule à travers la fenêtre « définition panel ».
- Etape 3 : exécuter la simulation « calculate », noter les résultats de simulation (V_{oc} , J_{sc} , FF, η dans la fenêtre « I-V panel », la caractéristique I-V. On peut encore afficher et copier ces résultats sous forme de tableau en appuyant « show ».

III.5 présentations de la simulation

La cellule solaire étudiée est composée des couches minces organisées selon la séquence suivante : TCO / SnO_2 / CIGS / Sb_2S_3 / verre. Le schéma simplifié de cette cellule est représenté sur la figure III.10.

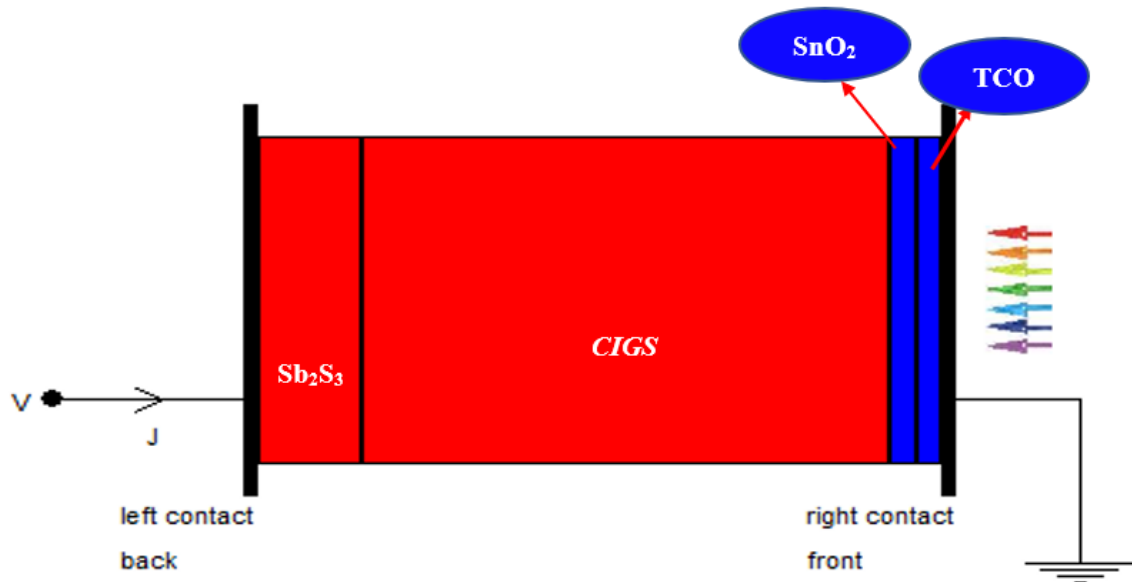


FIGURE III.10 – Schéma simplifié d'une cellule utilisée ayant la structure (TCO / SnO_2 / CIGS / Sb_2S_3).

III.6 Les paramètres du dispositif étudié

Les paramètres des différents matériaux utilisés dans cette simulation sont regroupés sur le tableau III.1

Propriétés	Couches			
	TCO	SnO	CIGS	SbS
Épaisseur (μm)	0.05	0.05	3.5	0.35
Énergie de gap (eV)	3.6	2.24	1.1	1.62
Affinité électrique (eV)	4	4.24	4.2	3.7
Constante diélectrique	9	13.6	13.6	7.08
Densité N_c (cm^{-3})	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.0×10^{19}
Densité N_v (cm^{-3})	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.00×10^{19}
μ_e ($cm^2/V.s$)	100	50	100	9.8
μ_h ($cm^2/V.s$)	25	50	25	10
Donneur N_D (cm^{-3})	1.0×10^{18}	1.0×10^{16}	0	0
Accepteur N_A (cm^{-3})	0	0	1.0×10^{20}	1.0×10^{20}

TABLE III.1 – Les paramètres des différents matériaux utilisés pour la simulation [43]

III.7 Résultat de la simulation

Pour analyser les performances des cellules solaires en fonction de l'épaisseur et du dopage des couches de matériaux on calcule la caractéristique (J-V), le potentiel de circuit ouvert V_{OC} , densité de courant de court-circuit J_{SC} , le facteur de forme (FF) et le rendement électrique (η).

III.7.1 l'effet de l'épaisseur et du dopage de la couche CIGS sans BSF

L'influence de l'épaisseur et du dopage de la couche de CIGS sur les performances de la cellule a été analysée pour des valeurs comprises entre $1 \mu m$ et $4.0 \mu m$ pour l'épaisseur et de 10^{16} à $10^{19} cm^{-3}$ pour le dopage. Les résultats de la variation des principaux paramètres de la cellule en fonction de deux paramètres sont illustrés dans la figure III.1

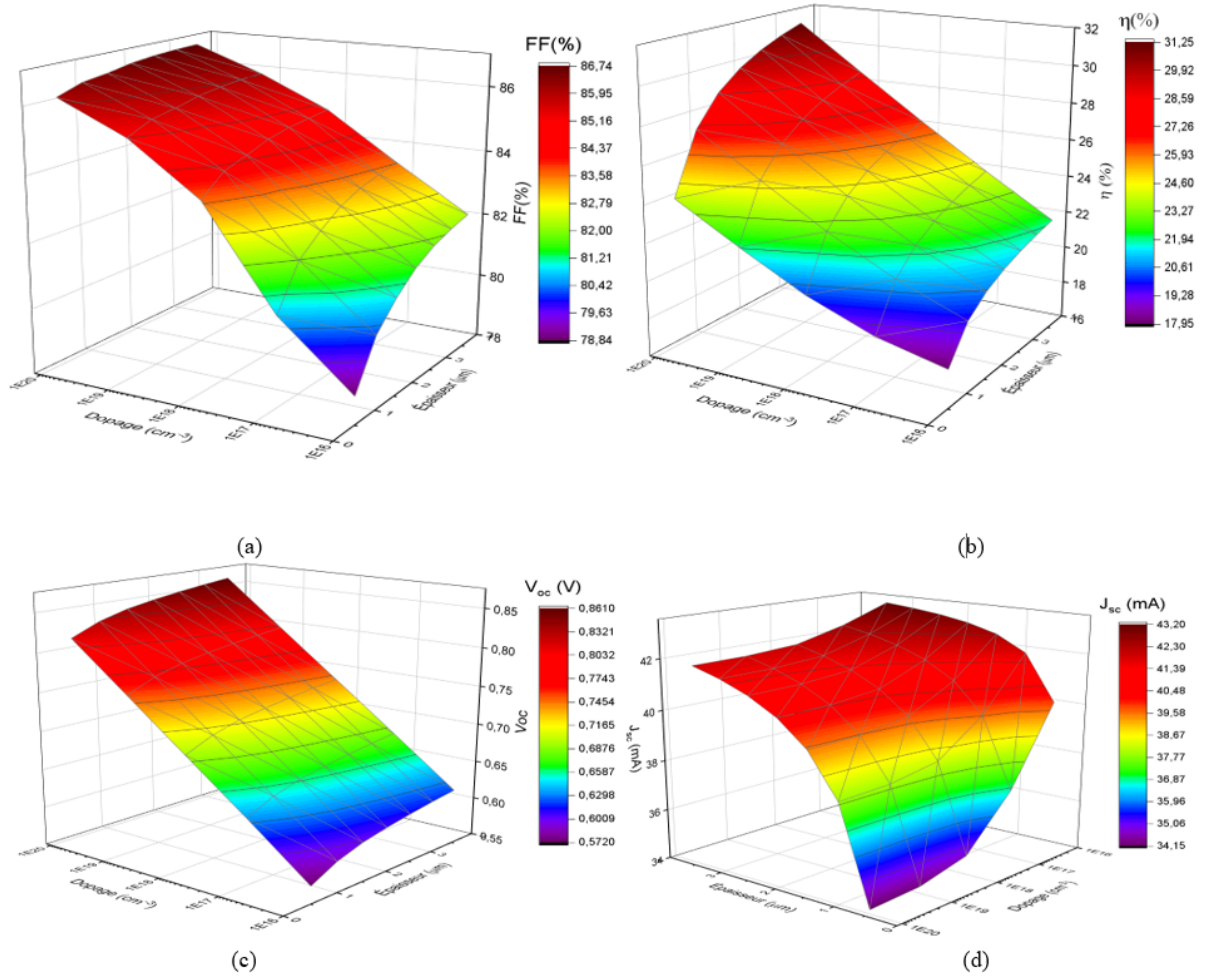


FIGURE III.11 – Effet de la variation de l'épaisseur et du dopage de la couche CIGS sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF , η) de la cellule..

