



N° d'ordre:
N° de série:



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Sciences et de La Technologies Filière: Genie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En: Télécommunication

Spécialité: Systèmes de télécommunication

Par: Hima Mohammed Brahim, Saadine Chouaib Et Toumi Fathi

Thème

**Simulation de cellule solaire $MA\text{SnCl}_3$ à
l'aide de SCAPS**

Devant le jury composé de:

Mr.	Président
Mr.	Examineur
Mr. Hima Abdelkader	Encadreur

2020-2021

Dédicace

*Nous faisons maintenant nos derniers pas dans
la vie universitaire*

*Avant de continuer, nous consacrons cet humble
travail à:*

Nos parents et nos chères mères

Nos familles et nos parents

*À nos camarades et à tous ceux qui nous ont
aidés*

*À ceux qui nous ont ouvert la voie pour
apprendre, à tous nos éminents professeurs.*

Merci beaucoup. . .

Brahim - Chouaib - Fathi



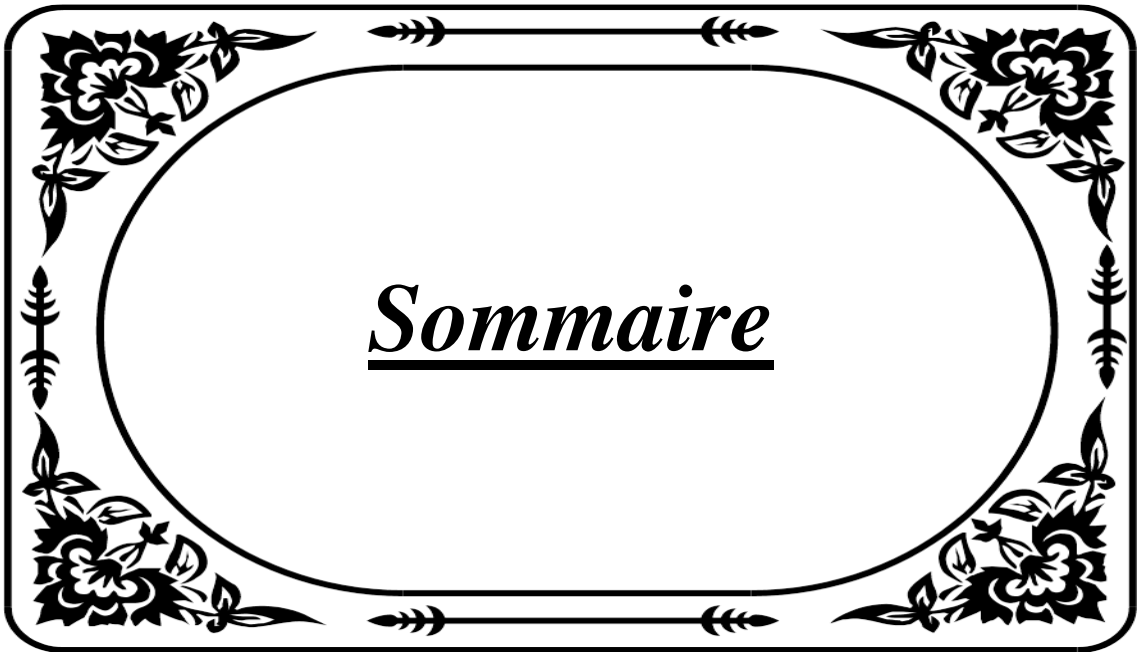
Remerciements

*Nous remercions Dieu tout puissant
Pour nous accorder la volonté et le courage
réaliser ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer mon encadreur
Dr. Hima Abdelskader
Patience et précieux conseils.*

*Nos remerciements à nos parents pour leur
soutien.*

*Nous tenons aussi à remercier tous mes amis
qui m'ont aidé de loin ou de près dans la
réalisation de ce travail*



Sommaire

Sommaire

	page
Dédicace	
Remerciements	
Sommaire	
Listes des symboles et abréviations	
Introduction générale	01
Chapitre I: Etude sur Semi-conducteurs	
I.1. Introduction	04
I.2. Les paramètres caractéristiques d'un semi-conducteur	04
I.2.1. Définition	04
I.2.2. Conductivité	04
I.2.3. Photoconduction	05
I.2.4. Redressement	05
I.3. Généralisation sur les matériaux semi-conducteurs	05
I.3.1. Classification des matériaux	05
I.3.2. Les matériaux semi-conducteurs	06
I.3.3. Semi-conducteurs intrinsèques (purs)	07
I.3.4. Semi-conducteurs extrinsèques	09
I.3.5. Bandes d'énergie	12
I.3.6. Les semi-conducteurs III-V	13
I.4. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs	14
I.4.1. Equation de Poisson	15
I.4.2. Equations de continuité	15
I.4.3. Equations de transport	15
I.5. Conclusion	17
Chapitre II: Notions générales sur les cellules solaires	
II.1. Introduction	19
II.2. La conversion photovoltaïque	19
II.2.1. Définition de cellules photovoltaïque	19
II.2.2. Historique sur le photovoltaïque	20
II.2.3. Les utilisations possibles	21
II.3. Energie solaire	22
II.4. Le rayonnement solaire	23
II.5. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	25
II.6. Les principales technologies solaires photovoltaïques	26
II.6.1. Les cellules au silicium cristallin	26
II.6.2. Les cellules à base de couches minces	26
II.6.3. Les cellules à base de photovoltaïque organique	27
II.7. Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire	28
II.8. Schéma électrique equivalent	29

II.9. Paramètres d'une cellule solaire	30
II.9.1. Courant de court-circuit, I_{cc}	30
II.9.2. Tension de circuit ouvert, V_{co}	31
II.9.3. Facteur de forme, FF	31
II.9.4. Rendement de conversion η	31
II.9.5. Réponse spectrale (RS) d'une cellule photovoltaïque	31
II.10. Conclusion	32
Chapitre III : Généralités sur les logiciels de simulation	
III.1. Introduction	34
III.2. Notions de base	34
III.3. La signification des blocs	35
III.3.1. Lancer SCAPS	35
III.3.2. Définir le problème	35
III.3.3. Définir le point de fonctionnement	36
III.3.4. Sélection des caractéristiques à simuler	37
III.3.5. Lancer le calcul	37
III.3.5. Lancer le calcul	37
III.3.6. Afficher les courbes simulées	37
III.3.7. Les courbes I-V	38
III.4. Définition d'une cellule solaire	39
III.4.1. Edition de la structure d'une cellule solaire	40
III.4.2. Contacts	41
III.4.3. Définition des couches	42
III.5. Conclusion	44
Chapitre IV: Simulation of MAs₂SeCl₃ solar cell, résultat et discussions	
IV.1. Introduction:	46
IV.2. Structure et paramètres de la cellule étudiée	46
IV.2.1. Présentation de la cellule étudiée	46
IV.2.2. Les paramètres du dispositif étudié	47
IV.3. Simulation par SCAPS	48
IV.3.1. Effet de l'épaisseur de couche PEDOT/PSS, CH ₃ NH ₃ SnCl ₃ et TiO ₂ sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire	48
IV.3.2. Effet de densités d'accepteur (N _A) de couche CH ₃ NH ₃ SnCl ₃ sur les paramètres PV de la cellule solaire	52
IV.3.3. Effet de Température sur les paramètres PV de la cellule solaire	53
IV.3.4. Courbe courant-tension:	54
IV.4. Conclusion	55
Conclusion générale	58
Bibliographie	61
Résumé	63

liste de figure

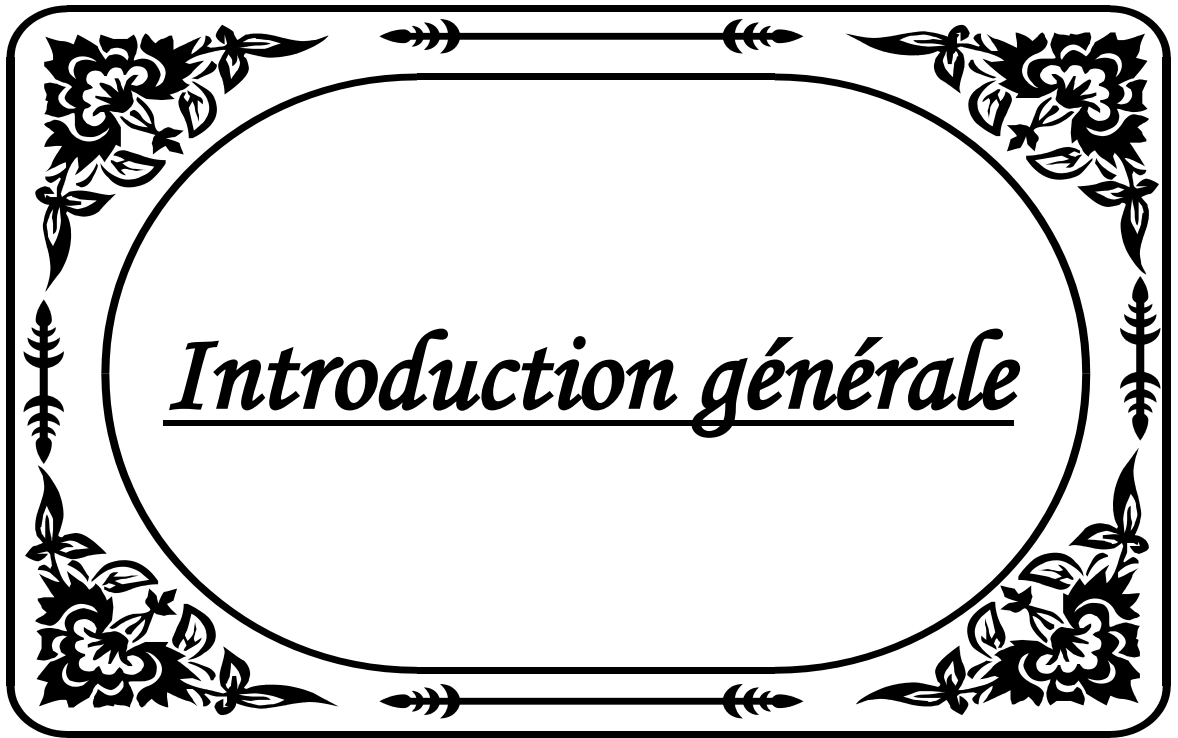
	Page
Chapitre I: Etude sur Semi-conducteurs	
Figure I.1: Résistivité pour différents types de matériaux.	06
Figure I.2: Structure cristalline du Silicium pur.	07
Figure I.3: Densité des porteurs intrinsèques en fonction de la température	09
Figure I.4: Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de phosphore, dopage donneur de type-n	10
Figure I.5: Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore, dopage accepteur de type-P	11
Figure I.6: Distance inter atomique représentée graphiquement contre l'énergie, pour montrer la formation des bandes d'énergie dans un matériau	12
Figure I.7: Bandes d'énergie dans différents types de matériaux	13
Chapitre II: Notions générales sur les cellules solaires	
Figure II. 1: Schéma de principe de la conversion photovoltaïque	22
Figure II. 2: le rayonnement solaire	24
Figure II. 3: Analyse spectrale du rayonnement solaire	24
Figure II. 4: Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque	25
Figure II. 5 : Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.	29
Figure II. 6 : Schéma électrique équivalent d'une pile solaire sous faible injection.	30
Chapitre III: Généralités Sur Les Logiciels De Simulation	
Figure III. 1: Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.	34
Figure III. 2: Définir le problème	36
Figure III. 3: Le point de fonctionnement	36
Figure III. 4: Panneau des bandes d'énergie	38
Figure III. 5: Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairement.	39
Figure III. 6: Définition de la structure d'une cellule solaire.	40
Figure III. 7: Panneau des propriétés des contacts	41
Figure III. 8: Propriétés de la couche ajoutée	42
Figure III. 9: Propriétés des dopages définis.	43
Figure III. 10: Modèle de l'absorption.	43
Figure III. 11: Définition des types de recombinaison présents	44
Chapitre IV: Simulation of MAsECl3 solar cell, résultat et	
Figure VI. 1: schéma simplifié de la cellule solaire utilisée	47
Figure IV. 2: Variation du paramètres photovoltaïques (V_{oc} , J_{sc} , FF et η) avec Na des couches $CH_3NH_3SnCl_3$	52
Figure IV. 3: les résultat de paramètres PV	53
Figure IV. 4 : Variation du paramètres photovoltaïques (V_{oc} , J_{sc} , FF et η) avec les changements de température	54
Figure IV. 5: Courbe I-V simulée.	55

Liste de tableau

	Page
Chapitre I: Etude sur Semi-conducteurs	
Tableau I.1: Situation des semi-conducteurs dans le tableau périodique	06
Tableau I.2 : Extrait de la classification périodique des éléments chimiques	14
Chapitre IV: Simulation of MAsECl₃ solar cell, résultat et	
Tableau IV. 1: Propriétés des différentes couches(PEDOT: PSS/ CH ₃ NH ₃ SnCl ₃ /TiO ₂).	48
Tableau IV. 2: L'épaisseur de chaque couche de la cellule de base étudiée.	48
Tableau IV. 3: Propriété de couche(PEDOT: PSS)	49
Tableau IV. 4: Propriété de couche(CH ₃ NH ₃ SnCl ₃)	50
Tableau IV. 5: Propriété de couche(TiO ₂)	51

Listes des symboles et abréviations

PCE	Power conversion efficiency
AsGa	Gallium Arsenide
PGa	Phosphide Gallium
SbGa	Phosphide Gallium
Si	Silicon Ge Germanium
GaAs	Arsenide Gallium permittivité électrique
ϵ_0, ϵ_r	Permittivité du vide, permittivité relative du Matériau
MASnCl3	CH3NH3SnCl3
∇	Opérateur Nabla
Ψ	potentiel électrostatique
ρ	densité volumique nette de charges libres
D_n / D_p	Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement, les coefficients d'Einstein.
$G_n .R_n$	Les taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externes
μ_n, μ_p	Mobilité des électrons et des trous respectivement
n	Concentration des électrons et des trous respectivement
K	constante de Boltzmann
T	la température
N_{ie}	Densité de porteurs libres intrinsèques
$N_c(T), N_v(T)$	Densité des états dans la couche de conduction états dans la couche de valence
J_{sc}	densité du courant de court-circuit
V_{oc}	Tension de circuit ouvert
FF	Facteur de forme
P_{max}	Puissance maximale
P_{in}	puissance lumineuse incidente
I_{cc}	courant de court-circuit
I_{ph}	la densité de courant photogénéré
I_{obs}	la densité de courant d'obscurité.
I_{ph}	courant photogénéré
IE	courant d'éclairement
I_{obs1} et I_{obs2}	courant de diode
IP	courant dans la résistance parallèle.
T_c	température absolue
R_o	résistance interne de la diode en polarisation externe



Introduction générale

Introduction générale

Le Soleil, source énergétique quasi illimitée, est à l'origine d'un nombre impressionnant d'effets biologiques qui participent directement ou indirectement à la vie animale et végétale: il procure la chaleur, permet la photosynthèse, la vision, conditionne les rythmes biologiques, etc.

L'originalité de l'énergie photovoltaïque telle qu'on l'entend ici est de transformer directement la lumière solaire en électricité. Et quand on sait que l'apport énergétique solaire total sur la planète est de plusieurs milliers de fois supérieur à notre consommation globale d'énergie, on comprend tout l'intérêt d'une telle démarche. Renouvelable, cette énergie respecte notre environnement en réduisant les émissions des gaz à effet de serre. Les prix ne cessent de baisser grâce à l'accroissement des volumes de production car le marché est fortement stimulé par le rachat du courant par les compagnies d'électricité, et il croît de 40 % par an au niveau mondial depuis quelques années. Peu de secteurs économiques peuvent afficher de tels résultats. De nombreuses cellules photovoltaïques ont vu le jour pour exploiter au mieux la lumière du Soleil au travers de panneaux solaires. Afin de produire de l'électricité, Ces cellules solaires constituées d'un matériau semi-conducteur qui converti l'énergie du rayonnement solaire en électricité.

Silicium, terres rares ou plastiques sont employés, mais chaque technologie a des atouts et des faiblesses dans ce domaine prometteur. Nous prenons le matériel MAsECl3 Comme échantillon pour cette étude, il est un matériau sans plomb prometteur pour l'application de cellules solaires.

L'objectif de ce présent mémoire est: simuler une cellule solaire basée sur le matériau mentionné ci-dessus dans le but d'améliorer l'efficacité en utilisant des matériaux ETL et HTL différents et des paramètres d'ingénierie. Et de faire une modélisation de l'effet des épaisseurs et du gap d'énergie sur les

caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de CZTS en vue d'optimiser par simulation en utilisant le logiciel SCAPS pour simuler les caractéristiques physiques (densité de courant de court-circuit, tension de circuit ouvert V_{CO} , Facteur de forme FF, Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée (η)).

La présentation de cette étude a été répartie sur quatre chapitres avec au début une présentation générale et se termine à la fin par une conclusion.

- ✎ **Le premier chapitre:** on fait une étude sur Semi-conducteurs.
- ✎ **Le second chapitre:** est Notions générales sur les cellules solaires.
- ✎ **Le troisième chapitre:** nous présenterons le logiciel de simulation SCAPS.
- ✎ **Et enfin,** Dans le dernier chapitre nous présenterons et discuterons les résultats obtenus.



Chapitre I:
Etude sur
Semi-conducteurs

I.1. Introduction:

À notre époque et avec l'énorme développement industriel, les dispositifs à semi-conducteurs sont en grande partie dus aux technologies de pointe qui ont été développées pour les préparer. Comme il a acquis une importance considérable dans notre société, car il est la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques utilisés dans les systèmes informatiques, les communications, la télévision, les voitures, les appareils ménagers et autres appareils modernes ... etc.

L'objectif de ce chapitre est de présenter quelques notions sur les semi-conducteurs en général et les semi-conducteurs III-V en particulier telles que les paramètres caractéristiques électroniques et optiques, le transport de charges et les mécanismes de génération et de recombinaison des porteurs

I.2. Les paramètres caractéristiques d'un semi-conducteur

I.2.1. Définition:

Un semi-conducteur est un matériau qui présente une conductivité intermédiaire entre celle des métaux (conducteurs) et des isolants. La spécificité d'un semi-conducteur par rapport aux autres matériaux réside dans les propriétés suivantes:

- ✎ Conductivité.
- ✎ Photoconduction.
- ✎ Redressement

I.2.2. Conductivité:

La conductivité caractérise la résistance au passage du courant ou de la chaleur dans un matériau. La caractéristique inverse est la résistivité. Pour un semi-conducteur elle croît par contre très rapidement avec la température. Dans un métal, la conduction est assurée par un seul type de porteurs qui sont

en général les électrons, Par contre sont les électrons et les trous. Cette notion de porteurs (électrons et trous) sera développée un peu plus loin.

I.2.3. Photoconduction:

Libération de charges électriques dans un semi-conducteur sous l'action de la lumière.

I.2.4. Redressement:

Dans un semi-conducteur, le redressement est: le passage du courant dans un seul sens. Cette propriété est très utilisée pour le redressement de courant alternatif.

I.3. Généralisation sur les matériaux semi-conducteurs:

I.3.1. Classification des matériaux:

Une manière commune de classer un matériel est par ses propriétés électriques. Selon le niveau de la résistivité d'un élément, elle peut être classée par catégorie comme isolateur, conducteur, ou semi-conducteur. La capacité de résister ou de conduire l'électricité d'un matériel dépend de beaucoup de facteurs, la structure de réseau, les électrons libres, l'énergie de bande interdite, et la température. Quelques matériaux ont des propriétés électriques très discrètes qui les définissent en tant qu'un isolateur ou conducteur. Cependant, d'autres matériaux tels que le silicium et l'arséniure de gallium peuvent agir en tant qu'isolateur ou conducteur et sont donc considérés des semi-conducteurs La figure 1 montre la gamme typique des conductivités pour des isolateurs, des conducteurs, et des semi - conducteurs.

Des semi - conducteurs peuvent être trouvés sous la forme élémentaire ou composée. Le silicium et le germanium sont des exemples des semi-conducteurs élémentaires, qui appartiennent au groupe IV dans le tableau périodique.

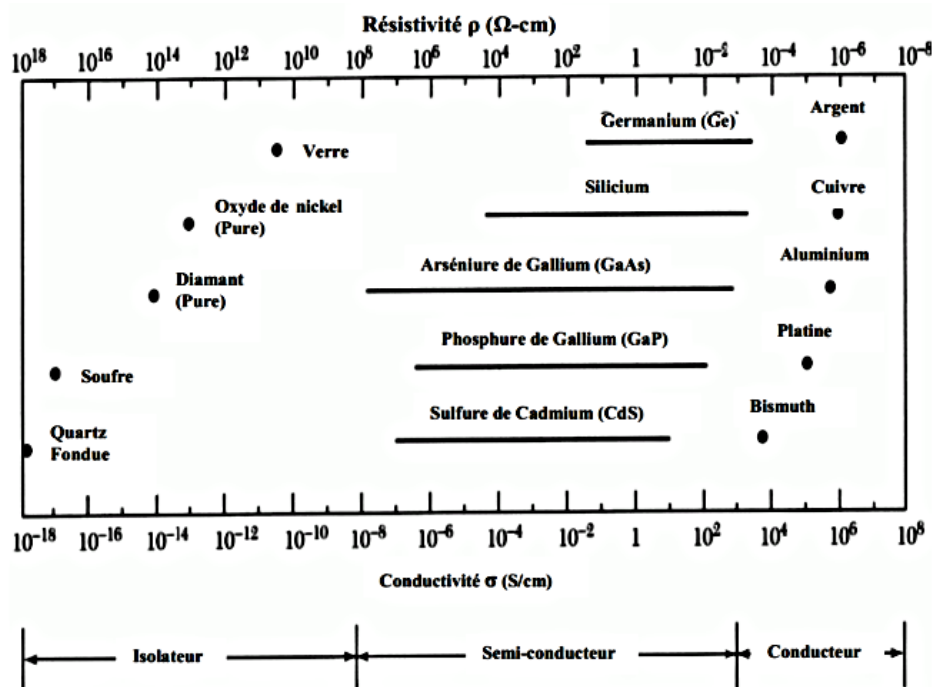


Figure I.1: Résistivité pour différents types de matériaux

I.3.2. Les matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des composés constitués d'un ou plusieurs éléments du tableau périodique des éléments ; En analysant le tableau de **Mendéliev**, une partie de ses éléments (**tableau I.1**), est considérée comme étant formée de semi-conducteurs [1].

groupe	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
			B	C	N	O		
			Al	Si	P	S		
		Zn	Ga	Ge	As	Se		
		Cd	In	Sn	Sb	Te	I	

Tableau I.1: Situation des semi-conducteurs dans le tableau périodique.

En raison de leurs propriétés physiques le germanium(Ge) et surtout le silicium (Si) sont les plus utilisés dans les applications électroniques.

Les développements de la technologie ont permis de nouveaux semi-conducteurs beaucoup plus performants. Ces semi-conducteurs utilisent les alliages composés des groupes III-V et II-IV.

On obtient ainsi les semi-conducteurs AsGa; PGa; SbGa etc... Le semi-conducteur AsGa devient aujourd'hui de plus en plus utilisé. [2]

I.3.3. Semi-conducteurs intrinsèques (purs):

Il est impossible de créer des semi-conducteurs intrinsèques totalement purs parce qu'à un certain point pendant le processus de croissance les impuretés contaminent le matériel [3].

Si un lien de semi-conducteur intrinsèque est cassé, un électron libre et un trou sont créés simultanément, de même, si un électron est excité de la bande de valence à la bande de conduction alors un trou sera simultanément créé dans la bande de valence [4].

On peut considérer que le trou s'est déplacé par combinaisons d'électrons.

La structure cristalline du silicium pur est présentée dans la figure:

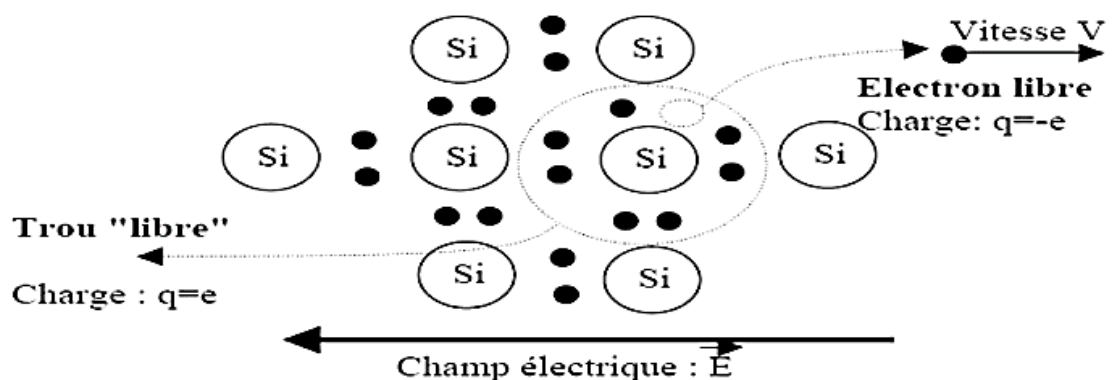


Figure I.2: Structure cristalline du Silicium pur.[5]

Les semi-conducteurs appartiennent à la 4^{ème} colonne de la classification périodique des éléments.

Par exemple les atomes de silicium qui possèdent 4 électrons sur leur dernière couche se regroupent entre eux en échangeant leurs électrons de valence (liaison de covalence), Chaque électron est mis en commun par deux atomes voisins de manière à ce que le noyau se trouve entouré par une couche de 8 électrons , Cette structure est très stable.

A la température de 0K, tous les électrons de valence sont utilisés dans des liaisons de covalence.

- ✓ Pas d'électrons libres aucune possibilité de conduction
- ✓ Le cristal est un isolant.

Quand la température augmente, l'agitation thermique donne à certains électrons un supplément d'énergie suffisant pour briser la liaison de covalence.

- ✓ Ces électrons libres peuvent alors se déplacer sous l'action d'un champ électrique extérieur.
- ✓ Le cristal est devenu conducteur

Les cristaux semi-conducteurs purs, qui ne contiennent pas d'atomes étrangers, sont appelées intrinsèque. Dans un semi-conducteur intrinsèque à 0 K° il n'y a pas de EHP, lorsque la température augmente, cependant, la chaleur absorbée par le matériau créera un certain nombre de EHP et la conductivité du matériau augmente.

Depuis que **EHP** sont responsables de la conductivité, ils sont appelés porteurs intrinsèques. Leur nombre augmente de façon logarithmique. Ceci est montré dans la figure I-3 pour Si, Ge et GaAs.

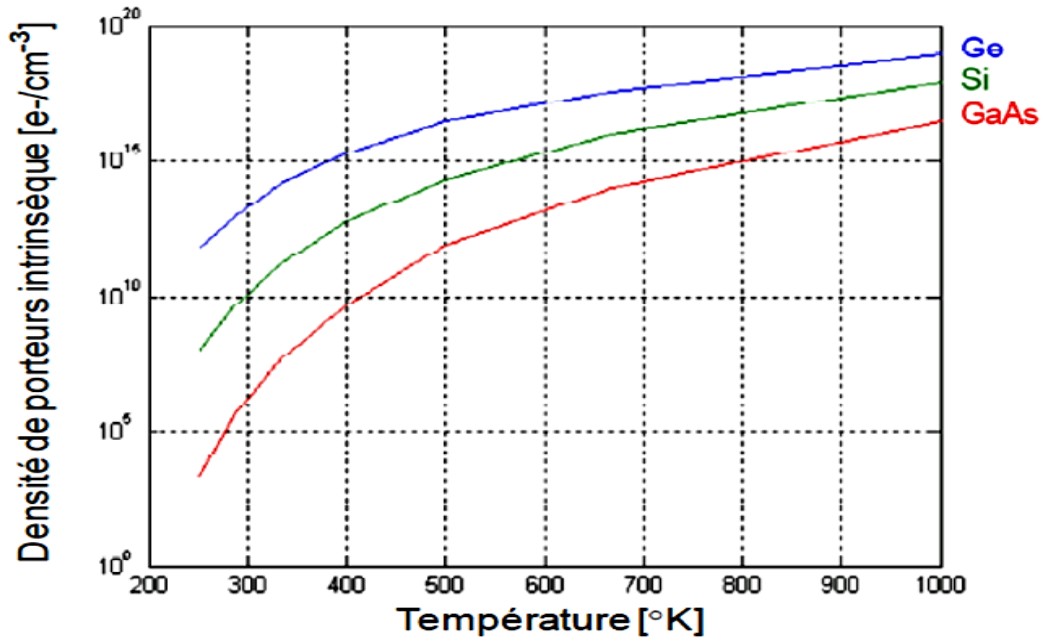


Figure I.3: Densité des porteurs intrinsèques en fonction de la température

I.3.4. Semi-conducteurs extrinsèques:

Les semi-conducteurs extrinsèques sont créés en ajoutant des atomes d'impuretés dans les matériaux intrinsèques. Heureusement, ajouter des impuretés dans un matériel peut être bénéfique aux performances du semi-conducteur. L'ajout des impuretés dans la substance avec l'intention de contrôler ses caractéristiques de fonctionnement est connu sous le nom de dopage [3], ce processus peut engendrer des changements des propriétés électriques. Le dopage est employé pour contrôler le nombre d'électrons ou de trous dans un matériel par l'addition d'une quantité déterminée d'impuretés, avec résultats des matériaux de type-p ou de type-n en concordance avec le nombre des trous ou des électrons libres. Le dopage d'un cristal intrinsèque consiste à substituer des atomes de semi-conducteurs du réseau par des atomes étrangers ; Deux cas peuvent se présenter:

❖ Les dopants de type -n, sont également connus comme donneurs, car ils sont des éléments ou des composés avec cinq électrons de valence ou plus qui donneront un électron après que les quatre autres forment des liaisons covalentes avec le matériau intrinsèque dans lequel ils ont été placés.

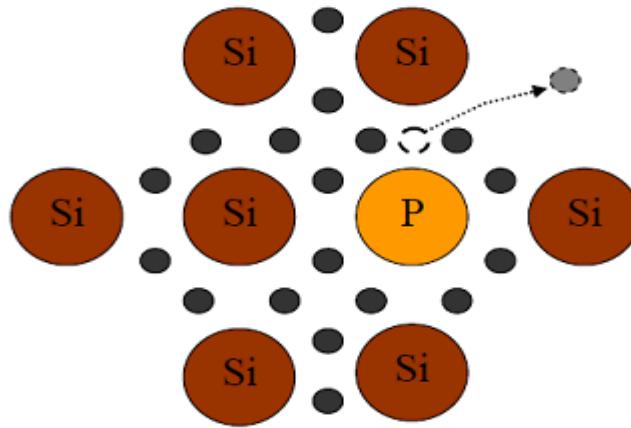


Figure I.4: Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de phosphore, dopage donneur de type-n

Dans le matériau de type-n, les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous sont des porteurs minoritaires [3]. Prenons le cas d'un atome de la colonne V, par exemple le phosphore. La couche externe de cet atome comporte, a priori, 5 électrons, comme représenté sur la figure I.4. Inclus dans le réseau cristallin, cet atome va se retrouver avec 9 électrons sur sa couche externe. Dès que l'énergie thermique sera suffisante, cet électron va quitter son orbite pour circuler dans le cristal. Il rejoint dans ce cas la bande de conduction du cristal.

Le noyau de l'atome de phosphore ayant une charge (due à ses protons) qui n'est plus compensée, cet atome va s'ioniser positivement. Cet atome a ainsi un comportement dopant et puisqu'il a fourni un électron au cristal (dans sa bande de conduction), on l'appelle atome donneur. Notons que la charge totale du cristal reste nulle, le cristal étant globalement neutre.

Les dopants de type-p, ou accepteurs, sont des éléments ou des composés ayant trois ou moins d'électrons de valence et acceptent des électrons, forment des liaisons covalentes avec quatre ou plusieurs de leurs cinq trous. Les matériaux de type-p ont des trous comme porteurs majoritaires et des électrons comme porteurs minoritaires.

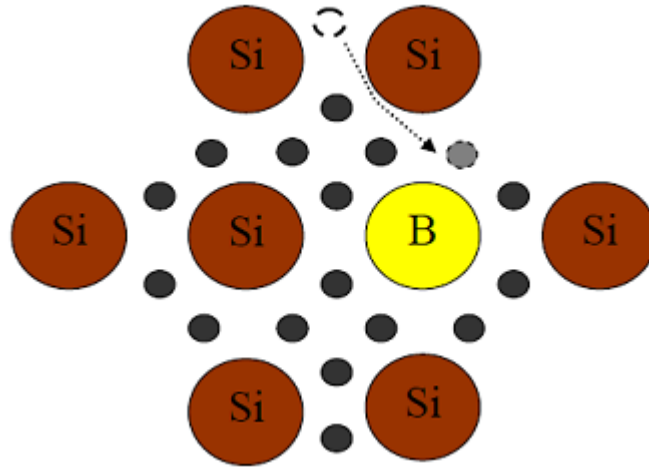


Figure I.5: Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore, dopage accepteur de type-P

Prenons le cas d'un atome de la colonne III, par exemple le bore. La couche externe de cet atome comporte, a priori, 3 électrons, comme représenté sur la figure I.5, Inclus dans le réseau cristallin, cet atome va se retrouver avec 7 électrons sur sa couche externe, Dès que l'énergie thermique sera suffisante, un électron de valence voisin va quitter son orbite pour venir créer un octet autour de l'atome de bore, Il crée dans ce cas une lacune dans la bande de valence du cristal, c'est-à-dire qu'il crée un trou. Le noyau de l'atome de bore ayant une charge due à ses protons insuffisants, cet atome va s'ioniser négativement. Cet atome a ainsi un comportement dopant et puisqu'il a fourni un trou au cristal (dans sa bande de valence), on l'appelle atome accepteur, puisqu'il accepte un électron, Notons que la charge totale du cristal reste toujours nulle, le cristal étant globalement neutre.