En variant l'épaisseur et le dopage de la couche, les résultats montrent la dépendance FF , V_{oc} , J_{sc} et η de la cellule en fonction de ces deux paramètres. la variation de FF , V_{oc} , J_{sc} et η en fonction de l'épaisseur et du dopage de la couche est comme suite :

- Le facteur de forme FF augmente à la fois avec l'augmentation de la concentration de dopage et de l'épaisseur de la couche absorbante. Il passe de 78,84% pour une épaisseur de 1,2 μm et un dopage de $10^{16} cm^{-3}$ à 86,74 % pour une épaisseur de 3,8 μm et un dopage de $10^{20} cm^{-3}$. Il est à noter que l'influence de l'épaisseur sur le FF diminue à mesure que la concentration de dopage augmente. En effet, pour les fortes valeurs de dopage, le FF devient pratiquement indépendant de l'épaisseur. De manière générale, les meilleurs facteurs de forme sont obtenus pour des combinaisons de dopages élevés et de grandes épaisseurs. Ces résultats sont en bon accord avec les données rapportées dans la littérature [43,44].

- Le rendement de conversion η de la cellule solaire augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche active ainsi que de la concentration du dopage accepteur (N_A). Il passe de 17,95% dans le cas d'une faible épaisseur $1,5 \mu m$ et d'un faible dopage $10^{16} cm^{-3}$ à une valeur maximale de 31,25% lorsque l'épaisseur atteint $4 \mu m$ et la concentration de dopage $10^{20} cm^{-3}$. Cette amélioration peut s'expliquer par une meilleure collecte des photons grâce à l'augmentation de l'épaisseur, ce qui contribue à une augmentation dans la génération des paires électron-trou. En outre, forte dopage contribue à une augmentation des porteurs de charge, contribuant également à un accroissement du rendement. L'évolution du rendement en fonction de ces deux paramètres est globalement conforme aux résultats rapportés dans la littérature scientifique pour des valeurs faibles de N_A ($N_A=10^{16} cm^{-3}$) [43–46]. Toutefois, dans le cas du fort dopage, il convient de noter que notre modèle ne prend pas en compte les recombinaisons Auger, mécanisme réputé significatif au cas de forte dopants. En négligeant cet effet, le rendement continue d'augmenter alors qu'en réalité, une saturation voire une diminution du rendement pourrait être observée en raison de la recombinaison non radiative accrue [45, 46].

-L'épaisseur de la couche absorbante n'influe pas trop sur la tension en circuit ouvert V_{oc} , celle-ci évoluant de 0,56 V à 0,61 V pour une concentration de dopage de $10^{16} cm^{-3}$. En revanche, le V_{oc} présente une forte sensibilité vis-à-vis du dopage : pour une variation de ce dernier, elle peut passer de 0,56 V à 0,82 V, pour une épaisseur de $1 \mu m$. Cette dépendance s'explique par l'influence du dopage sur la position des niveaux de Fermi des porteurs de charge. En effet, le V_{oc} est étroitement lié à la différence de potentiel des niveaux de quasi-Fermi entre les électrons et les trous, laquelle est directement affectée par la concentration de dopage. Ainsi, une augmentation du dopage modifie significativement les niveaux d'énergie dans la cellule, contribuant à une élévation de la tension en circuit ouvert.

-La densité de courant J_{sc} augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante, tandis qu'elle diminue avec l'augmentation de N_A . La diminution de J_{sc} en fonction de N_A est moins marquée avec l'augmentation de l'épaisseur. Par exemple, pour une épaisseur de la couche égale à $1 \mu m$ J_{sc} diminue de $40 mA/cm^2$ pour $N_A=10^{16} cm^{-3}$ à $34.15 mA/cm^2$ pour $N_A=10^{20} cm^{-3}$. En revanche, pour une épaisseur de $4 \mu m$ il passe $43.20 mA/cm^2$ à $42.0 mA/cm^2$ pour les mêmes valeurs de dopage.

Les paramètres physiques de la couche CIGS ayant permis d'obtenir le meilleur rendement sont une épaisseur $4\mu m$ et une concentration de dopage ($N_A=10^{20} cm^{-3}$). Les principaux paramètres de cellule optimisées sont récapitulés sur le tableau III.2

η (%)	FF (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)
31.35	86.74	0.861	43.20

TABLE III.2 – Les valeurs des principaux paramètres électrique de la cellule optimisée sans BSF

III.7.2 l'effet de l'épaisseur et du dopage de la couche CIGS avec BSF

De manière générale, l'ajout d'une couche de type Back Surface Field (BSF) à l'arrière de la cellule, entre la couche absorbante et le contact métallique, permet de réduire significativement la recombinaison des porteurs de charge. Cette réduction est obtenue soit par la création d'un champ électrique, soit par l'établissement d'une barrière de potentiel qui repousse les porteurs minoritaires hors de la zone proche du contact métallique, laquelle est généralement caractérisée par un fort taux de recombinaison. Dans ce travail, la structure de la cellule étudiée précédemment a été modifiée par l'introduction d'une couche BSF constituée de Sb_2S_3 d'épaisseur $d=0.2\mu m$ et une concentration de dopage $N_A=10^{15} cm^{-3}$. L'effet de l'addition de cette couche sur les principaux paramètres électriques de la cellule est présenté dans la figure III.12.