Le nombre des porteurs majoritaires est analogue au dopage dans une matière, tandis que le nombre des porteurs minoritaires est analogue à la température. Notons que les deux types-p et n du matériau reste neutres. Toutefois, l'effet de dopage est optimal pour les propriétés électriques de la matière, même à de très faibles concentrations.

I.3.5. Bandes d'énergie:

Les semi-conducteurs et les métaux possèdent une structure cristalline particulière, c'est à dire que les atomes sont groupés en réseaux régulièrement disposés dans l'espace. Dans ces réseaux, la distance inter atomique étant faible, de l'ordre de quelques Å, les atomes ne peuvent plus être considérés comme isolés.

Il en résulte des interactions de nature électrostatique entre les divers atomes. Les états d'énergie électroniques sont distribués selon une loi de dispersion appelée structure de bandes, représentée par une succession de bandes permises pouvant être séparées par des bandes interdites. Toutes les directions de propagation des électrons, c'est à dire tous les points du réseau réciproque, doivent être examinées afin d'établir l'existence d'une bande interdite (le terme anglais "gap").

Dans le diagramme de bande de la figure I.6, la distance inter atomique est représentée graphiquement à l'encontre de l'énergie d'électrons. Le diagramme de bande montre que lorsque les atomes du même élément sont infiniment éloignés les uns des autres, ils ont les mêmes niveaux d'énergie. Toutefois, lorsque les atomes sont rapprochés, les électrons de chaque atome s'interagissent, et les niveaux d'énergie discrets divergent dans une bande d'énergie autorisée représentée par la partie grise du graphique de la figure.

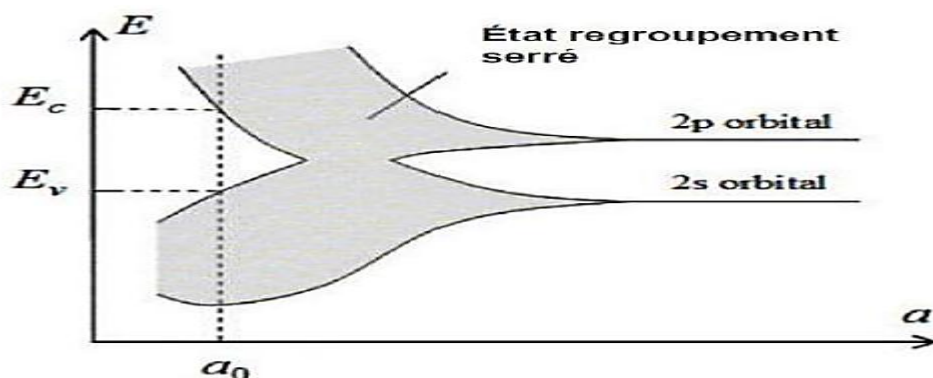


Figure I.6: Distance inter atomique représentée graphiquement contre l'énergie, pour montrer la formation des bandes d'énergie dans un matériau

Dans un solide à 0° K, toutes les bandes d'énergie les plus basses sont remplies, sauf la dernière qui peut être partiellement remplie ou complètement remplie.

Lorsque cette bande est partiellement remplie, on a affaire à un conducteur car si on applique un champ électrique, les électrons qui ont l'énergie la plus élevée peuvent acquérir une énergie supplémentaire en occupant des niveaux d'énergie très voisins disponibles, Lorsque cette bande est remplie, on affaire à un isolant à 0 °K car l'application d'un champ électrique ne peut fournir assez d'énergie pour lui faire franchir la bande interdite afin d'atteindre les premiers niveaux disponibles: les électrons ne peuvent acquérir un mouvement collectif correspondant au passage du courant On distingue isolants et conducteurs par la différence d'énergie qu'existe entre ces bandes, comme illustré à la figure I.6.

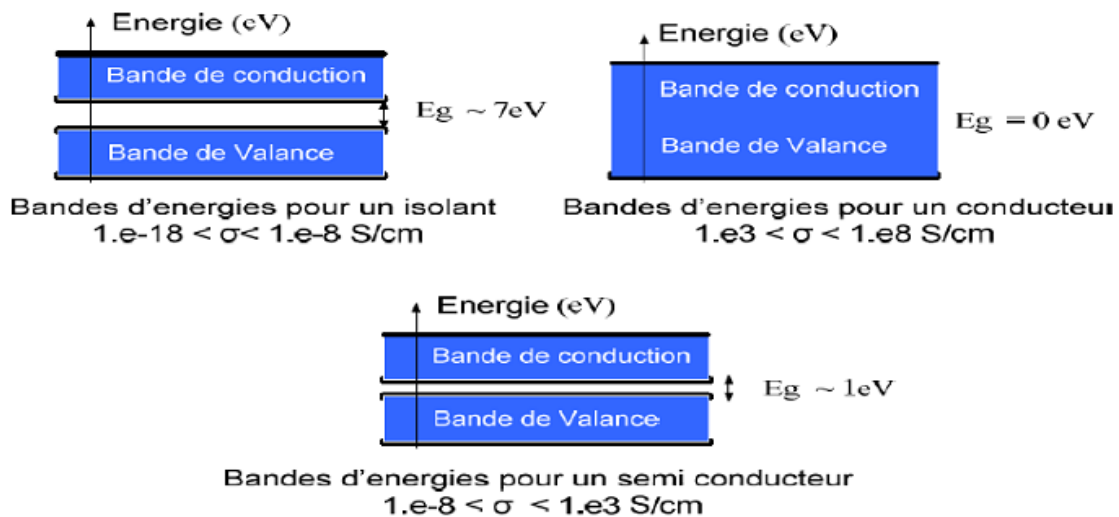


Figure I.7: Bandes d'énergie dans différents types de matériaux

I.3.6. Les semi-conducteurs III-V:

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des composés formés à partir d'un élément de la troisième (III) colonne et d'un élément de la cinquième (V) colonne de la classification périodique de Mendeleïev, Le tableau (I.2) regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). [2].

III	IV	V
$^{10.81}_{5}B$	$^{12.01}_{6}C$	$^{14.01}_{7}N$
$^{26.98}_{13}Al$	$^{28.09}_{14}Si$	$^{30.97}_{15}P$
$^{69.74}_{31}Ga$	$^{72.59}_{32}Ge$	$^{74.92}_{33}As$
$^{114.69}_{49}In$	$^{118.69}_{50}Sn$	$^{121.75}_{51}Sb$

Tableau I.2 : Extrait de la classification périodique des éléments chimiques [2].

I.4. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs:

Des années de recherche dans la physique des dispositifs à la base des semi-conducteurs ont conduit à la réalisation d'un modèle mathématique [6]. Ce modèle est capable d'opérer dans quasiment n'importe quel dispositif à base de semi-conducteurs. Il consiste en un ensemble fondamental d'équations qui rassemblent le potentiel électrostatique et les densités de porteurs de charge dans un domaine de simulation bien précis, Ces équations, qui sont résolues via des logiciels spécifiques de simulation des dispositifs à la base de semiconducteurs, sont dérivées des équations de Maxwell, Elles sont principalement: L'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport. L'équation de Poisson lie les variations dans le potentiel électrostatique aux densités locales de charge, Les équations de continuité ou de transport décrivent le mode par lequel les densités d'électrons et des trous se comportent en fonction des processus de transport, de génération et de recombinaison.

Pour que les équations que nous allons présenter dans la suite de ce chapitre soient résolues, une discrétisation a dû être réalisée afin de les appliquer à une grille d'éléments finis utilisés pour représenter le domaine de

simulation [7].

I.4.1. Equation de Poisson:

L'équation de Poisson s'exprime par: $\text{Div } \varepsilon \nabla \psi = -\rho$ (I.1)

Où ψ représente le potentiel électrostatique

ε la permittivité électrique ($\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, ε_0 est la permittivité du vide et ε_r est la permittivité relative du matériau).

ρ est la densité volumique nette de charges libres.

Le champ électrique est donné par la relation: $E = -\text{grad } \psi$ (I.2)

I.4.2. Equations de continuité:

Les équations de continuité décrivent la vitesse de variation en fonction du temps des concentrations des porteurs, Les causes de la variation des concentrations des trous ou des électrons sont:

- ✎ Les générations dues aux agents externes (qui sont souvent la création de paires électron trou).
- ✎ Les générations-recombinaisons internes ; Les phénomènes de transport (par la présence des courants de conduction ou diffusion).
- ✎ L'équation de continuité s'exprime par:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (\text{I.3})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{I.4})$$

I.4.3. Equations de transport:

Dans le cas des hypothèses de base des équations de la physique des semi-conducteurs (le champ magnétique extérieur est nul, la température est uniforme dans toute la structure) les causes de l'apparition des courants

électriques sont le champ électrique et le gradient des concentrations des porteurs de charge.

Les courants déterminés par le champ électrique s'appellent courant du champ ou courant de drift. Et les courants déterminés par le gradient de concentration des porteurs s'appellent courant de diffusion.

Dans le cas hors équilibre thermodynamique, nous définissons deux quasi-niveaux de Fermi, un pour les électrons et un pour les trous, ψ et, qui expriment la modification de la probabilité d'occupation des états.

Ainsi les densités des courants des équations de continuité peuvent être approximées à l'aide de la théorie de transport de Boltzmann par le modèle de drift-diffusion [8] (modèle iso thermique de transport). Dans ce modèle, les densités de courants sont exprimées en fonction des quasi-niveaux de Fermi par les expressions:

$$\vec{J}_n = -q \mu_n n \nabla \varphi_n \quad (\text{I.5})$$

$$\vec{J}_p = -q \mu_p p \nabla \varphi_p \quad (\text{I.6})$$

Avec q est la charge électrique, μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous. Les expressions pour les concentrations des électrons et des trous sont:

$$n = n_{ie} \exp\left[\frac{q(\psi - \varphi_n)}{kT_L}\right] \quad (\text{I.7})$$

$$p = n_{ie} \exp\left[\frac{q(\psi - \varphi_p)}{kT_L}\right] \quad (\text{I.8})$$

Avec n_{ie} est la densité effective intrinsèque. En introduisant ces équations dans les expressions de densité de courant, on obtient:

$$\vec{J}_n = qD_n \nabla n - qn \mu_n \nabla \psi - \mu_n n (kT_L \nabla (\ln n_{ie})) \quad (\text{I.9})$$

$$\vec{J}_p = -qD_p \nabla p - qp \mu_p \nabla \psi - \mu_p p (kT_L \nabla (\ln n_{ie})) \quad (\text{I.10})$$

Avec D_n et D_p sont les coefficients d'Einstein qui ont pour expression:

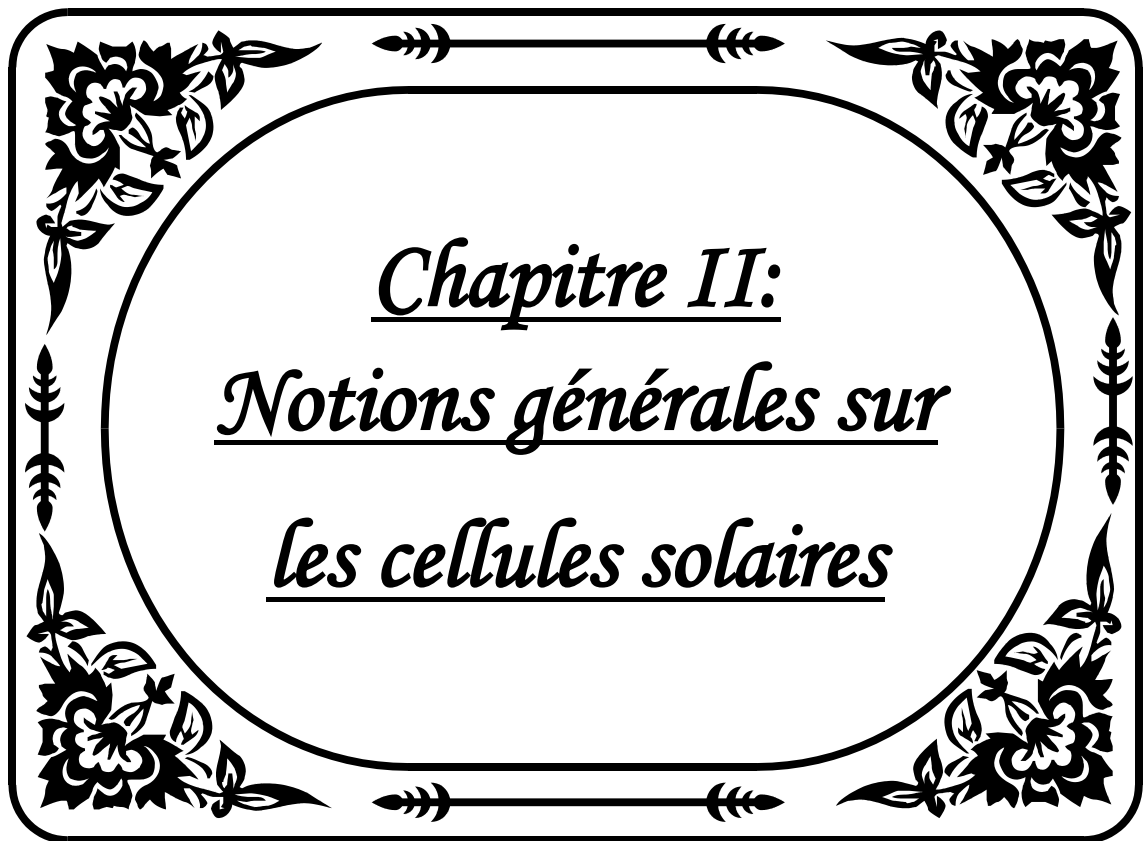
$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (\text{I.11})$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (\text{I.12})$$

I.5. Conclusion:

Dans ce chapitre, étude des Semi-conducteurs nous avons rappelé quelques notions des semi-conducteurs III-V et nous avons donné leurs paramètres caractéristique (conductivité - photoconduction - redressement).

Nous avons aussi étudié les matériaux semi-conducteur et quelque équation fondamentales en donnant par exemple l'équation de: poisson, continuité et transport)



Chapitre II:
Notions générales sur
les cellules solaires

II.1.Introduction:

La lumière est composée de photons, porteurs d'énergie, pouvant extraire des charges électriques des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Ainsi, et contrairement aux capteurs thermiques qui produisent de la chaleur (chauffe-eau, capteur plan, capteur tubulaire...), les panneaux solaires photovoltaïques produisent du courant électrique quand ils sont exposés à la lumière, par cette conversion photovoltaïque.

La cellule solaire est l'un des composants de base d'un semi-conducteur qui convertit l'énergie lumineuse en électricité, La puissance électrique qu'il fournit dépend du flux et de la distribution spectrale du rayonnement solaire, La lumière incidente génère des courants dans la cellule solaire.

Dans ce chapitre, on analyse les phénomènes qui interviennent sur le transport de charge dans les différentes parties de la cellule solaire à hétérojonction, Il nous a utile d'introduire d'abord la définition du rayonnement solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule solaire ainsi que ses caractéristiques électriques.

II.2.La conversion photovoltaïque:

Le terme « **photovoltaïque** » peut désigner le phénomène physique ou la technologie associée, L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

II.2.1. Définition de cellules photovoltaïque:

Les cellules photovoltaïques (PV) sont des composants optoélectroniques capables de convertir directement la lumière en électricité, en utilisant

l'interaction de la lumière avec certains matériaux semi-conducteurs.

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et celles des semi-conducteurs [9].

II.2.2. Historique sur le photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont divisées en deux mots:

- ✎ Mot grec «**photos**» qui signifie la lumière
- ✎ Et du mot «**voltaïque**» relatif au nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique.
- ✎ L'abréviation commune pour le photovoltaïque est: « PV » [10].
- ✎ La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable.
- ✎ L'effet photovoltaïque qui consiste à transformer directement la lumière en électricité fût découverte en 1838.

En résumé l'historique du photovoltaïque par étapes comme suit [11]:

- ✎ **1838:** Le physicien français EDMOND BEQUEREL découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide: c'est l'effet photovoltaïque.
- ✎ **1875:** WERNER VON SIEMENS expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- ✎ **1954:** Trois chercheurs américains mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale cherche des solutions pour alimenter ses satellites.
- ✎ **1958:** une cellule avec un rendement de 9% est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

- ✎ **1973:** la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.
- ✎ **1985:** la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque en Australie.
- ✎ **1995:** Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

La conversion photoélectrique comprend trois phénomènes physiques, étroitement liés et simultanément, est résumé comme suit:

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges.

II.2.3. Les utilisations possibles:

Les usages de la cellule photovoltaïque sont nombreux. Lorsqu'elle est utilisée seule, elle permet d'alimenter un point d'éclairage (en extérieur, par exemple) ou de faire fonctionner un appareil électrique ayant de faibles besoins de puissance (comme une calculette ou une montre, entre autres). Dans ces cas-là, elle vient remplacer le rôle joué jusqu'ici par une pile, dont les composants sont toxiques.