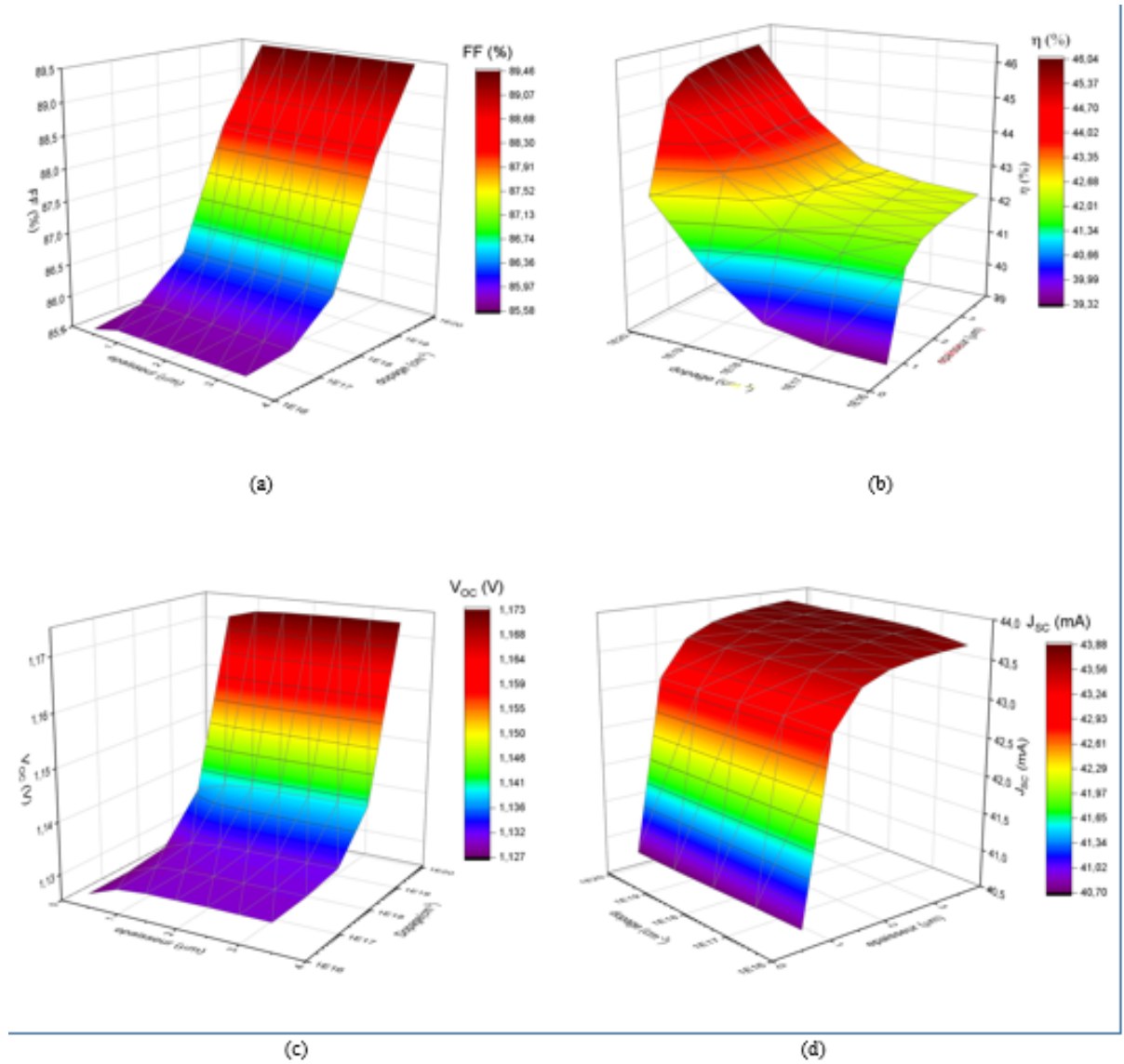


FIGURE III.12 – Effet de la variation de l'épaisseur et du dopage de la couche CIGS sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF , η) de la cellule avec BSF.

La variation des principaux paramètres de la cellule avec BSF en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche CIGS et sa concentration de dopage est illustrée sur la figure III.12. Les résultats montrent une nette amélioration dans tous les paramètres de la cellule. La variation de chaque paramètre en fonction de l'épaisseur et de dopage de la couche CIGS se qualifier comme suite :

- le facteur de forme FF ne dépend pas significativement de l'épaisseur de la couche, mais il est fortement influencé par la concentration de dopage. Les valeurs obtenues pour ce paramètre sont nettement supérieures à celles observées pour la cellule sans couche BSF. En effet, le FF débute à 85.58 %, une valeur déjà élevée pour de faibles concentrations de dopage, et atteint

jusqu'à 89,5 % pour des dopages plus élevés. Cette amélioration traduit clairement une meilleure efficacité de la collecte des porteurs de charge à l'arrière de la cellule, résultant de la présence de la couche BSF. Celle-ci contribue à réduire les pertes par recombinaison au niveau du contact arrière, renforçant ainsi les performances globales de la cellule.

-Le rendement de conversion η est également significativement amélioré par l'introduction de la couche BSF, en comparaison avec la structure sans BSF. Pour une faible épaisseur et un faible dopage une amélioration exceptionnelle du rendement est enregistrée, le rendement passe de 17,94 % (sans BSF) à 39,22 % (avec BSF). Dans le cas d'un dopage et d'une épaisseur élevés, le rendement atteint 46 % avec BSF, contre 31,25 % sans BSF soit une améliorations d'environ 50%. Par ailleurs, la variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS met en évidence un seuil optimal aux alentours de $d_s \sim 2\mu m$. Ce résultat suggère que l'intégration d'une couche BSF permet non seulement d'améliorer les performances de la cellule, mais également de réduire la quantité de matériau CIGS nécessaire, contribuant ainsi à une diminution des coûts de fabrication.

-Pour le cas du V_{oc} , l'ajoute de la couche BSF a entraîné à une amélioration significatif de ce paramètre par rapport à la cellule sans BSF, en particulier pour le cas de faibles N_A . Ainsi le V_{oc} passe de 1.127V pour le cas faible dopage à 1.173V pour le cas de forte dopage contre une variation de 0.55V à 0.85V pour la même plage de dopage. Les résultats obtenus montrent également que le V_{oc} devient pratiquement indépendant de l'épaisseur de la couche active lorsque le dopage est élevé. Ces observations sont en bon accord avec celles rapportées dans les références [46] et [47], confirmant ainsi la pertinence de l'intégration de la couche BSF pour optimiser les performances électriques des cellules solaires dans les conditions étudiées.

-L'ajout de la couche BSF conduit également à une amélioration des valeurs de la densité de courant de court-circuit J_{sc} , notamment dans le cas de fortes concentrations de dopage. Contrairement à la structure sans BSF, pour le cas de la cellule avec BSF, J_{sc} dépend principalement que de l'épaisseur de la couche absorbante. Les résultats montrent que J_{sc} atteint un seuil autour de $d_s \sim 2\mu m$, au-delà duquel il devient pratiquement constant. Ces observations confirment l'efficacité de la couche BSF dans l'optimisation de la collecte des porteurs, en réduisant les pertes par recombinaison à l'arrière de la cellule. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux rapportés

dans les références [46] et [47]. Globalement les résultats montrent que l'ajout d'une couche arrière BSF peut vraiment être un atout pour augmenter les performances électriques de la cellule solaire à base de CIGS et réduire son cout de fabrication.

III.7.3 l'effet de l'épaisseur et du dopage de la couche arriere BSF (Sb_2S_3)

Afin d'optimiser les paramètres physiques de la couche BSF pour avoir de meilleurs performance de la cellule solaire, on a simulé la variation des principales grandeurs électriques de la cellule (J_{SC} , V_{oc} , FF et η) en fonction de l'épaisseur et le dopage de la couche BSF , Les résultats de cette simulation sont représentés dans la figure III.13.

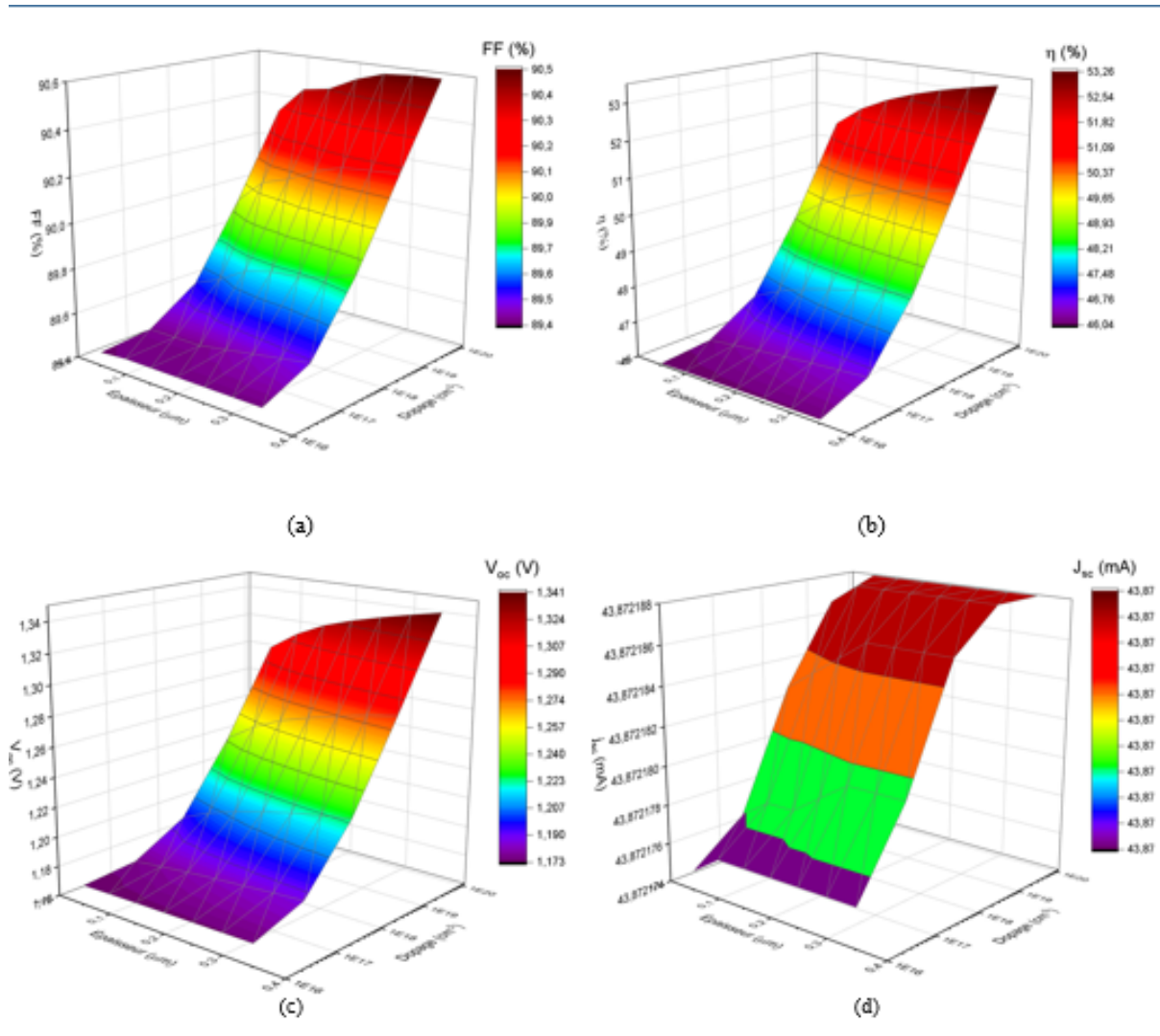


FIGURE III.13 – Variation des paramètres électrique (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule en fonction de variation de l'épaisseur et du dopage de la couche BSF .

Les résultats montrent que :

-Le facteur de forme (FF) augmente à la fois avec l'augmentation de la concentration de dopage et de l'épaisseur de la couche BSF. Il passe de 89,4 % pour une épaisseur de $0.05 \mu m$ et un dopage de $10^{16} cm^{-3}$, à 90,5 % pour une épaisseur de $0.35 \mu m$ et un dopage de $10^{20} cm^{-3}$. Une saturation de FF est obtenue pour une épaisseur $d=0.3 \mu m$. De manière générale, les meilleurs facteurs de forme sont obtenus pour des combinaisons de dopages élevés et de grandes épaisseurs.

-Le rendement de conversion η de la cellule solaire s'améliore avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche BSF ainsi qu'avec la concentration en dopage accepteur N_A . Toutefois, l'effet du dopage sur le rendement est plus marqué que celui de l'épaisseur. De manière générale, η passe de 46,04 % pour une faible épaisseur ($0,05 \mu m$) et un dopage de $10^{16} cm^{-3}$, à une valeur maximale de 53,26 % lorsque l'épaisseur atteint $0,3 \mu m$ et le dopage $10^{16} cm^{-3}$. Cette amélioration s'explique par une réduction significative de la recombinaison des porteurs de charge au niveau du contact arrière, due à la présence de la couche BSF, ainsi que par une augmentation de la densité de porteurs de charge dans cette même couche. L'analyse de l'évolution du rendement en fonction de ces deux paramètres montre que les performances optimales sont obtenues avec une couche BSF fortement dopée $N_A=10^{20} cm^{-3}$ et d'une épaisseur comprise entre $0,05$ et $0,1 \mu m$. Ces résultats sont en bon accord avec les données rapportées dans la littérature [47].

-L'influence de l'épaisseur de la couche BSF sur la tension en circuit ouvert V_{oc} est négligeable, en particulier dans le cas de faible dopage, où V_{oc} demeure pratiquement indépendant de ce paramètre. Par contre V_{oc} dépend du dopage de la couche BSF, il augmente avec l'augmentation du dopage de cette dernière. Cette dépendance s'explique par l'influence du dopage sur la position des quasi niveaux de Fermi des porteurs de charge. Ainsi, une augmentation du dopage modifie significativement les niveaux d'énergie dans la cellule, contribuant à une élévation de la tension en circuit ouvert.

-La densité de courant J_{sc} n'est influencée par l'augmentation de l'épaisseur et le dopage de la couche BSF.

Les paramètres physiques de la couche BSF ayant permis d'obtenir le meilleur rendement sont une épaisseur $0.5\mu m$ et une concentration de dopage $N_A=10^{20} cm^{-3}$. Les principaux paramètres de cellule optimisés sont récapitulés sur le tableau III.3

η (%)	FF (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA/cm ²)
53.26	90.5	1.34	43.87

TABLE III.3 – Les valeurs des principaux paramètres électrique de la cellule optimisée avec BSF

III.7.4 l'impact des défauts d'interface sur la cellule solaire

Afin de rendre le modèle mathématique de la cellule solaire plus représentatif des conditions réelles, nous avons étudié l'effet de la présence de défauts aux interfaces CIGS/ SnO_2 et CIGS/ Sb_2S_3 .

Pour cette analyse, nous avons repris la structure optimisée de la cellule intégrant une couche BSF, puis nous avons fait varier la densité des défauts d'interface dans une plage allant de $10^{11} cm^{-2}$ jusqu'à $10^{16} cm^{-2}$. L'impact de cette variation sur les principaux paramètres électriques de la cellule (tels que le V_{oc} , le J_{SC} , le facteur de forme et le rendement) est illustré dans la figure III.14.

Cette étude vise à évaluer la sensibilité des performances de la cellule à la qualité des défauts d'interfaces.