Assemblées entre elles, les cellules photovoltaïques forment un panneau solaire qui génère une puissance combinée. Cette dernière permet de créer de l'électricité et d'alimenter différents appareils ou installations électriques. Les usages de la cellule solaire sont multiples. En effet, la cellule photovoltaïque peut par exemple fournir en électricité:

- Une habitation, lorsque l'installation est domestique
- Le réseau public d'électricité, dans le cas des centrales solaires thermiques.
- Les satellites envoyés dans l'espace

- Les bateaux solaires, avions solaires et autres véhicules alimentés grâce à des cellules photovoltaïques

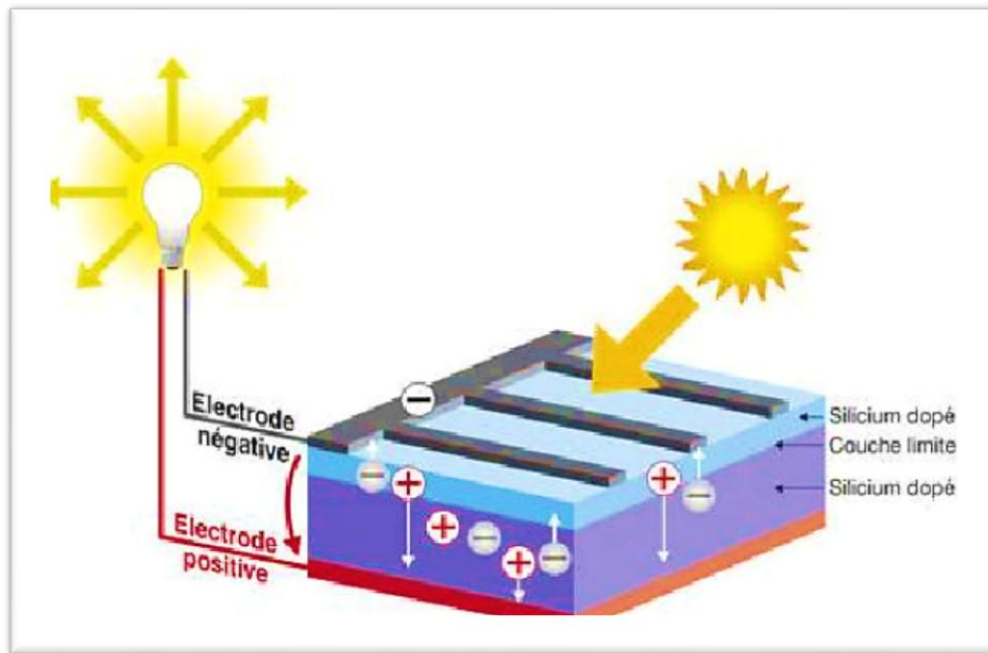


Figure II. 1: Schéma de principe de la conversion photovoltaïque [12].

II.3.Énergie solaire:

Le rayonnement solaire est la quantité de rayonnement solaire incident sur une zone spécifique qui est capable de générer de l'énergie électrique. La Terre n'affecte qu'environ une partie de deux milliards de parties de la lumière du soleil, estimée à 130 mégawatts par mètre carré de la surface du soleil, et cette petite quantité est responsable de toute l'énergie thermique de la surface et de l'atmosphère de la Terre.

La Terre intercepte une petite fraction de l'énergie solaire rayonnant dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367W/m^2 . La fraction de l'énergie reçue à la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à passer, Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM). Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair

est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1).

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 .

II.4. Le rayonnement solaire:

La distance de séparation entre la terre et le soleil est estimée à environ 150 millions de kilomètres malgré cette longue distance, le soleil fournit une énergie importante à la limite de l'atmosphère, sous la forme d'un rayonnement dont le spectre se répartit essentiellement entre les longueurs d'onde $0.3 \mu\text{m}$ et $4 \mu\text{m}$.

L'atmosphère terrestre perturbe cette distribution spectrale, ce qui modifie l'intensité du rayonnement solaire incident réfléchi et absorbé par: les gaz, l'espace aérien et les nuages. Dans les meilleures conditions, cette puissance peut atteindre un débit de 1000 watts par mètre carré sur au sol.

Sur Terre, la durée de la luminosité du soleil varie d'une région à l'autre, il change aussi selon les saisons, les caractéristiques climatiques du site.

Ce caractère intermittent propre à l'énergie solaire constitue un handicap auquel on remédie au besoin, en stockant l'énergie obtenue sous sa forme utilisable, essentiellement électrique [13].

Le rayonnement émis par le soleil correspond à celui du corps noir à la température de $6000 \text{ }^\circ\text{C}$. L'intensité du rayonnement au-dessus de l'atmosphère est de 1.35 kW/m^2 , avec un spectre centré au voisinage de $\lambda=0.48 \mu\text{m}$. A la surface du sol la densité de puissance n'est plus que de 0.9 kW/m^2 , en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et le gaz carbonique. En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption [14].

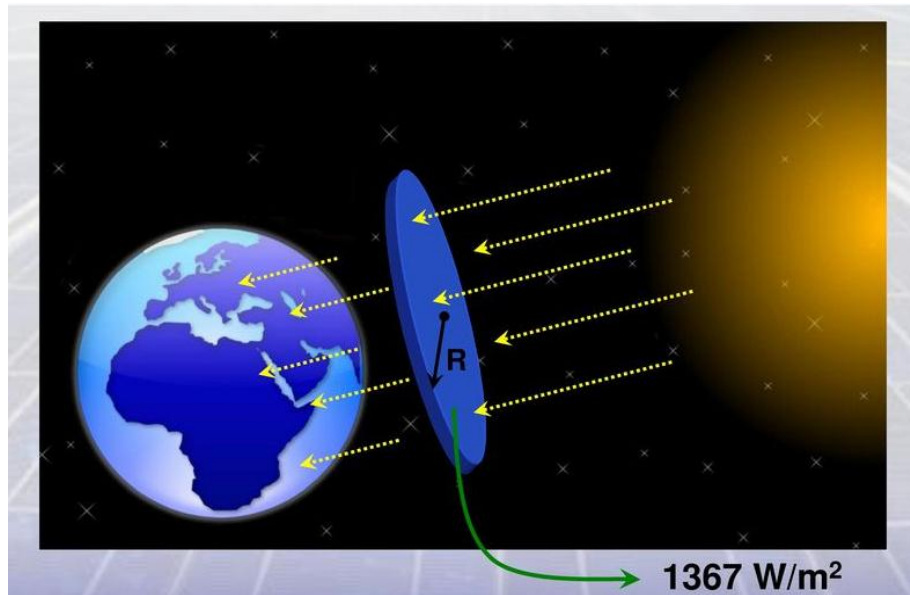


Figure II. 2: le rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$, La figure II.3 représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à:

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

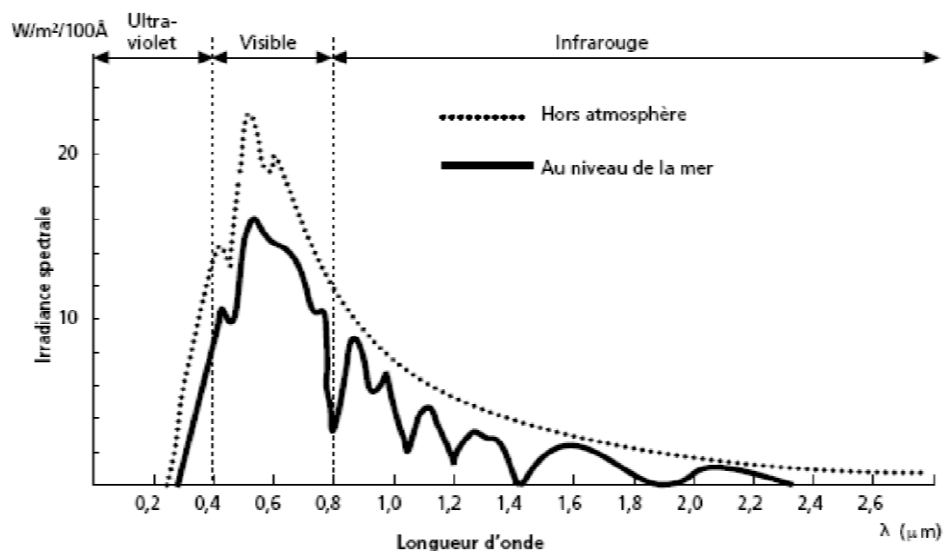


Figure II. 3: Analyse spectrale du rayonnement solaire.

II.5.Principe de fonctionnement d'une cellule solaire:

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type-p.

Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

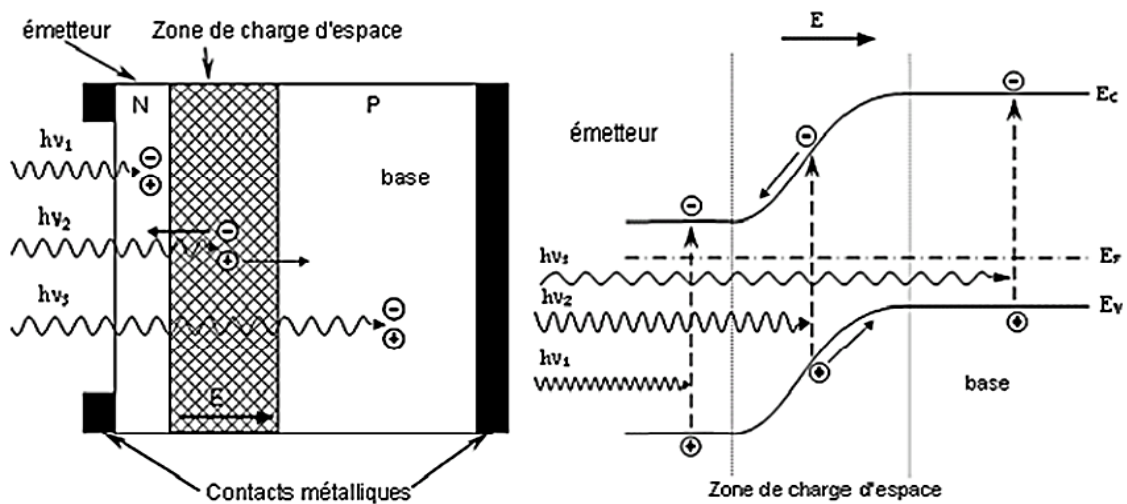


Figure II. 4: Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure II.4. Les photons incidents créent des porteurs dans les régions N, P et la zone de charge d'espace. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres P et N, les photoporteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photoporteurs contribuent donc au courant par leur diffusion,

ils créent un photo-courant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons trous créés par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Les porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant I_{ph} qui contribue au courant inverse de la diode [14].

II.6. Les principales technologies solaires photovoltaïques:

On peut distinguer trois grandes familles de cellules solaires:

II.6.1. Les cellules au silicium cristallin:

Pour lesquelles l'élément actif est le silicium dopé dans la masse. Bien que plus ancienne, cette technologie représente encore 90 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 12 à 20 % pour une durée de vie de 30 ans environ) ainsi que des investissements importants qui lui ont été destinés, que ce soit pour la transformation du silicium, l'élaboration des cellules ou l'assemblage des modules.

II.6.2. Les cellules à base de couches minces:

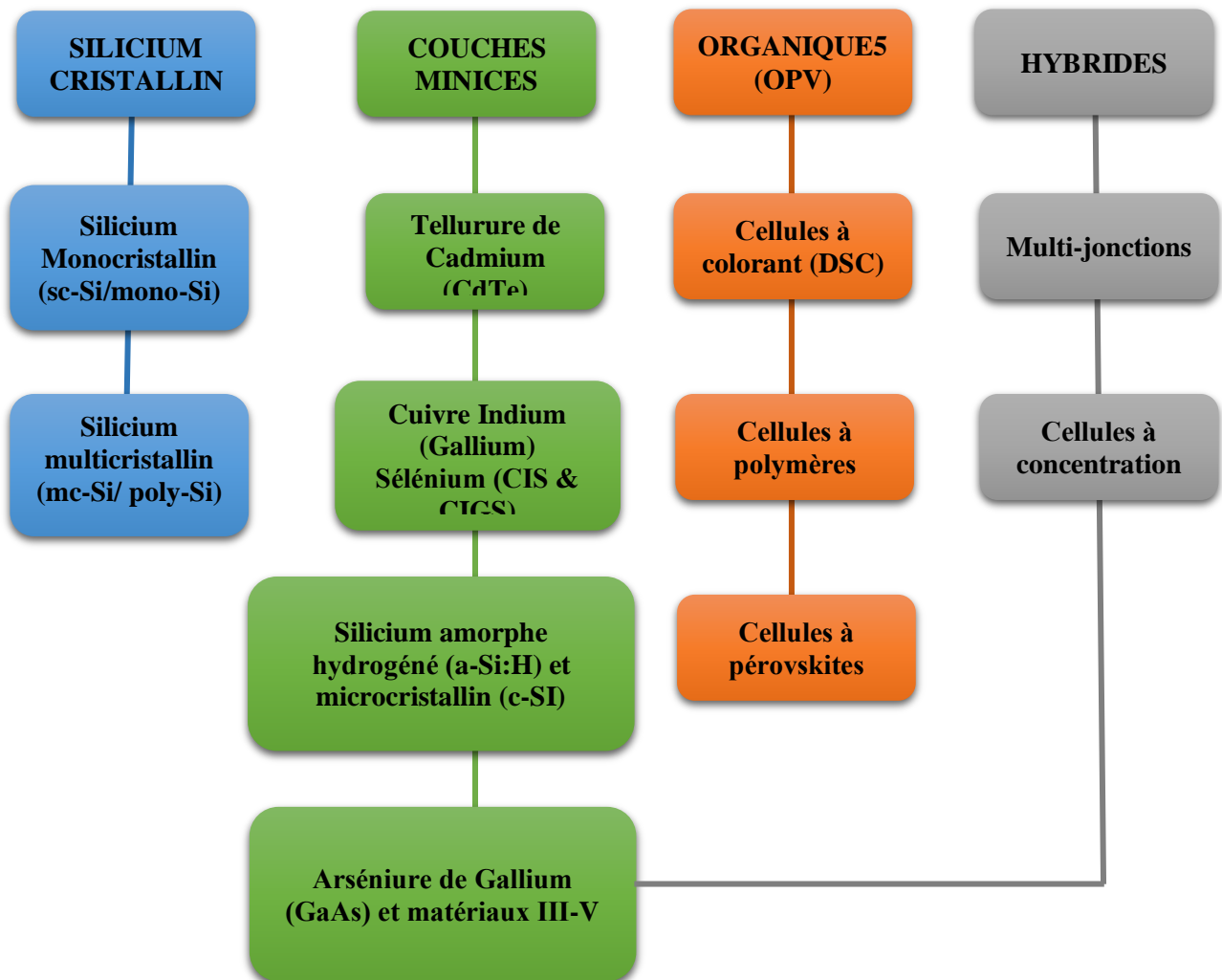
Qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semi-conducteur à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 % et reste relativement stable:

Ces filières ont perdu l'avantage de leur moindre coût de production avec les investissements massifs consentis dans le silicium au début des années 2000.

II.6.3. Les cellules à base de photovoltaïque organique

Segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

Enfin, la famille des hybrides présentée sur l'illustration ci-dessous rassemble les cellules mettant en présence des technologies de natures différentes pour atteindre des rendements optimisés.



Classification des principales technologies de cellules solaires PV

II.7. Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire:

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de diode.

Sa caractéristique $I(V)$ correspond à la soustraction du photocourant et du courant de la diode à l'obscurité par [14 ,15]:

$$I(v) = I_{obs}(V) - I_{ph} = I_s \exp (qV / KT - 1) - I_{ph} \quad (\text{II.1})$$

Avec:

I_{ph} : la densité de courant photogénéré.

I_{obs} : la densité de courant d'obscurité.

I_s : le courant de saturation de la diode.

q : la charge élémentaire.

K : la constante de Boltzmann et T : la température.

La caractéristique de la cellule dans l'obscurité est la même que celle de la diode. Nous avons montré sur la figure II.6 deux caractéristiques de la tension de courant d'une cellule solaire dans l'obscurité dans les lignes pointillées, et sous l'éclairage dans les lignes pleines.

Notez que la courbe sous illumination est simplement décalée de la première par la valeur de I_{cc} , qui reflète la génération continue de courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur V_{co} , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant à l'obscurité [16].

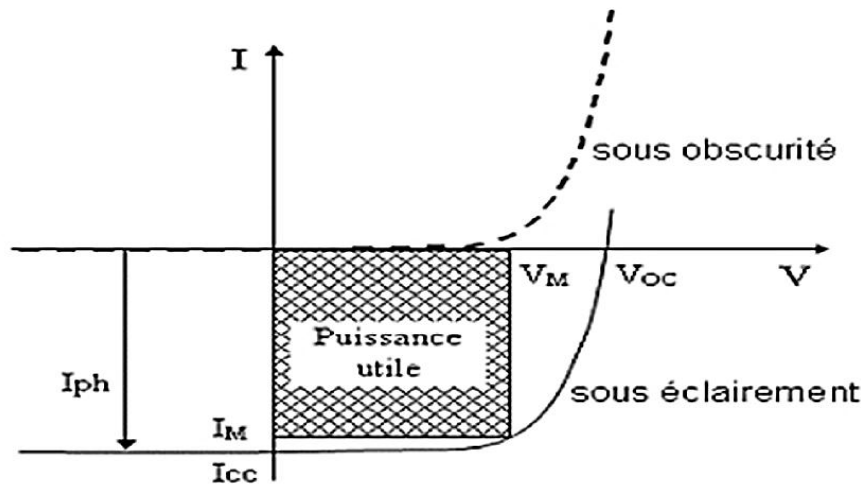


Figure II. 5 : Caractéristiques $I(V)$ à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.