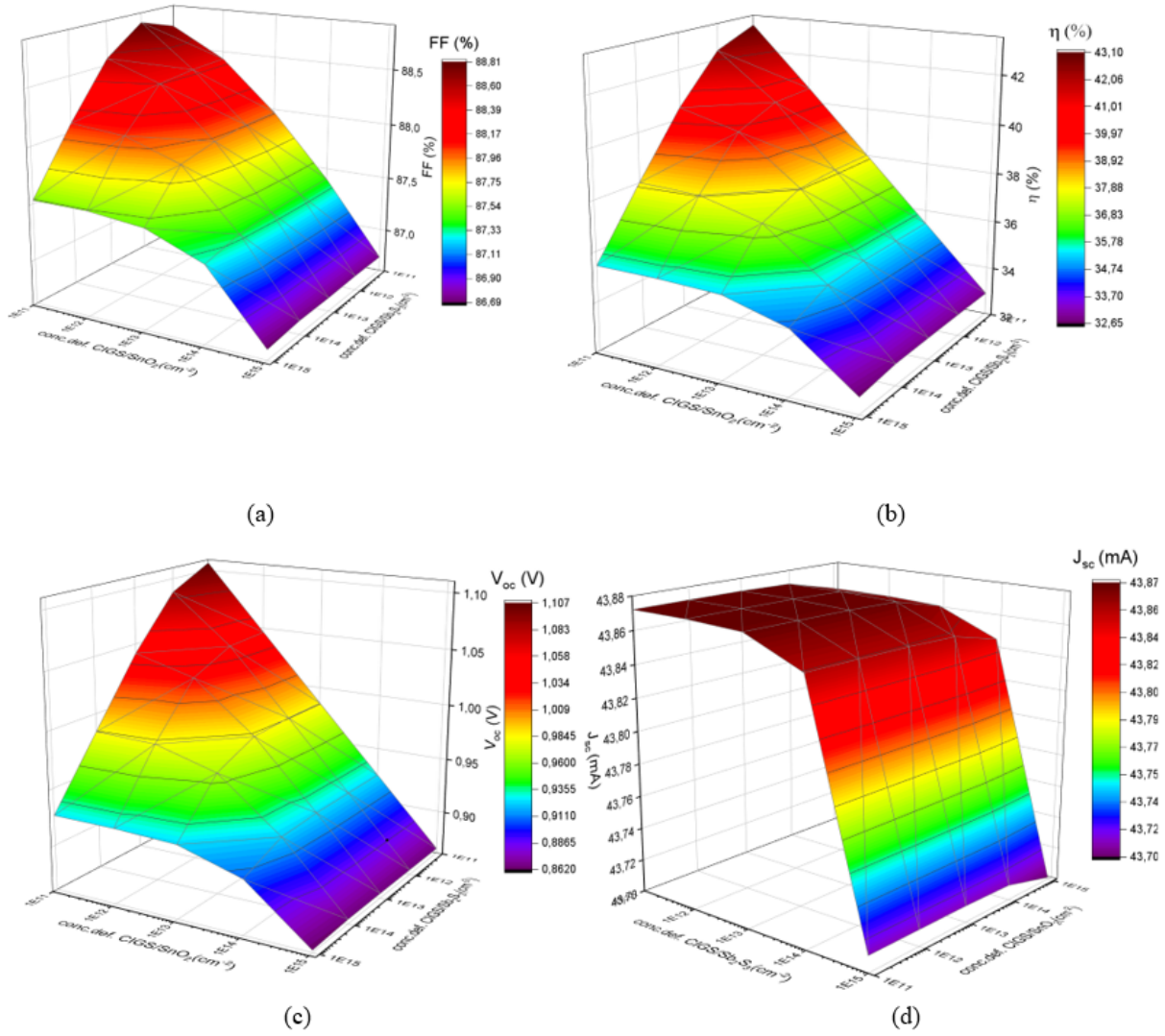


FIGURE III.14 – illustre la Variation des paramètres électrique (J_{sc} , V_{oc} , FF , η) en fonction de la densité des défauts aux interfaces CIGS/ Sb_2S_3 et CIGS/ SnO_2 .

La figure III.14 illustre la variation des principaux paramètres électriques de la cellule solaire en fonction de la densité des défauts aux interfaces CIGS/ Sb_2S_3 et CIGS/ SnO_2 .

De manière générale, les résultats indiquent une dégradation progressive de tous les paramètres de performance de la cellule à mesure que la densité de défauts d'interface augmente, et ce, même pour des concentrations relativement faibles. Par exemple, le rendement de conversion η diminue de 53,26 % à 43,10 %, la tension en circuit ouvert V_{oc} chute de 1,341 V à 1,107 V, et le facteur de forme (FF) passe de 90,5 % à 88,81 % pour une 10^{11} cm^{-2} .

Ces résultats soulignent l'impact critique de la qualité des interfaces sur les performances globales de la cellule, mettant en évidence la nécessité de maîtriser les procédés de fabrication afin de minimiser la densité de défauts

interfaciaux.

-Le facteur de forme FF diminue progressivement avec l'augmentation de la densité des défauts d'interface. Il passe de 88,81 % pour une densité de 10^{11} cm^{-2} à 86,69 % pour une densité de 10^{15} cm^{-2} . Il est important de noter que le FF est relativement peu sensible aux défauts situés à l'interface CIGS/ SnO_2 , en particulier lorsque leur concentration est faible. En revanche, il se révèle fortement dépendant des défauts présents à l'interface CIGS/ Sb_2S_3 , et ce, quelle que soit leur densité. Cette sensibilité accrue s'explique probablement par le rôle critique que joue cette interface dans la collecte efficace des porteurs de charge au niveau du contact arrière.

Le rendement de conversion η diminue significativement avec l'augmentation de la densité des défauts aux interfaces, en particulier pour les fortes concentrations. Par exemple, une densité de défauts de l'ordre de 10^{15} cm^{-2} entraîne une perte d'environ 40 % du rendement initial de la cellule. Cette perte croît fortement avec l'augmentation de la densité de défaut ou on constate la détérioration totale des propriétés électriques de la cellule pour une densité de défaut de l'ordre de 10^{16} cm^{-2} . Une tendance similaire est observée pour la dépendance du rendement vis-à-vis des défauts à l'interface CIGS/ SnO_2 , bien que l'impact soit généralement moins prononcé que celui observé pour l'interface CIGS/ Sb_2S_3 .

-Le V_{oc} diminue également avec l'augmentation de la densité des défauts aux interfaces, en particulier pour les fortes concentrations. Par exemple, Il passe de 1.107V pour une densité de 10^{11} cm^{-2} à 0.8620V pour une densité de 10^{15} cm^{-2} .

-La densité de courant de court-circuit (J_{sc}) n'est que faiblement affectée par la présence de défauts aux interfaces, en particulier ceux situés à l'interface CIGS/ SnO_2 , où son influence reste négligeable. En revanche, une légère sensibilité est observée vis-à-vis des défauts présents à l'interface CIGS/ Sb_2S_3 , traduisant une perte modérée de performance liée à une réduction partielle de l'efficacité de collecte des porteurs générés par la lumière. Toutefois, cette influence demeure moins marquée que celle observée sur le V_{oc} ou le rendement global.

Les résultats obtenus mettent en évidence que les performances de la cellule solaire notamment la tension en circuit ouvert (V_{oc}), la densité de courant

de court-circuit (J_{sc}), le facteur de forme (FF), et rendement électrique (η) sont fortement influencées par la densité des défauts d'interface, aussi bien à l'interface CIGS/ SnO_2 qu'à l'interface CIGS/ Sb_2S_3 . Cette influence est particulièrement marquée pour le cas des défauts situés à l'interface CIGS/ Sb_2S_3 . Les défauts d'interface jouent un rôle déterminant dans la réduction de l'efficacité de la cellule, en favorisant les mécanismes de recombinaison des porteurs de charge. Les résultats démontrent clairement que, même en présence d'une couche BSF destinée à améliorer la collecte des porteurs minoritaires, la présence de défauts aux interfaces affecte de manière significative les performances électriques de la cellule. Cela souligne l'importance cruciale d'un contrôle rigoureux de la qualité des interfaces lors de la fabrication des cellules solaires à base du CIGS.