II.8.Schéma électrique équivalent:

Nous avons vu qu'une cellule solaire en fonctionnement peut être identifiée par un générateur de courant fournissant un courant lumineux (I_E), auquel il faut soustraire le courant de diode de polarisation directe (I_{obs}).

On représenté le schéma électrique équivalent dans la figure II.5, Et on écrit [15]:

$$I = I_E - (I_{obs1} + I_{obs2}) - I_p \quad (\text{II.2})$$

Soit:

$$I = I_E - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V_j}{U_T}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left[\frac{V_j}{2U_T}\right] - 1 \right] - \frac{V_j}{R_p} \quad (\text{II.3})$$

$$V_j = V + I.R_s \quad (\text{II.4})$$

Avec:

I: courant dans la charge

IE: courant d'éclairage

Iobs1 et Iobs2: courant de diode

IP: courant dans la résistance parallèle.

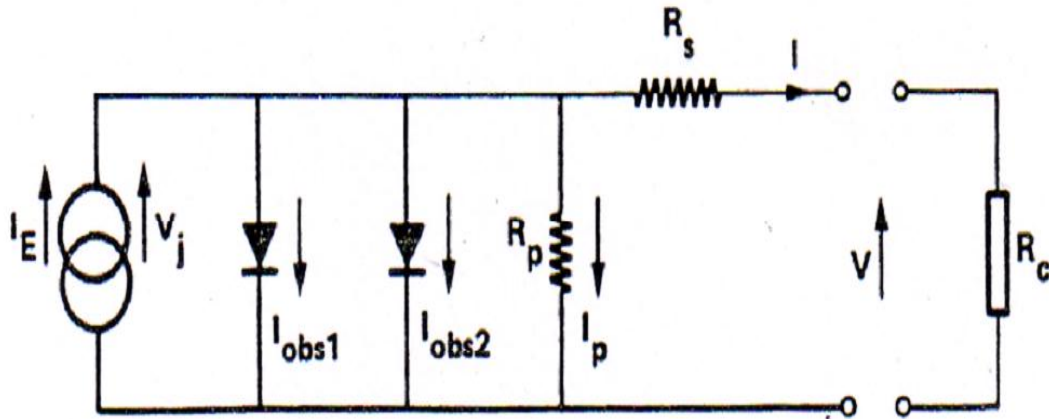


Figure II. 6 : Schéma électrique équivalent d'une pile solaire sous faible injection.

II.9. Paramètres d'une cellule solaire:

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes.

Donc les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont [17]:

- ⊗ Le courant de court-circuit I_{cc}
- ⊗ La tension en circuit ouvert V_{co}
- ⊗ Le facteur de forme FF
- ⊗ Le rendement de conversion d'énergie η
- ⊗ La réponse spectrale RS .

II.9.1. Courant de court-circuit, I_{cc} :

Ce courant est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule, augmentent linéairement avec l'intensité d'éclairage de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement et de la température.

II.9.2. Tension de circuit ouvert, V_{co} :

La tension en circuit ouvert, exprimée en millivolts, est mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Cela dépend de la différence de travail des électrodes de sortie et de la résistance shunt. Il diminue avec la température et varie avec l'intensité lumineuse.

II.9.3. Facteur de forme, FF:

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge. Cette puissance est maximale (notée P_m) pour un point de fonctionnement $P_m (I_m, V_m)$ de la courbe courant-tension.

II.9.4. Rendement de conversion η :

Le rendement de conversion (efficacité) est défini comme le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et l'énergie lumineuse incidente P_{inc} . Il est exprimé en pourcentage, désignant le rendement de conversion en énergie.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_{inc}} \quad (\text{II.5})$$

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

II.9.5. Réponse spectrale (RS) d'une cellule photovoltaïque:

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

La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante [17]:

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} (A/W) \quad (\text{II.6})$$

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

$$EQE(\lambda) = SR(\lambda) \frac{hc}{\lambda q} \quad (\text{II.7})$$

Le rendement quantique interne IQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est I

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (\text{II.8})$$

Ou $R(\lambda)$ représente le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde λ .

II.10. Conclusion:

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque.

Ce chapitre servira de base théorique pour la suite de notre travail, Nous avons commencé par une explication simple sur les cellules photovoltaïques et son histoire Puis on définit l'énergie et le rayonnement solaire. Après nous aussi avons donné le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, ses caractéristiques électriques et son schéma électrique équivalent ainsi que ses paramètres.



Chapitre III:
Généralités Sur Les
Logiciels De Simulation

III. 1. Introduction:

SCAPS (à **Solar Cell Capacitance Simulator**): est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électronique et informatique (ELIS) de l'Université de Gent, Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement: Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemegeers . [18-19].

Le logiciel est disponible gratuitement pour la communauté de les recherche de photovoltaïques (établissements et Instituts de recherche). Il fonctionne sur PC sous Windows 95, 98, NT, 2000 , XP , Vista , Windows 7 , et occupe environ 50 Mo d'espace disque , Le logiciel peut être téléchargé gratuitement. Il faut rapporter à la connaissance de à Marc Burgelman le téléchargé d'une version de SCAPS .

III. 2. Notions de base:

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé par LabWindows/CVI de la national Instruments. Il s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. La fenêtrer qui s'ouvre est présentée dans la figure III.1.

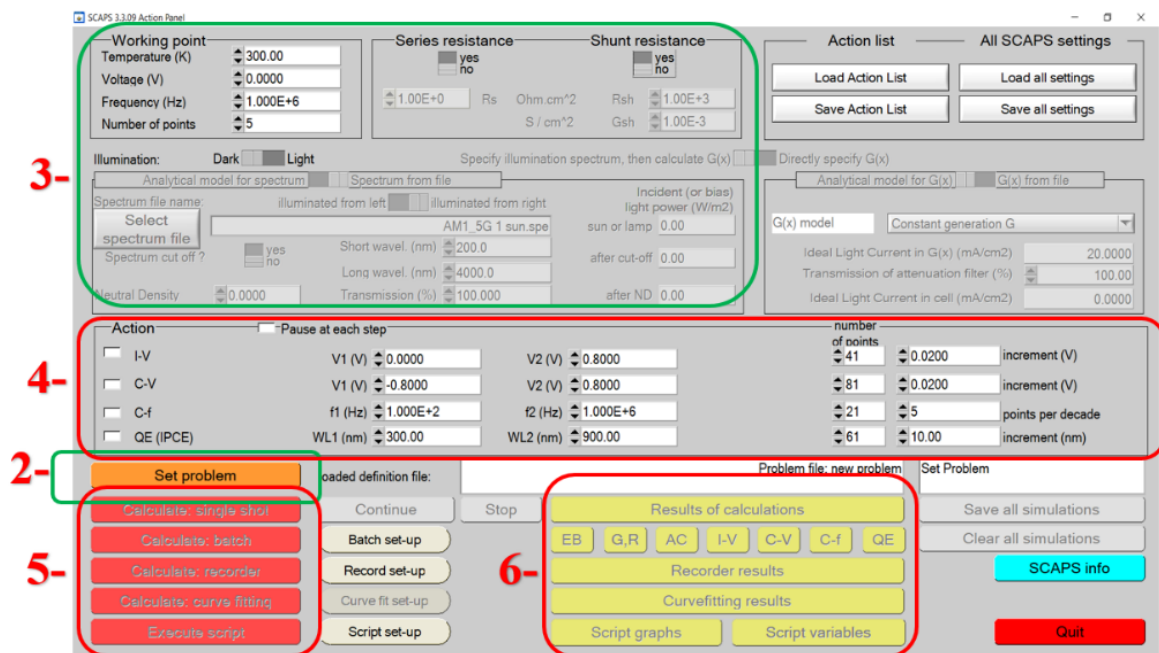


Figure III. 1: Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

III. 3. La signification des blocs:

La signification des blocs numérotés de 1 à 6:

1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation (voir la section 6).

➤ Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.

On définir les blocs de ce logiciel, est expliquée dans le texte. Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base:

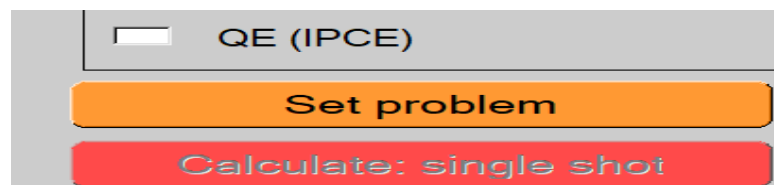
III.3. 1. Lancer SCAPS:



On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3309.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action.

III.3. 2. Définir le problème:

Ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.



On clique sur le bouton (**Set problem**) dans le panneau d'action, et on a choisi **load** (Sont indiqués dans la figure III.2) dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple: NUMOS CIGS Baseline.def), C'est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS.



Figure III. 2: Définir le problème

III.3. 3. Définir le point de fonctionnement:

Est indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).

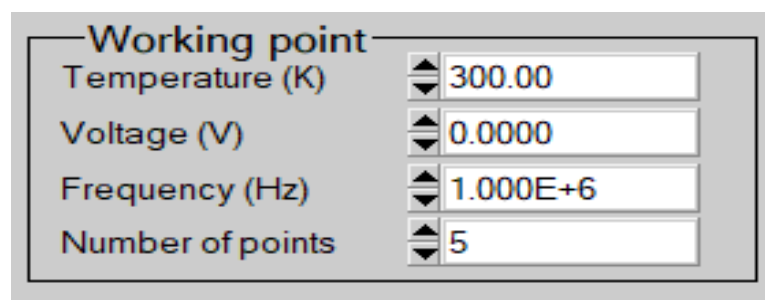


Figure III. 3: Le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique:

- ❖ **La température T:** Importante pour toutes les mesures. Note: dans SCAPS, seulement $N_c(T)$, $N_v(T)$, les vitesses thermiques, le voltage thermique k et tous leurs dérivés sont les seules variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T, les paramètres du matériau correspondant.
- ❖ **Le voltage V:** il ne concerne pas les simulations I-V et C-V. C'est le

voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et $QE(\lambda)$. SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.

- ❖ **La fréquence f:** elle ne concerne pas les simulations I-V, $QE(\lambda)$ et C-f. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée.
- ❖ **L'illumination:** elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour $QE(\lambda)$, elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont: l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one sun ($= 1000 \text{ W} / \text{m}^2$) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

III.3. 4. Sélection des caractéristiques à simuler:

Ce bloc spécialisé des caractéristiques à simuler, Dans la partie Action du panneau action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: I-V, C-V, C-f et $QE(\lambda)$, On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes.

III.3. 5. Lancer le calcul:

C'est une commande pour lancer le calcul.



III.3. 6. Afficher les courbes simulées:

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure III.4. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on

utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran.

Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés (si vous avez toutefois simulé au moins une seule opération de mesure).

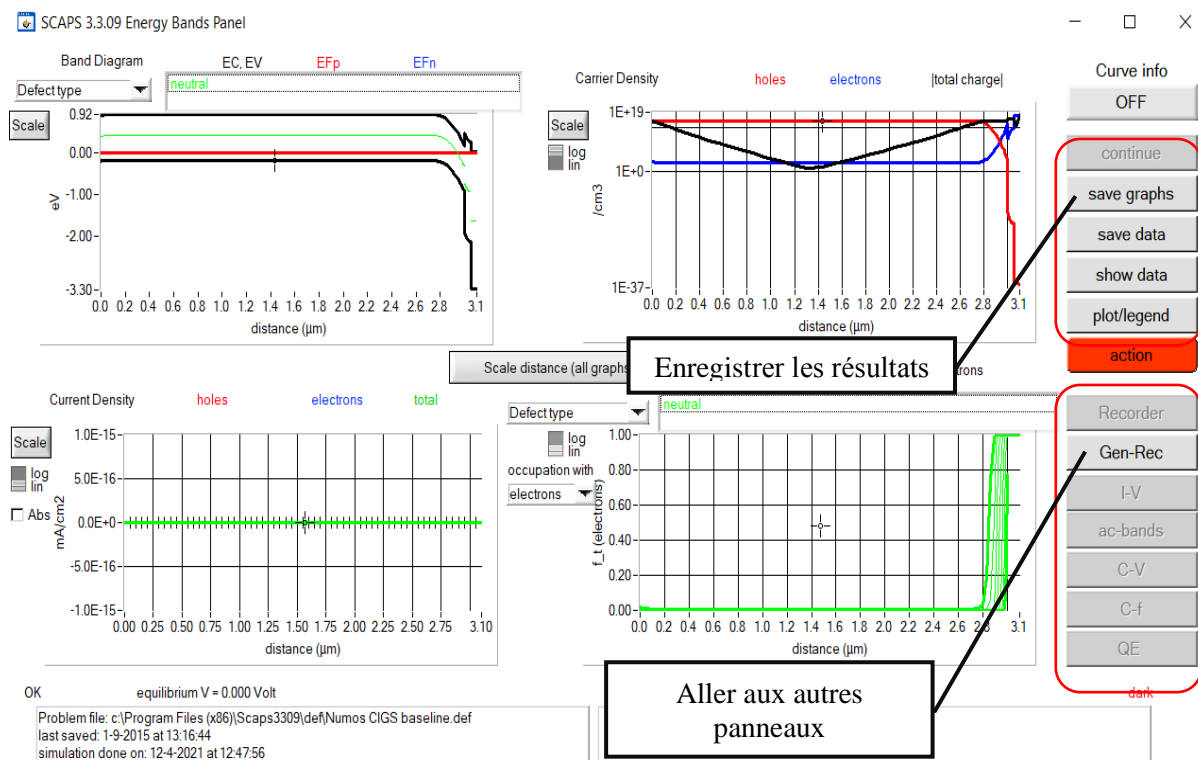


Figure III. 4: Panneau des bandes d'énergie

III.3. 7. Les courbes I-V:

La figure III.5 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré).

On clique CLEAR ALL GRAPHS dans le panneau d'action. Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe.

Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué.

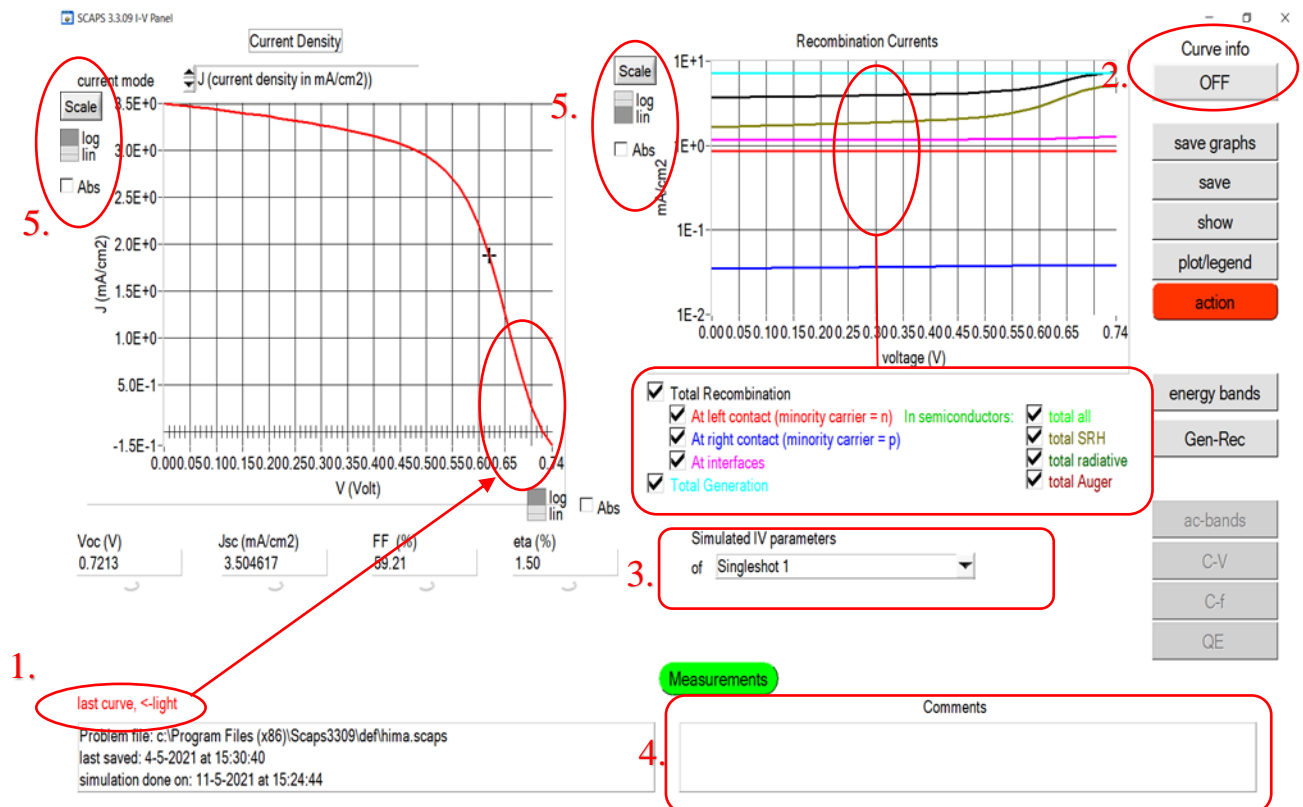


Figure III. 5: Panneau d’affichage des courbes I-V à l’obscurité et en éclaircissement.

Le bouton SCALE aide à changer la gamme et l’échelle des axes. Si on appuie sur le bouton CTRL et on sélectionne une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom intérieur (agrandissant) dans la zone sélectionnée. L’appui sur le bouton CTRL accompagné d’un clic droit donnera un zoom extérieur (Zoom out).

III. 4. Définition d’une cellule solaire:

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d’utiliser l’interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

III.4. 1. Edition de la structure d'une cellule solaire:

Quand on clique sur le bouton "**Set problem**" sur le panneau d'action, le panneau "**SOLAR CELL DEFINITION**" s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers.

Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d'extension **.def** qui peuvent s'ouvrir avec Notepad.exe ou Wordbad.exe.

Il est déconseillé dès les modifier au risque des rendre inutilisables par la suite. Les propriétés des couches, contacts et de l'interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure III.6.

De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant "**ADD LAYER**".

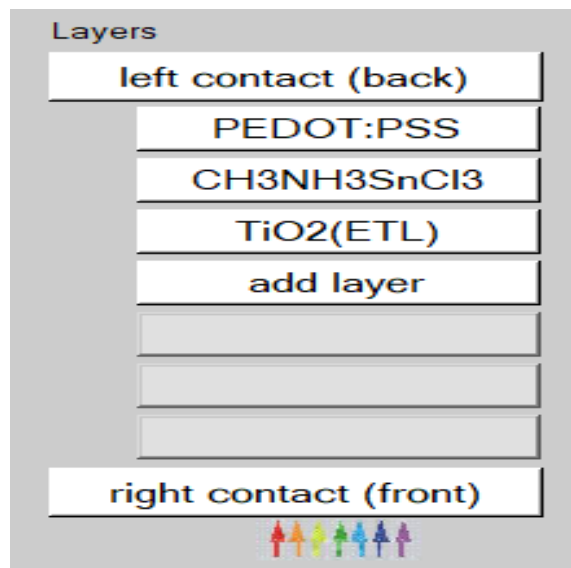


Figure III. 6: Définition de la structure d'une cellule solaire.

III.4. 2. Contacts:

Les propriétés des contacts peuvent être introduits soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact ‘CONTACT PROPERTIES PANEL’ s’ouvre, comme le montre la figure III.7.

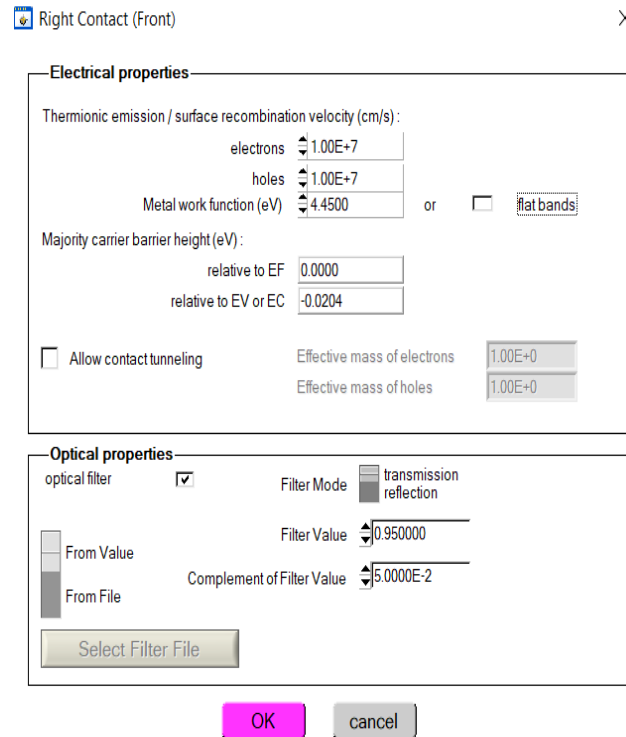


Figure III. 7: Panneau des propriétés des contacts

Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit:

- Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.
- Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).
- La barrière des porteurs majoritaires.
- L’effet tunnel (si on veut en tenir compte).

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données.

III.4. 3. Définition des couches:

En cliquant sur le bouton « **add layer** », une fenêtre (Figure III.8) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire.

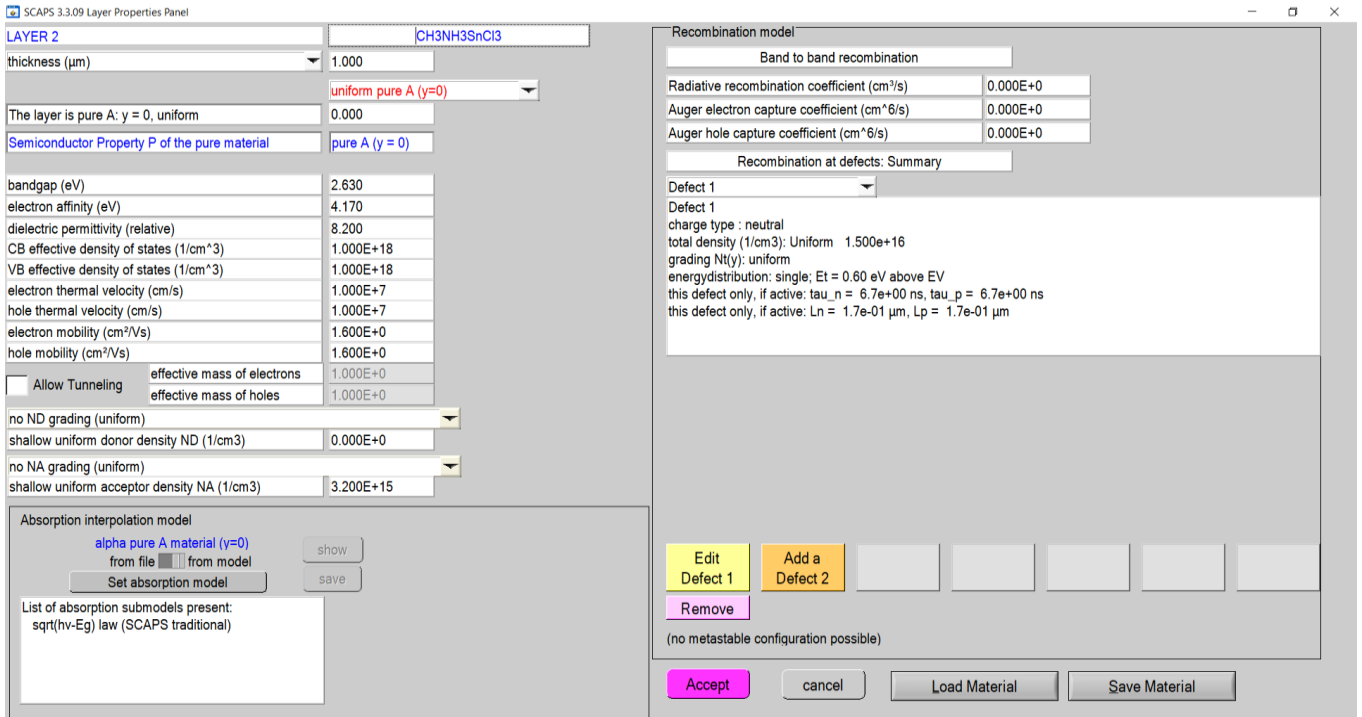


Figure III. 8: Propriétés de la couche ajoutée.

- Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage).
- Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite.
- Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profil.
- Dans le quatrième block, on introduit: le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesse thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel.
- Dans le cinquième block, figure III.9, on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques).

no ND grading (uniform)		
shallow uniform donor density ND (1/cm3)		0.000E+0
no NA grading (uniform)		
shallow uniform acceptor density NA (1/cm3)		3.200E+15

Figure III. 9: Propriétés des dopages définis.

- Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre la figure III.10. L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données.
- SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption.

Absorption model		Show / Set alpha(composition: lambda)	
		alpha (y=0)	alpha (y=1)
		<input type="checkbox"/> from model <input type="checkbox"/> from file	<input type="checkbox"/> from model <input type="checkbox"/> from file
absorption constant A (1/cm eV ^{1/2})		1.000E+5	1.000E+4
absorption constant B (eV ^{1/2} /cm)		0.000E+0	0.000E+0
		scorption\CuInSe2.abs	
		absorption file for y = 0	absorption file for y = 1
<input type="button" value="show"/> <input type="button" value="save"/>			

Figure III. 10: Modèle de l'absorption.

Le type des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges. Et en volume présent est indiqué dans le côté droit du panneau des propriétés de la couche (Figure III.11).

Band to band recombination			
Radiative recombination coefficient (cm ² /s)	1.000E-5	1.000E-5	uniform
Auger electron capture coefficient (cm ⁶ /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform
Auger hole capture coefficient (cm ⁶ /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform

Defect 4 of layer 1	
defect type	Single Donor (0/+)
capture cross section electrons (cm ²)	1.000E-15
capture cross section holes (cm ²)	1.000E-15
energetic distribution	Gauß
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7)
energy level with respect to Reference (eV)	0.600
characteristic energy (eV)	0.200
Nt grading dependent on position x: Nt (x) exponential	
Nt total (1/cm ³)	Left (x=0) 1.000E+15 Right (x=1) 1.000E+14
Nt peak (1/eV/cm ³)	Left (x=0) 2.821E+15 Right (x=1) 2.821E+14

Figure III. 11: Définition des types de recombinaison présents

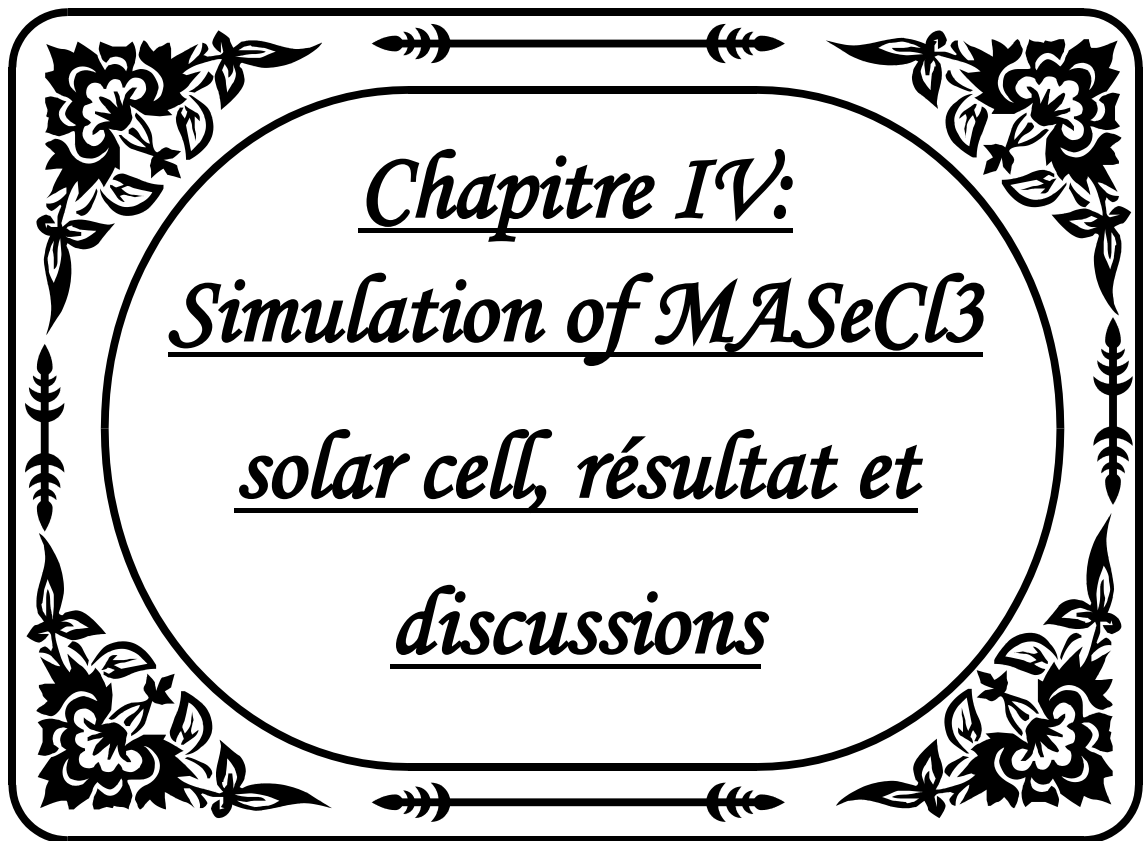
Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents.

On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges [20].

III. 5. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description relativement détaillée sur le logiciel de simulation SCAPS, Nous avons défini sa structure, ses outils et ses capacités permettant de calculer tous les paramètres internes et externes liés à la cellule solaire et générer ainsi ses caractéristiques électriques comme la caractéristique densité de courant – tension (I-V) et la réponse spectrale (QE).

Ainsi elle est nécessaire pour l'optimisation des structures des dispositifs photovoltaïques.



Chapitre IV:
Simulation of $M\text{AsSeCl}_3$
solar cell, résultat et
discussions

IV.1. Introduction:

MAs₂Cl₃ est un matériau sans plomb prometteur pour l'application de cellules solaires. Dans ce travail, nous devrions simuler une cellule solaire basée sur le matériau mentionné ci-dessus dans le but d'améliorer l'efficacité en utilisant des matériaux ETL et HTL différents et des paramètres d'ingénierie.

Dans le travail qui suit nous allons étudier l'effet de l'épaisseur des trois couches PEDOT: PSS, CH₃NH₃SnCl₃ et TiO₂ sur la densité de courant de court-circuit (J_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η).

Les résultats obtenus dans cette opération sont présentés dans la section qui suit.

IV.2. Structure et paramètres de la cellule étudiée:

IV.2.1. Présentation de la cellule étudiée:

Notre travail consiste à simuler une cellule solaire à base de CH₃NH₃SnCl₃. En raison de ses caractéristiques remarquables telles que l'intervalle de bande interdite (Band gap) idéal, Large spectre d'absorption, Le mécanisme de transmission est bon, Facilité de fabrication sur substrat flexible, ajustement de l'écartement et grande longueur d'étalement et à simuler ces paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal.

Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes: (PEDOT: PSS/ CH₃NH₃SnCl₃/ TiO₂(ELT)).

Une structure typique de cellules solaires à base de CH₃NH₃SnCl₃ consiste d'une couche absorbante et en haut de p-type (TiO₂(ELT)) et n- type (PEDOT: PSS) disposé dans la partie inférieure. Comme le montre la Figure IV.1.

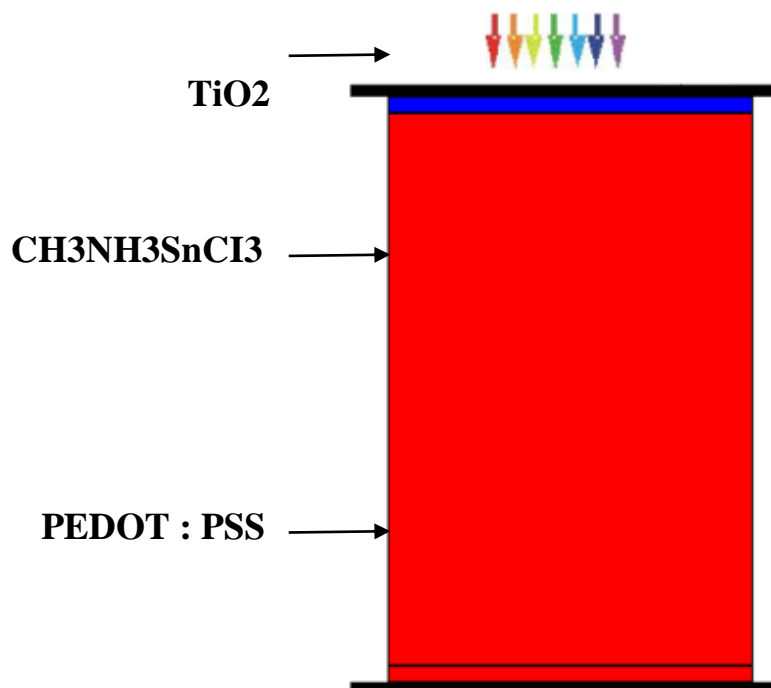


Figure VI. 1: schéma simplifié de la cellule solaire utilisée

IV.2.2. Les paramètres du dispositif étudié:

❖ Propriétés des différentes couches:

Propriété \ Couche	PEDOT: PSS	CH ₃ NH ₃ SnCl ₃	TiO ₂
Épaisseur (μm)	0.030	1.000	0.030
Bande interdite (eV)	1.600	2.630	3.200
Affinité électronique (eV)	3.400	4.170	4.000
Permittivité diélectrique	3.000	8.200	3.900
CB densité effective d'états (cm ⁻³)	1.000E+22	1.000E+18	2.500E+21
VB densité d'états effective (cm ⁻³)	1.000E+22	1.000E+18	2.500E+21
Vitesse thermique des électrons (cm / S)	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7
Trou vitesse thermique (cm/ S)	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7

mobilité (cm ² / V.S.)	4.500E-4	1.600E+0	2.000E-1
Trou de la mobilité (cm ² / V.S.)	9.900E-5	1.600E+0	2.000E-1
densité de donneur uniforme peu profonde ND (cm ⁻³)	0.000E+0	0.000E+0	2.930E+17
densité d'accepteur uniforme peu profonde NA (cm ⁻³)	1.000E+22	3.200E+15	0.000E+0
Défect Nt(cm ⁻³)	1.000E+15	1.500E+16	1.000E+0

Tableau IV. 1: Propriétés des différentes couches(PEDOT: PSS/ CH₃NH₃SnCl₃/TiO₂).