III.7.5 l'impact des défauts de volume de la couche CIGS sur la cellule solaire

La formation de défauts au cours de l'élaboration des matériaux constitue une réalité inévitable, indépendamment de la méthode de synthèse employée. Par ailleurs, les différentes étapes technologiques impliquées dans la fabrication des cellules solaires telles que les traitements thermiques à haute température et les procédés chimiques contribuent à l'apparition de défauts supplémentaires. Étant donné leur caractère inévitable, il est essentiel de comprendre leur impact sur les performances de la cellule, ainsi que d'identifier les seuils de concentration à partir desquels ces défauts commencent à altérer significativement le rendement de la cellule. Dans cette perspective, nous nous intéressons dans ce qui se suit aux défauts de volume présents dans la couche de CIGS, en supposant qu'il s'agit de défauts de type donneur simple avec une densité N_t , leur niveau énergétique se localise au centre de la bande interdite. L'influence de leur concentration sur les principaux paramètres électriques de la cellule solaire (facteur de forme FF, rendement η , tension en circuit ouvert V_{oc} et densité de courant de court-circuit J_{sc}) est illustrée à la figure III.15.

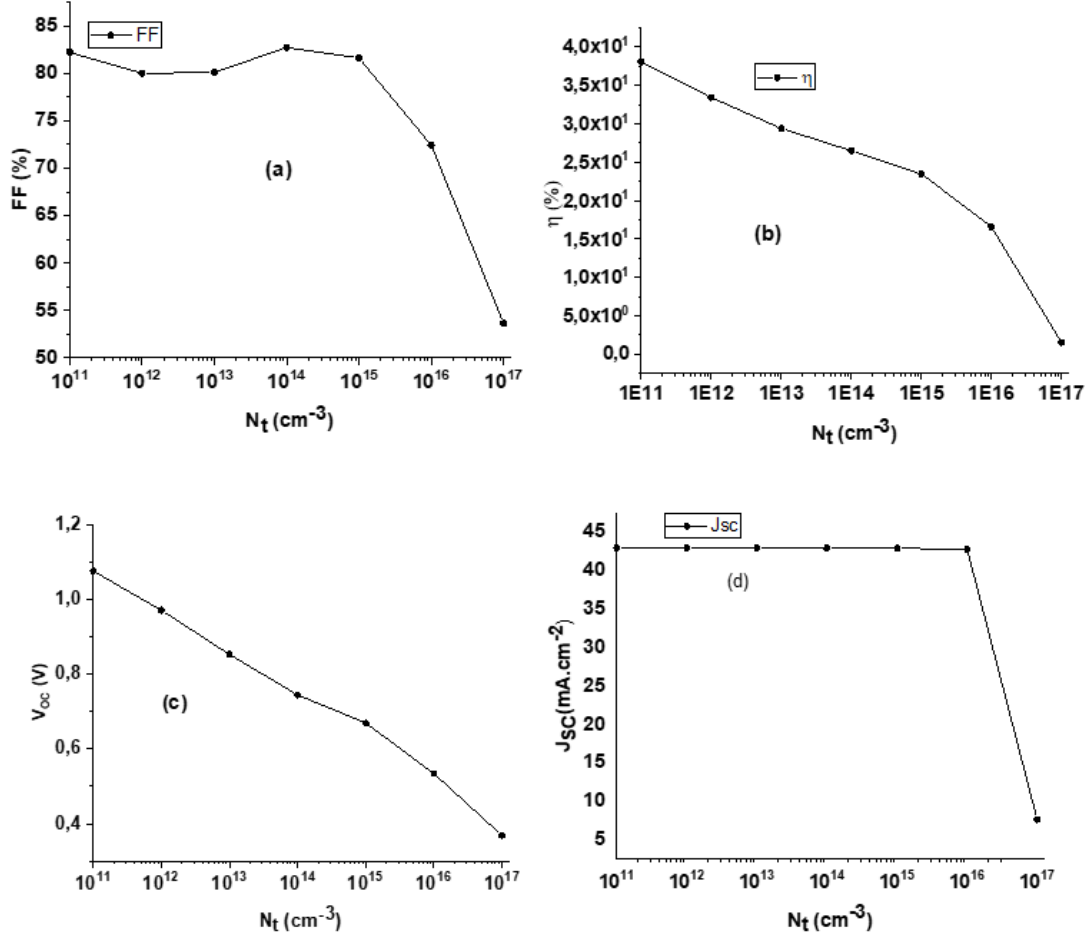


FIGURE III.15 – Effet de variation de la concentration des défauts de volume de la couche CIGS sur les paramètres électrique (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

En faisant varier N_t , de 10^{11}cm^{-3} à 10^{17}cm^{-3} , une dégradation notable de l'ensemble des paramètres électriques est observée, y compris pour des concentrations relativement faibles de N_t . À titre d'exemple, le rendement de conversion η chute de 36 % à 1 %, tandis que la tension en circuit ouvert V_{oc} passe de 1,08 V à 0,36 V sur l'intervalle de variation de N_t . Cette dégradation des performances s'accroît significativement avec l'augmentation de la densité des défauts. Cette dégradation du rendement de collection de la cellule peut être attribuée à l'effet direct des défauts sur la durée de vie des porteurs de charge, laquelle est régie par la relation suivante [48] :

$$\tau_{n(p)} = \frac{1}{\sigma_{n(p)} v_{n(p)} N_t} \quad (\text{III.1})$$

où $\tau_{n(p)}$ la durée de vie de l'électron (trous), $v_{n(p)}$ la vitesse thermique de l'électron (trous), N_t la densités de défauts et $\sigma_{n(p)}$ la section efficace de

capture de de l'électron (trous). L'augmentation de N_t entraîne ainsi une réduction de $n(p)$, ce qui se traduit par une diminution de la longueur de diffusion des porteurs, donnée par :

$$L_{n(p)} = \sqrt{D_{n(p)} \tau_{n(p)}} \quad (\text{III.2})$$

-Le facteur de forme FF présente des fluctuations pour le cas de densité de défauts $N_t \leq 10^{11} \text{cm}^{-3}$ mais au-delà de cette valeur, il diminue rapidement avec l'augmentation de N_t . Cette évolution pour le cas de forte concentrations de défauts témoigne le rôle prédominant des défauts de volume dans le contrôle de la diffusion des porteurs de charge.

-Le rendement diminue progressivement en fonction de N_t dans l'intervalle allant de 10^{14}cm^{-3} à 10^{16}cm^{-3} . Au-delà de cette valeur le rendement chute brutalement pour atteindre une valeur avoisinant 1 % pour $N_t = 10^{16} \text{cm}^{-3}$

- La tension en circuit ouvert de la cellule V_{oc} diminue également avec l'augmentation de N_t , il passe de 1.07V pour $N_t = 10^{11} \text{cm}^{-3}$ à 0.36 V pour $N_t = 10^{17} \text{cm}^{-3}$. -Quant à la densité de courant de court-circuit J_{sc} , elle reste stable jusqu'à la concentration $N_t=10^{16} \text{cm}^{-3}$. Au-delà de cette valeur, une dégradation rapide de J_{sc} est observée.

De manière générale, la présence de défauts de volume induit une dégradation significative des performances électriques de la cellule solaire. Dans le cas étudié, le rendement de conversion diminue de 46,04 % pour une cellule idéale (exempte de défauts) à 38 % pour une cellule présentant une faible densité de défauts, avec $N_t=10^{11} \text{cm}^{-3}$. Ce résultat met en évidence l'impact défavorable des défauts situés dans la couche absorbante sur l'efficacité globale de la cellule. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont en bon accord avec les études rapportées dans la littérature [46, 48–50], soulignant l'importance d'optimiser les conditions d'élaboration des couches minces intervenant dans la fabrication de la cellule solaire.

Conclusion

Dans cette étude, le logiciel SCAPS-1D a été utilisé pour simuler et analyser les différents paramètres électriques d'une cellule solaire à base de CIGS.

L'objectif principal était d'évaluer l'impact de différents paramètres structuraux et physiques sur les caractéristiques photovoltaïques de la cellule. Trois cas ont été particulièrement développés :

- L'influence du dopage et de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS sur le facteur de forme FF, le rendement de conversion η , la tension en circuit ouvert V_{oc} et la densité de courant de court-circuit J_{sc} .
- L'effet de l'ajout d'une couche BSF sur ces mêmes paramètres électriques .
- Enfin, l'impact de la présence de défauts, aussi bien dans le volume de la couche CIGS qu'aux interfaces CIGS/ Sb_2S_3 et CIGS/ SnO_2 , sur les performances de la cellule.

Les résultats obtenus montrent que l'introduction de la couche BSF améliore significativement les performances électriques de la cellule, en renforçant l'efficacité de la collecte des porteurs de charge et en augmentant le rendement global. En revanche, la présence de défauts, qu'ils soient volumiques ou aux interfaces, entraîne une dégradation notable des performances, en particulier une diminution marquée du rendement de conversion, soulignant l'importance d'un contrôle rigoureux de la qualité des matériaux et des interfaces lors de la fabrication.

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons mené une étude de simulation numérique portant sur les propriétés électriques d'une cellule solaire à couches minces à base de CIGS, en utilisant le logiciel SCAPS-1D. Cette étude s'est focalisée principalement sur l'influence de plusieurs paramètres clés : l'épaisseur et la concentration en dopage de la couche absorbante CIGS, l'introduction d'une couche Back Surface Field BSF en face arrière, ainsi que la présence de défauts, volumiques et interfaces (dans la couches CIGS et aux interfaces entre cette couche et la couche tampon et entre cette couche et la couche BSF).

les analyses réalisées ont permis d'évaluer l'effet de ces paramètres sur les caractéristiques électriques fondamentales de la cellule, à savoir le facteur de forme FF, le courant de court-circuit J_{sc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement de conversion η . les résultats ont montré une amélioration significative des performances électrique avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CIGS et de son niveau de dopage. les meilleures performances ont été obtenues pour une épaisseur de $4\mu m$ et un dopage de l'ordre de $10^{20} cm^{-3}$, avec un rendement avoisinant les 31%.

Par ailleurs, l'introduction d'une couche BSF s'est révélée particulièrement bénéfique. En effet, cette couche a permis non seulement d'améliorer les paramètres électriques de la cellule, mais aussi d'augmenter considérablement son rendement, qui passe de 31 % sans BSF à 46 % avec BSF. De plus, l'ajout de la BSF permet d'obtenir d'excellentes performances même avec des épaisseurs plus faibles de la couche CIGS, ce qui ouvre la voie à une réduction des coûts de fabrication par une consommation moindre de matériau. Sur le plan physique, la couche BSF favorise également un meilleur alignement des bandes d'énergie entre la couche absorbante et le contact arrière, facilitant ainsi la collecte des porteurs de charge.

L'optimisation des propriétés de la BSF, notamment son épaisseur et son dopage, a permis d'atteindre un rendement théorique pouvant atteindre 56 % dans le cas d'une cellule idéale, exempte de tout défaut en volumique ou en interfaces. Ces résultats mettent en évidence l'importance cruciale de l'alignement énergétique entre les différentes couches de la cellule pour maximiser la séparation et la collecte des charges.

Enfin, afin de rapprocher la modélisation des conditions expérimentales réelles, nous avons étudié l'impact de la présence de défauts, aussi bien dans le volume des matériaux qu'aux interfaces. Il ressort de cette analyse que ces défauts peuvent dégrader de manière significative les performances de la cellule, en particulier lorsque leur densité est élevée. Dans certains cas, le rendement peut chuter à des valeurs très faibles, soulignant ainsi la nécessité d'un contrôle rigoureux de la qualité des matériaux et des interfaces lors de la fabrication, afin de garantir des performances stables et élevées.

Bibliographie

[1] Zeman, M. (2003). Introduction to photovoltaic solar energy. Delft University of Technology, 2(6), 7-9.

[2] ASTM (2003) Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances : Direct Normal and Hemispherical on 37Tilted Surface. Standard G173-03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. Available from : <http://www.astm.org/Standards/G173.htm> or <http://rredc.nrel.gov/solar/s>

[3] Lang, K.R. (2013). Essential astrophysics. Springer.

[4] Ranabhat, K., Patrikeev, L., Revina, A. A. E., Andrianov, K., Lashinsky, V., Sofronova, E. (2016). An introduction to solar cell technology. Journal of Applied Engineering Science, 14(4).

[5] Smith, R. P., Hwang, A. A. C., Beetz, T., ET Helgren, E. (2018). Introduction to semiconductor processing : Fabrication and characterization of p-n junction silicon solar cells. American Journal of Physics, 86(10), 740-746.

[6] <https://acsolue-energie.fr/wp-content/uploads/2022/11/Shema-cellule-perso-1-scaled-e1667661244763-1024x460.jpg>.

[7] Martinuzi, S. (2007). Les cellules solaires au silicium cristallin. Reflets de la Physique, (5), 8-13.

[8] Kihal, R. (2018). Préparation par électrodéposition de semi-conducteurs en couches minces à base d'étain pour des cellules photovoltaïques [Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma].

[9] Amanaine Amastan, H. (2022). Caractérisation par simulation du photovoltaïques [Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun Tiaret].

[10] Chabane, H. (2015). Etude d'une cellule solaire à base de structure PIN [Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar de Batna].

[11] Kim, M. S., Lee, J. H., et Kwak, M. K. (2020). Review : Surface-texturing methods for solar cell efficiency enhancement. *International Journal of Manufacturing*, 21(7), 1389-1398.

[12] Hasni, H. (2013). Caractérisation automatisée d'une cellule solaire [Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra].

[13] Vighetti, S. (2010). Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : choix et dimensionnement des étages de conversion [Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble].

[14] Pankown, Y. (2004). Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension : Application au générateur photovoltaïque [Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Université de Lille].

[15] Radbeh, R. (2008). Réalisation et caractérisation de cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbone [Thèse de doctorat, Université de Limoges].

[16] Petibon, S. (2009). Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques [Thèse de doctorat, Université Toulouse III- Paul Sabatier].

[17] BOUCHELAGHEM, A. et MERIAI, F. (2021) Étude et simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium nanocristallin : effet des propriétés électroniques de la couche active.[Thèse de doctorat, Université de jijel].

[18] Marouf, Y. (2019). Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra].

[19] Benaouda, N., Aiouaz, R., Abersi, M. (2007). Réponses spectrales et des caractéristiques I-V des cellules solaires au silicium. *Revue des Energies Renouvelables*, ICRES-07, Tlemcen, 145-150.

[20] Kohen, D. (2012). Etudes des nanofils de silicium et de leur intégration dans des systèmes de récupération d'énergie photovoltaïque [Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier*GrenobleI*].

[21] Grau, M. (2012). Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium préparé par frittage de poudres [Thèse de doctorat, INSA de Lyon].

[22] Jha, A. R. (2009). Solar Cell Technology and Applications. CRC Press.

[23] Mahfoud, A. (2018). Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement. [These de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif1].

[24] Mathieu, H., Fanet, H. (2009). Physique des semiconducteurs et des composants électroniques-6ème édition : Cours et exercices corrigés. Dunod.

[25] Sutherland, J. E., Hauser, J. R. (1986). A computer analysis of heterojunction and graded composition solar cells. Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics, 64(1), 193.

[26] Markvart, T., Castañer, L. (Eds.). (2003). Practical handbook of photovoltaics : fundamentals and applications. Elsevier.

[27] <http://www.ines-solaire.com>.

[28] Ammous, K. (2002). "Contribution à la construction systématique des modèles moyens de convertisseurs de puissance". [Institut national des sciences appliquées, Lyon].