❖ Cellule de base:

Les épaisseurs et les paramètres utilisées des différentes couches de la cellule de base étudiée sont regroupées dans les tableaux VI (1 et 2).

	Les couche	Epaisseur (µm)
1	PEDOT: PSS	0.030
2	CH ₃ NH ₃ SnCl ₃	1.000
3	TiO ₂	0.030

Tableau IV. 2: L'épaisseur de chaque couche de la cellule de base étudiée.

IV.3. Simulation par SCAPS:

IV.3.1. Effet de l'épaisseur de couche PEDOT/PSS, CH₃NH₃SnCl₃ et TiO₂ sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire:

Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans les cas suivants

✎ Premier cas:

Lorsque l'épaisseur du matériau (PEDOT/PSS) est modifiée de (**0.01 à 0.05 µm**), nous choisissons les meilleures propriétés et installer leur propre épaisseur, une fois que l'épaisseur de la substance (PEDOT/PSS) est ajoutée aux

propriétés énumérées dans les tableaux VI (1 et 2).

valeur	Épaisseur (μm)	eta (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)
1	0.01	1.49	0.71	3.47	60.23
2	0.02	1.49	0.71	3.47	60.23
3	0.03	1.49	0.71	3.47	60.23
4	0.04	1.49	0.71	3.47	60.23
5	0.05	1.49	0.71	3.47	60.23

Tableau IV. 3: Propriété de couche(PEDOT: PSS)

Nous avons développé à la Tableau VI.3, Lors du changement de couche PEDOT / PSS, nous constatons que les propriétés photoélectriques sont les mêmes dans toutes les valeurs et qu'il n'y a donc pas de valeur optimale, donc le changement d'épaisseur du PEDOT / PSS n'affecte pas les propriétés photoélectriques, nous choisissons donc toute valeur pour lui comme valeur optimale.

✎ Deuxième cas:

Nous changeons aussi, l'épaisseur du matériau (CH₃NH₃SnCl₃) de (**0.2 à 1.2 μm**), nous choisissons les meilleures propriétés et installer leur propre épaisseur, une fois l'épaisseur de la substance (PEDOT/PSS) et (TiO₂) ajoutée aux propriétés énumérées dans le tableau IV.2.

Valeur	Épaisseur(μm)	eta (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)
1.00	0.20	0.94	0.52	2.41	74.81
2.00	0.31	1.07	0.54	2.97	67.29
3.00	0.42	1.12	0.60	3.27	57.07
4.00	0.53	1.27	0.67	3.30	57.32
5.00	0.64	1.37	0.69	3.26	61.08
6.00	0.76	1.43	0.70	3.34	61.51
7.00	0.87	1.47	0.70	3.42	61.00
8.00	0.98	1.48	0.71	3.46	60.35
9.00	1.09	1.49	0.72	3.49	59.75
10.00	1.20	1.50	0.72	3.50	59.21

Tableau IV. 4: Propriété de couche(CH₃NH₃SnCl₃)

Nous avons observé que la meilleure épaisseur de la couche CH₃NH₃SnCl₃ est de 1 μm et nous soulignons également que les paramètres photovoltaïques diminuent avec l'épaisseur croissante. et la raison en est lors de l'augmentation de l'épaisseur de la couche (CH₃NH₃SnCl₃) la résistance des matériaux augmente, et cela conduit à l'inhibition du mouvement des électrons.

Alors on va choisir 1 μm comme valeur optimale.

✎ Troisième cas:

Et on fin, Nous changeons l'épaisseur du matériau (TiO₂) de (**0.01 à 0.05 μm**), et choisissons les meilleures propriétés et installer leur propre épaisseur.

Valeur	Épaisseur(μm)	eta (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)
1.00	0.01	1.50	0.71	3.50	60.25
2.00	0.02	1.49	0.71	3.49	60.23
3.00	0.03	1.49	0.71	3.47	60.23
4.00	0.04	1.48	0.71	3.45	60.23
5.00	0.05	1.47	0.71	3.44	60.22

Tableau IV. 5: Propriété de couche(TiO₂)

Nous avons également remarqué que la meilleure épaisseur la couche de TiO₂ est de 0,1 μm , et que les paramètres photovoltaïques diminuent avec l'épaisseur accrue. La raison en est que plus l'épaisseur de la couche est élevée (TiO₂), La distance entre les deux couches augmente.

Ce qui rend difficile le déplacement des électrons entre les deux couches. Ensuite, nous choisirons 0,1 μm comme valeur idéale.

Et en fin: nous obtenons les propriétés suivantes:

$$\mathbf{Voc} = 0.72, \mathbf{Jsc} = 3.50, \mathbf{FF} = 59.21, \mathbf{\eta} (\%) = 1.50.$$

 **Note:**

La raison du faible rendement est due à band gap de couche CH₃NH₃SnCl₃

IV.3.2. Effet de densités d'accepteur (NA) de couche CH₃NH₃SnCl₃ sur les paramètres PV de la cellule solaire:

Lorsque densités d'accepteur (NA), de la couche (CH₃NH₃SnCl₃) est modifiée de (1.000E+15 à 3.500E+15), nous choisissons les meilleures les paramètres PV, et installer le Valeurs densités d'accepteur (NA).

✂ Effet de densité de donneur NA:

Nous sélectionnons quelques valeurs de NA cm⁻³ pour la couche d'absorption (CH₃NH₃SnCl₃) pour tracer:

- ✓ La caractéristique tension de circuit ouvert V_{co} .
- ✓ La caractéristique densité de courant de court-circuit I_{sc} .
- ✓ La caractéristique Facteur de forme FF .
- ✓ Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée (η).

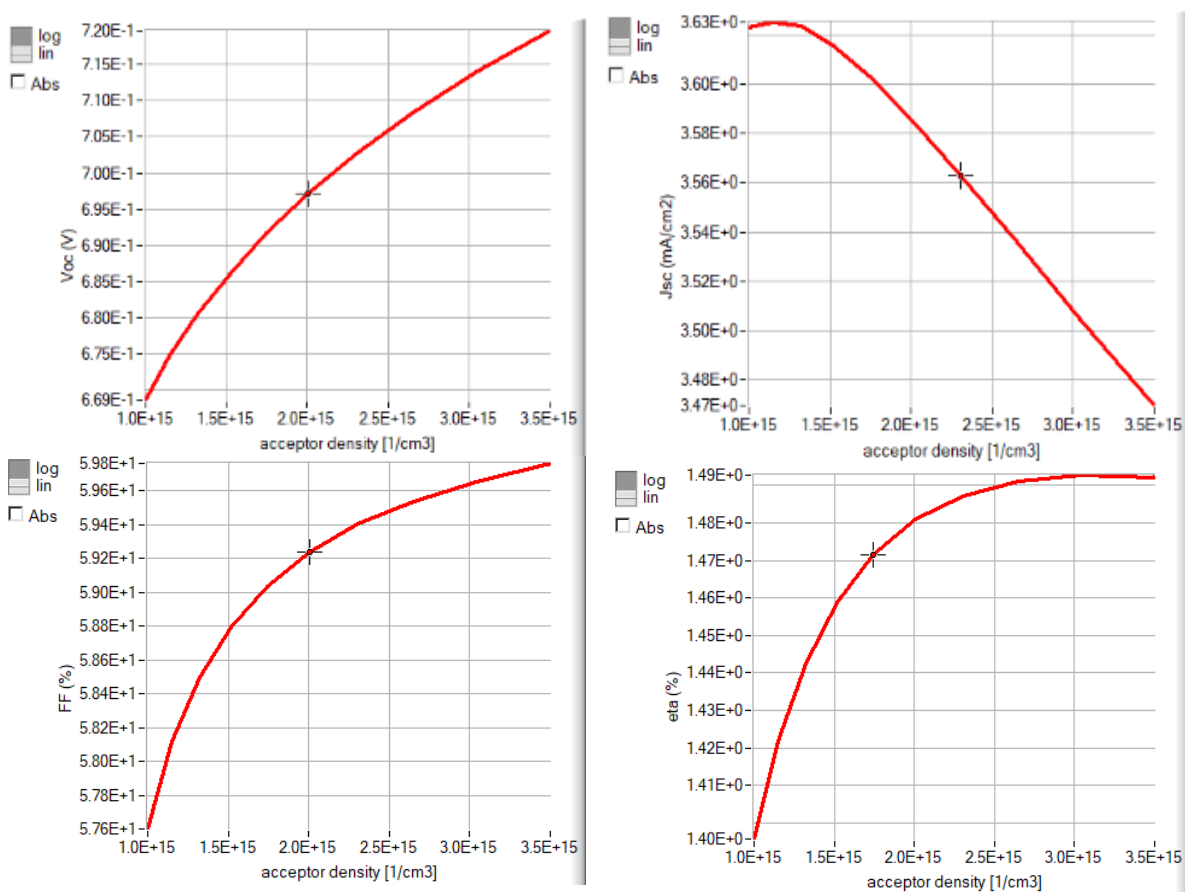


Figure IV. 2: Variation des paramètres photovoltaïques (V_{oc} , J_{sc} , FF et η) avec N_a des couches CH₃NH₃SnCl₃

Nous avons observé à la figure IV.2. La meilleure Na de la couche CH₃NH₃PbI₃ est de 3.5E+15 cm⁻³.

Nous notons également que la tension des circuits ouverts augmente à mesure que le courant électrique diminue, le facteur a été obtenu à 59.67%. Montre qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de valeur Na de la couche CH₃NH₃SnCl₃.

Nous avons obtenu un rendement maximal de 1.49% avec une valeur Na de 3.5E+15 cm⁻³, monte en figure IV.3.

La variation de la limite d'élasticité lorsque la valeur Na est comprise entre 1.0E+15 et 3.5E+15 cm⁻³ n'a pas d'importance. Ensuite, nous choisirons 3.5E+15 cm⁻³ comme valeur idéale.

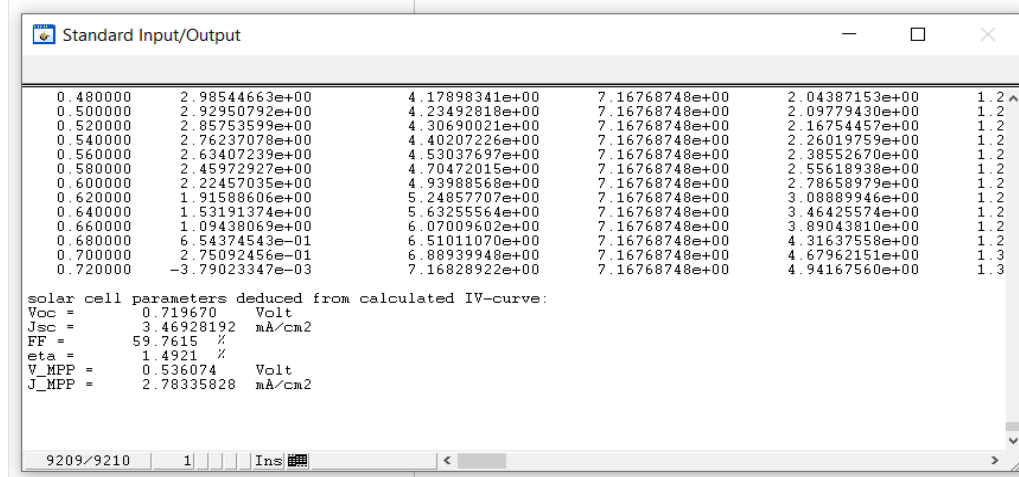


Figure IV. 3: les résultat de paramètres PV

IV.3.3. Effet de Température sur les paramètres PV de la cellule solaire:

Lorsque la température passe de (300 à 450 K), on observe son effet sur les paramètres PV de la cellule solaire. Nous prenons 8 valeur.

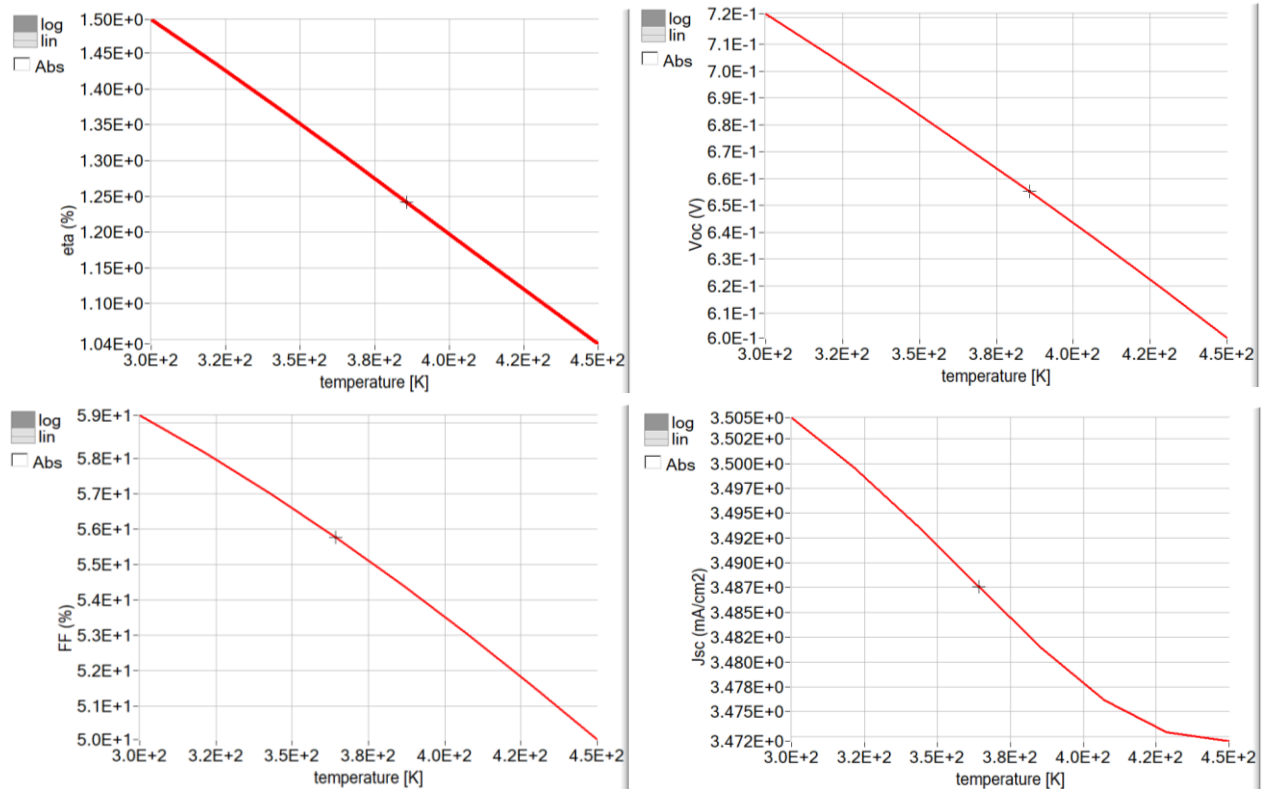


Figure IV. 4 : Variation du paramètres photovoltaïques (V_{oc} , J_{sc} , FF et η) avec les changements de température

Notons que lorsque la température augmente, le rendement des paramètres photovoltaïques diminue.

Ainsi, la température est affectée négativement que paramètres photovoltaïques.

IV.3.4. Courbe courant-tension:

La courbe I-V finale peut être obtenue en maintenant tous les paramètres améliorés du modèle de concepteur. La forme finale contient une l'épaisseur des couches PEDOT/Pss = 0.03 μm , CH₃NH₃SnCl₃ = 1.2 μm et TiO₂ = 0.03 μm et Dans ce foyer de dopage Na en (1.000E+15 à 3.500E+15), l'efficacité maximale de la puissance convertie est obtenue:

$$\mathbf{V_{oc} = 0.72, J_{sc} = 3.50, FF = 59.21, \eta (\%) = 1.50}$$

La Figure IV.5 représente la courbe caractéristique I-V finale du modèle simulé avec tous les paramètres optimisés précédents.