[29] Benhaya, A. (2017). " Cellules photovoltaïques. PROCEEDINGS DES 11ERES JOURNEES PORTES OUVERTES SUR LA FACULTE DES SCIENCES EXACTES", [Université Tahri Mohammed de Béchar].

[30] Roger, C. (2013). "Developpement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques". [Doctoral dissertation, Université de Grenoble].

[31] Duchatelet, A. (2012). " Synthèse de couches minces de Cu (In, Ga) Se₂ pour cellules solaires par électrodépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium " [Doctoral dissertation, Lille 1].

[32] Mahamdi, R., Touafek, N. (2015). " Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn_{1-x}Ga_xSe₂".[thèse de doctorat, université de Batna.

[33] AHMED, L. (2021). " Etude et simulation d'une cellule solaire en CIGS par SCAPS". [Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra].

[34] Posada Parra, J. I. (2015). "Optimisation d'un procédé hybride de co-pilvérisation/ évaporation pour l'obtention de cellules solaires à base de Cu (In,Ga)Se₂"[Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie- Paris VI].

[35] Ishizuka, S., Yamada, A., Fons, P., Niki, S. (2013). Texture and morphology variations in (In, Ga) ₂Se₃ and Cu (In, Ga) Se₂ thin films grown with various Se source conditions. Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 21(4), 544-553.

[36] Shin, D. H., Shin, Y. M., Kim, J. H., Ahn, B. T., Yoon, K. H. (2011). Control of the preferred orientation of Cu (In, Ga) Se₂ thin film by the surface modification of Mo film. Journal of The Electrochemical Society, 159(1), B1.

[37] Alvarez García, J. (2002). Characterisation of CuInS₂ films for solar cell applications by Raman Spectroscopy. [Universitat de Barcelona].

[38] Neumann, H., Hörig, W., Reccius, E., Möller, W., Kühn, G. (1978). Temperature dependence of the fundamental absorption edge in CuGaSe₂. Solid State Communications, 27(4), 449-451.

[39] Tassoult, H. (2019). " Effet des défauts intrinsèques dans les absorbeurs CIGS sur les performances des cellules solaires en couches minces". [Thèse de doctorat, université Ferhat Abbas Sétif1].

[40] Daranféd, O., Aida, M. S. (2013). "Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de Cu₂ZnSnS₄". [Thèse de doctorat, université Mentouri de Constantine].

- [41] Burgelman, M., Nollet, P., Degrave, S. (2000). Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. *Thin solid films*, 361, 527-532.
- [42] Burgelman, M., Marlein, J. (2008, September). Analysis of graded band gap solar cells with SCAPS. In *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia* (pp. 2151-2155).
- [43] Zouache, R., Bouchama, I., Saidani, O., Djedoui, L., Zaidi, E. (2022). Numerical study of high-efficiency CIGS solar cells by inserting a BSF $\mu\text{-Si} : \text{H}$ layer. *Journal of Computational Electronics*, 21(6), 1386-1395.
- [44] Ngoy, K. R., Singh, A. K., Jen, T. C. (2021). Impact of doping concentration, thickness, and band-gap on individual layer efficiency of CIGS solar cell. *Functional Materials Letters*, 14(05), 2151022.
- [45] Mabvuer, F. T., Nya, F. T., Dzifack Kenfack, G. M., Laref, A. (2023). Lowering cost approach for CIGS-based solar cell through optimizing band gap profile and doping of stacked active Layers SCAPS modeling. *ACS omega*, 8(4), 3917-3928.
- [46] Rahman, M. F., Chowdhury, M., Marasamy, L., Mohammed, M. K., Haque, M. D., Al Ahmed, S. R., ... Goumri-Said, S. (2024). Improving the efficiency of a CIGS solar cell to above 31% with Sb_2S_3 as a new BSF : a numerical simulation approach by SCAPS-1D. *RSC advances*, 14(3), 1924-1938.
- [47] Rahman, M. F., Hasan, M. K., Chowdhury, M., Islam, M. R., Rahman, M. H., Rahman, M. A., ... Al-Hazmi, G. A. (2023). A qualitative Design and optimization of CIGS-based Solar Cells with Sn_2S_3 Back Surface Field : A plan for achieving 21.83% efficiency. *Heliyon*, 9(12).
- [48] D.A. Oeba, CO. Mosiori, (2024). Influence of Bulk Defect Density in CIGS on the Efficiency of Copper Indium Gallium Selenide Photocell, *European Journal of Applied Physics* 6, 1–13
- [49] Deo, M., Chauhan, R. K., Kumar, M. (2024). Optimization and performance enhancement of $\text{InP}/\text{CIGS}/\text{CuI}$ solar cell using bandgap grading. *Journal of Optics*, 53(2), 1224-1234.

[50] Rahman, M. F., Mahmud, N., Alam, I., Ali, M. H., Moon, M. M. A., Kuddus, A., ... Hossain, M. K. (2023). Design and numerical analysis of CIGS-based solar cell with V₂O₅ as the BSF layer to enhance photovoltaic performance. *AIP Advances*, 13(4).

Résumé

Résumé

Ce travail présente une étude de simulation numérique visant à évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur les performances électriques d'une cellule solaire à base de CIGS. Plus précisément, l'impact de l'épaisseur et du niveau de dopage de la couche absorbante CIGS, l'ajout d'une couche de type BSF (Back Surface Field), ainsi que la présence de défauts volumiques et interfaciaux a été examiné.

Les résultats obtenus indiquent que les meilleurs rendements sont atteints pour des épaisseurs de CIGS supérieures à 2 μm , combinées à une forte concentration de dopants. L'introduction d'une couche BSF s'est traduite par une amélioration significative des paramètres électriques de la cellule, notamment dans les cas de faibles niveaux de dopage, contribuant ainsi à une élévation notable du rendement global. En revanche, la présence de défauts, qu'ils soient volumiques ou interfaciaux, entraîne une dégradation, voire une détérioration marquée des performances électriques lorsque leur concentration devient importante.

This work presents a numerical simulation study aimed at evaluating the influence of various parameters on the electrical performance of a CIGS-based solar cell. Specifically, the effects of the thickness and doping level of the CIGS absorber layer, the addition of a Back Surface Field (BSF) layer, as well as the presence of bulk and interfacial defects, have been investigated.

The results indicate that the highest efficiencies are achieved for CIGS layer thicknesses greater than 2 μm combined with high doping concentrations. The inclusion of a BSF layer led to a significant improvement in the electrical parameters of the cell, particularly in cases of low doping levels, thereby enhancing the overall power conversion efficiency. Conversely, the presence of defects—whether bulk or interfacial—results in a degradation, or even a pronounced deterioration, of the electrical performance when their concentration becomes high.

يقدم هذا العمل دراسة محاكاة عددية تهدف إلى تقييم تأثير مختلف المعلمات على الأداء الكهربائي لخلايا الشمسية القائمة على CIGS. على وجه التحديد، تم التحقيق في تأثيرات سمك ومستوى التطعيم طبقة امتصاص CIGS، وإضافة طبقة حقل السطح الخلفي BSF، وكذلك وجود العيوب الحجمية والحدودية. تشير النتائج إلى أن أعلى الكفاءات تتحقق لسمك طبقات CIGS التي تزيد عن 2 ميكرومتر بالاقتراح مع تركيزات التطعيم عالية. أدى تضمين طبقة BSF إلى تحسين كبير في المعلمات الكهربائية للخلايا، لا سيما في حالات مستويات التطعيم المنخفضة، مما عزز الكفاءة العامة لتحويل الطاقة. على العكس من ذلك، فإن وجود العيوب سواء كانت داخلية أو سطحية يؤدي إلى تدهور، أو حتى تدهور ملحوظ، في الأداء الكهربائي عندما تصبح تركيزاتها مرتفعة.