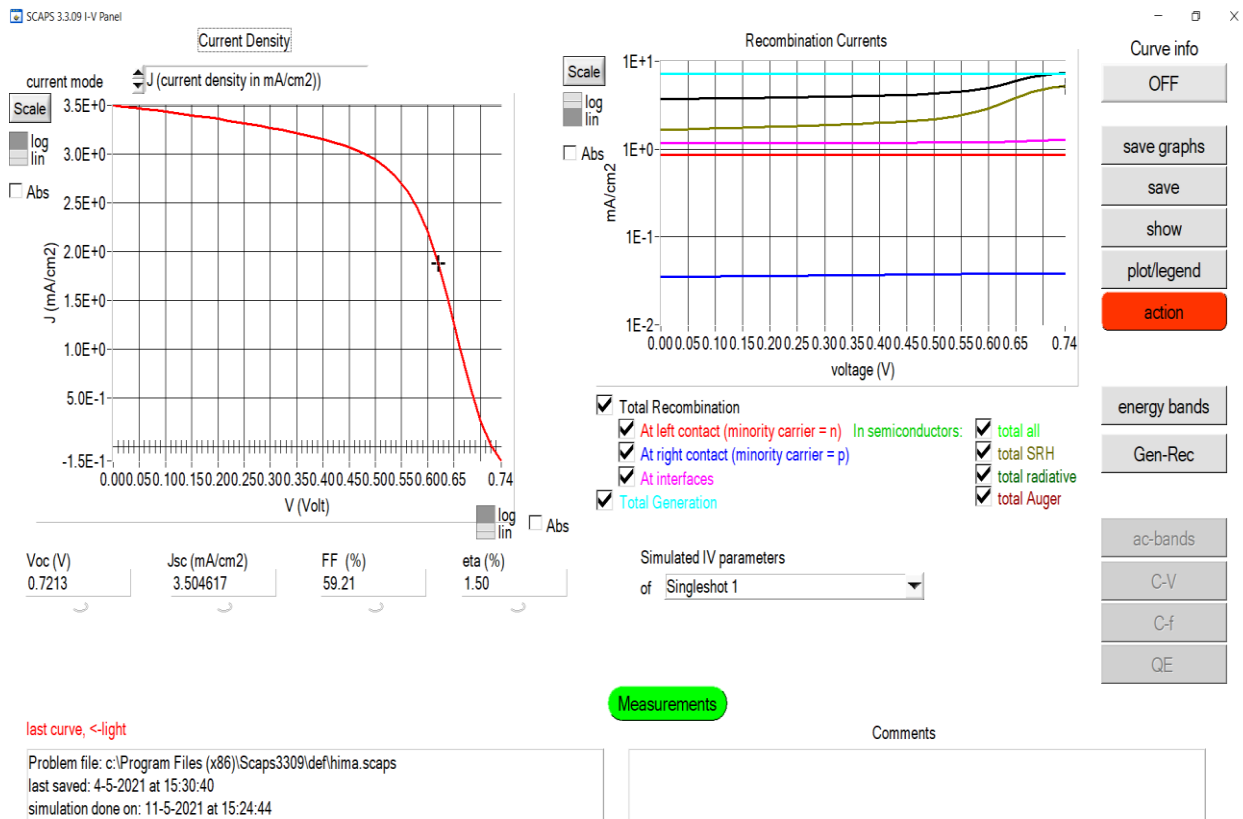


Figure IV. 5: Courbe I-V simulée.

IV.4. Conclusion:

La cellule solaire pérovskite ayant l'architecture Verre (PEDOT: PSS/CH₃NH₃SnCl₃/ TiO₂), est conçue et analysée à l'aide d'un simulateur de capacité de cellules solaires. L'épaisseur de la couche absorbante et la densité de défauts ont une influence sur les performances de la cellule solaire et la concentration de dopage de HTM et l'effet ETM sur le PV, les caractéristiques observées.

Une épaisseur modérée et un absorbeur à faible défaut présentent les meilleures performances. Les concentrations de dopage HTM, ETM, apportent une amélioration significative des paramètres PV.

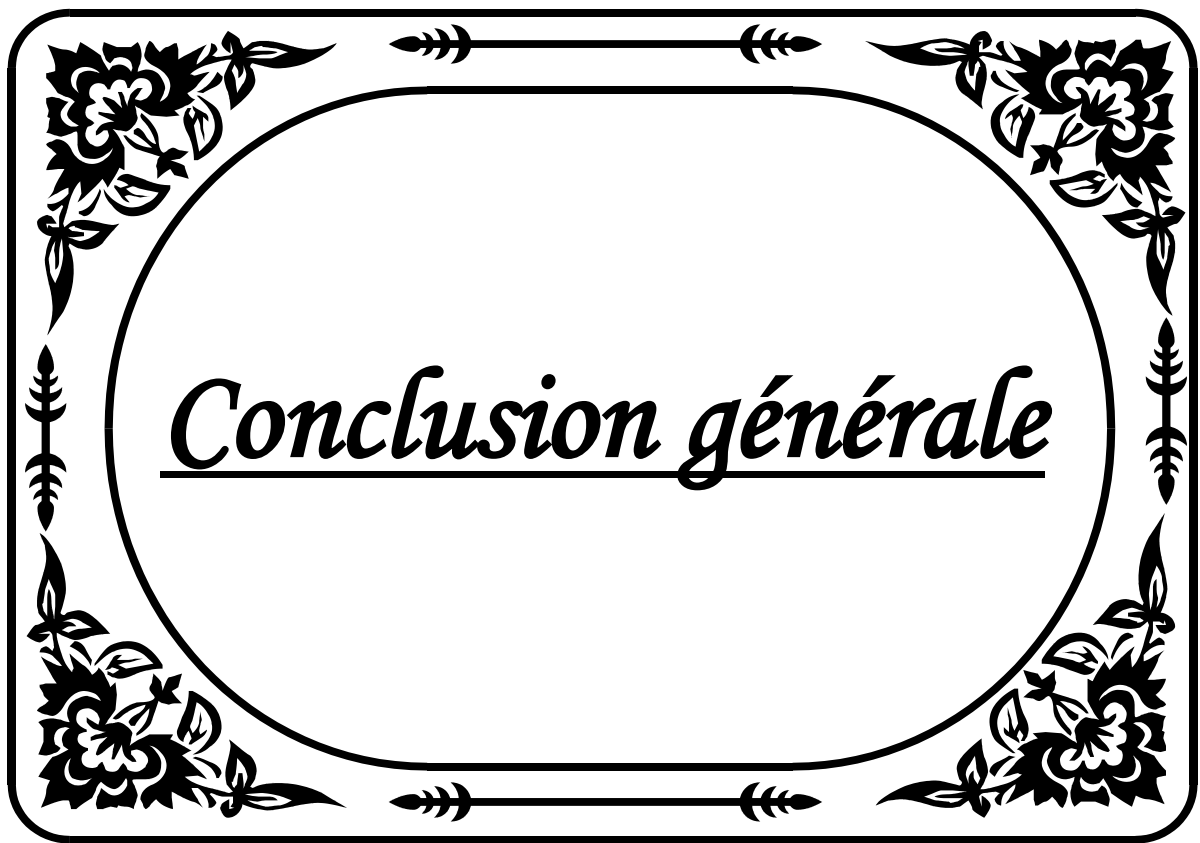
Simulant la cellule étudiée à travers le programme scaps:

Après avoir optimisé tous les paramètres et sélectionné les meilleurs résultats obtenus:

Épaisseur d'absorption des couches (PEDOT: PSS = 0.03 μm); (CH₃NH₃SnCl₃=1.2 μm) ; (TiO₂=0.3 μm) Nous avons atteint un rendement de conversion d'énergie de 1.50 % et une bonne valeur **Jsc** (3.50 mA / cm²), en plus des valeurs de **FF** (59.21%) et **Voc** (0.72 V), en note que La raison du faible rendement est due à band gap de couche CH₃NH₃SnCl₃.

Nous avons observé à la figure IV.2. La meilleure Na de la couche CH₃NH₃SnCl₃ est de 3.5E+15 cm⁻³. Nous notons également que la tension des circuits ouverts augmente à mesure que le courant électrique diminue, le facteur a été obtenu à 59.67%. Montre qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de valeur Na de la couche CH₃NH₃SnCl₃.

Est en fin notez que lorsque la température augmente entre (300 à 450 K), le rendement des paramètres photovoltaïques diminue.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de cellules photovoltaïques à base de pérovskitiques type semi-conducteur.

Ce travail est préoccupé par la conception et les analyses de pérovskite à base de plomb modèle de cellule solaire avec l'architecture flexible glass (PEDOT: PSS, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnCl}_3$ et TiO_2).

Méthode / Analyse: L'analyse de l'architecture des cellules solaires est réalisée à l'aide du simulateur de capacité de cellules solaires (SCAPS), C'est un ordinateur outil logiciel et est bien adapté aux analyses des homo et hétérojonctions, des multi-jonctions et de la barrière de Schottky dispositifs photovoltaïques. Cet outil logiciel fonctionne et simule sur la base de l'équation de Poisson et de la continuité des électrons et des trous. Pour ce modèle, il est utilisé pour optimiser les différents paramètres tels que l'épaisseur, la densité de défauts de l'absorbeur couche, concentrations de dopage (Na) du matériau de transport d'électrons (ETM) et du matériau de transport de trous (HTM).

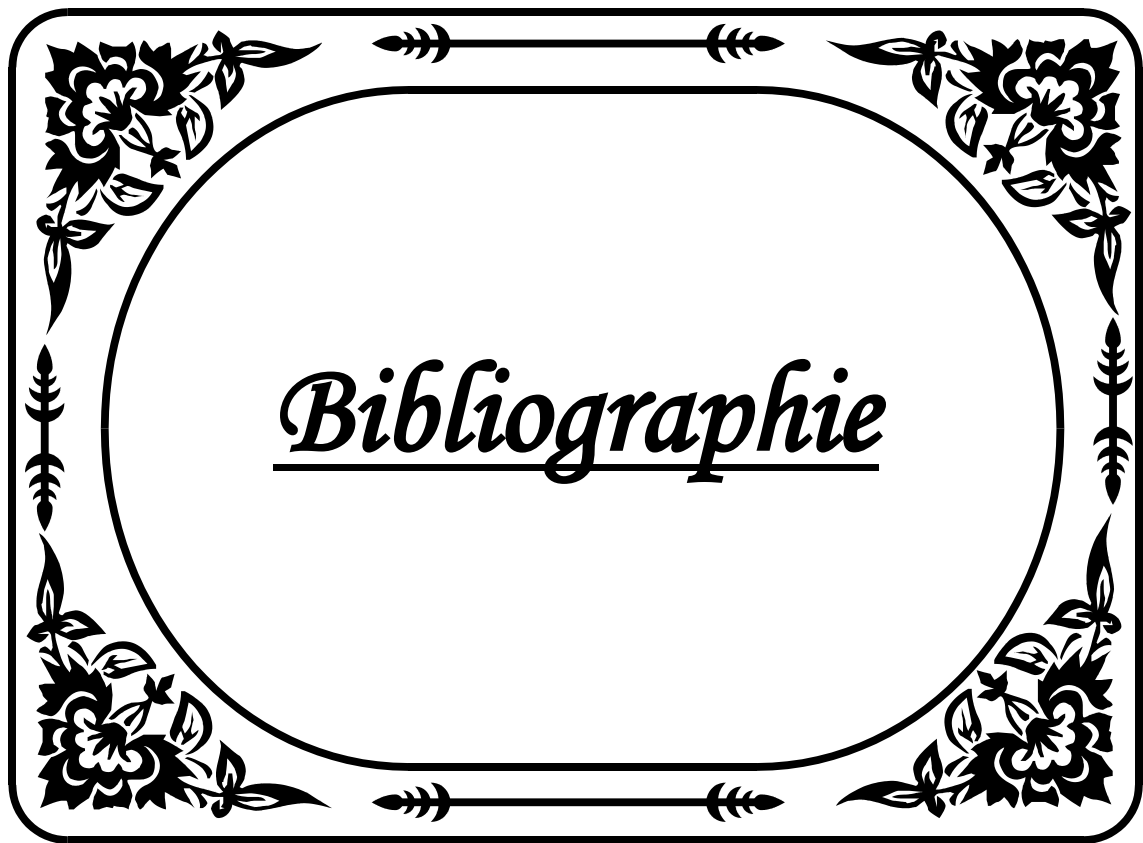
Constatations: L'épaisseur de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnCl}_3$ varie de 0.2 μm à 1.2 μm et les meilleurs résultats sont observés à 1.2 μm .

Lorsque densités d'accepteur (NA), du la couche ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnCl}_3$) est modifiée de ($1.000\text{E}+15$ à $3.500\text{E}+15$), Nous avons observé La meilleure Na de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ est de $3.5\text{E}+15 \text{ cm}^{-3}$.

En suite: Lorsque la température passe de (300 à 450 K), on observe son effet sur les paramètres PV de la cellule solaire, Notons que lorsque la température augmente, le rendement des paramètres photovoltaïques diminue.

En ajustant l'épaisseur de la couche d'absorbeur et les concentrations de dopage, les résultats prévus sont les suivants ; rendement maximal de conversion de puissance (PCE) de 1.50%, densité de courant de court-circuit (I_{sc}) de 3.50 mA / cm², en plus des valeurs de FF (59.21%) et V_{oc} (0.72 V).

En fin que La raison du faible rendement est due à band gap de couche $CH_3NH_3SnCl_3$.



Bibliographie

Bibliographie

- [1]. Brahim Haraoubia, "Electronique Generale, Les Composants Passifs, Les Composants Actifs, L'amplificateur Operationnel". 2èmeEdition, Office Des Publication Universitaires. Alger.
- [2]. Henry Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, 1987.
- [3]. M. AMARA, Propriétés Electroniques des Conducteurs et des SemiConducteurs",rappels théoriques Plate-forme Matière Condensée et Cristallographie (MCC) C.E.S.I.R.E. Université J.Fourier Grenoble.
- [4]. J. Lavery, Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco", Thesis Navalpostgraduate school Monterey California,2008.
- [5]. Luc LASNE, Physique et technologie des composants de puissance", université deBordeaux 1, 2003.
- [6]. PINTO M. R, Conor S. Rafferty and Robert W. Dutton, "PSCES2 - Poisson andcontinuity equation solver", Stanford Electronics Laboratory Technical Report, StanfordUniversity, September 1984.
- [7]. Y. MAROUF. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco,Mémoire de Magister. Université Med KhiderBiskra, 2013.
- [8]. S. SELBERHERR, Analysis and simulation of semiconductor devices. Wien, NewYork: Springer-Verlag, 1984. (s.d.).
- [9]. O. Daranféd, "Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de Cu_2ZnSnS_4 ", Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine , 2013.

- [10]. A. Labouret et al: "Cellules solaires: "les bases de l'énergie photovoltaïque", collection ETSF, Dunod, 4e édition, 2005
- [11].[http://www.grenoble-isere.com/etudes-etterritoires/pdf_filieres/photovoltaiqueEtude2010_V14- Fr.pdf](http://www.grenoble-isere.com/etudes-etterritoires/pdf_filieres/photovoltaiqueEtude2010_V14-Fr.pdf)
- [12]. L'effet photovoltaïque, [http:// www.energieplus-le site.be/energieplus/page 16679.htm](http://www.energieplus-le-site.be/energieplus/page16679.htm), consulté le 15/04/2021.
- [13]. A.GREEN.M. " Solar cell ", Ed, University of New South Wales, 1992, p.336 .
- [14]. H. Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 2ème Edition, Masson, 1990.
- [15]. S.M.SZE, "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, 1981.
- [16]. Kateb Mohamed Nadjib, Mokrani Zakaria "Conception et simulation électrique d'une cellule solaire en Si par le logiciel Tcad-Silvaco " mémoire de master, université Biskra, 2011.
- [17]. Kateb Mohamed Nadjib, Mokrani Zakaria "Conception et simulation électrique d'une cellule solaire en Si par le logiciel Tcad-Silvaco " mémoire de master, université Biskra, 2011.
- [18]. M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.
- [19]. A. Niemegeers, M. Burgelman, Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solarcells, Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, 1996, pp.901 -904.
- [20]. <http://scaps.elis.ugent.be/>

Master: Systèmes de Télécommunication

Auteur: Hima Mohammed Brahim, Saadine Chouaib Et Toumi Fathi

Titer du mémoire: Simulation de cellules solaires MAsECl₃ à l'aide de SCAPS.

Résumé:

MAsECl₃ est un matériau sans plomb prometteur pour l'application de cellules solaires. Dans ce travail, l'étudiant doit simuler une cellule solaire basée sur le matériau mentionné ci-dessus dans le but d'améliorer l'efficacité en utilisant des matériaux ETL et HTL différents et des paramètres d'ingénierie.

Mots clés: Cellule solaire, sans plomb, MAsECl₃, HTL, ETL.

Abstract:

MAsECl₃ is a promising lead free material for solar cell application. In this work, student should simulate a solar cell based on the above mentioned material in the aim to enhance efficiency using deferent ETL and HTL materials and parameters engineering.

Keywords : Solar cell, lead free, MAsECl₃, HTL, ETL.

ملخص:

MAsECl₃ مادة واعدة خالية من الرصاص لتطبيقات الخلايا الشمسية. في هذا العمل، يتعين على الطالب محاكاة خلية شمسية بناءً على المادة المذكورة أعلاه بهدف تحسين الكفاءة باستخدام مواد ETL و HTL المختلفة والمعلمات الهندسية.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية، خالية من الرصاص، MAsECl₃، HTL، ETL