N° d'ordre:
N° de série:

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Superieure et de la Recherche Scientifique

---

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Sciences et de La Technologies Filiére: Genie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En: Télécommunication

Spécialité: Systèmes de télécommunication

Par: Bahi Ouail, Hada Abdelhak

Thème

Simulation de l'effet de la température sur les performances d'une cellule solaire à base de matrèriau pèrovskite $MAPbI_3$

Devant le jury composé de:

Mr.	**….**	**Président**
Mr.	**….**	**Examinateur**
Mr. Hima Abdelkader	**….**	**Encadreur**

2021-2022

بسم الله
الرحمن الرحيم

Dédicace

Au propriétaire d'une biographie parfumée et d'une pensée éclairée ;

Ils ont été les premiers à être crédités de notre obtention de l'enseignement supérieur

(Nos chers parents), que Dieu leur donne longue vie.

A celui qui nous a mis sur le chemin de la vie et nous a apaisés,

Elle a pris soin de nous jusqu'à ce que nous devenions vieux

(Nos chères mamans), que Dieu les bénisse.

A nos frères et sœurs et à tous nos amis

A tous nos honorables professeurs ;

Qui n'a pas hésité à nous tendre la main

je te dédie cette recherche

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Dieu pour la plus grande miséricorde de nous avoir permis de présenter ce projet sous la meilleure forme que nous voulions être, nous tenons à remercier notre superviseur de ce projet, le Dr (Mr. Hima Abdelkader) pour son aide précieuse et conseils pour sortir de ce projet. Nous remercions nos professeurs qui nous ont fourni toutes les connaissances. Surtout, nous sommes tous reconnaissants envers nos familles pour leur amour, leur aide, leur soutien et leurs encouragements sans fin. Et à nos amis pour leur compréhension et leur soutien pour nous permettre de mener à bien ce projet.

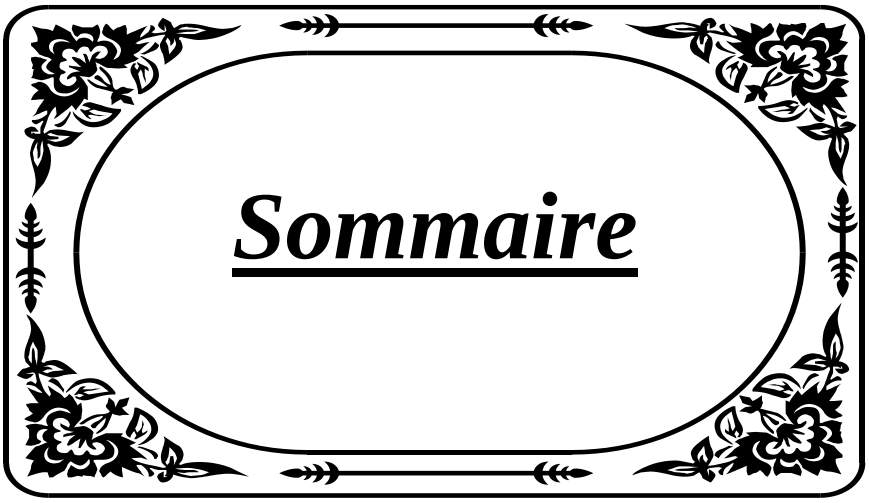

Sommaire

Table de matiére

	page
Dédicace	-
Remerciements	-
Table de matiére	I
Liste de Figure	III
Liste de tableau	IV
Listes des symboles et abréviations	V
Introduction générale	1
Chapitre I: Etude sur Semi-conducteurs	
I.1. Introduction	4
I.2. Les paramètres caractéristiques d'un semi-conducteur	4
I.2.1. Définition	4
I.2.2. Conductivité	5
I.2.3. Photoconduction	5
I.2.4. Redressement	5
I.3. Généralisation sur les matériaux semi-conducteurs	5
I.3.1. Classification des matériaux	5
I.3.2. Les matériaux semi-conducteurs	6
I.3.3. Semi-conducteurs intrinsèques (purs)	7
I.3.4. Semi-conducteurs extrinsèques:	9
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	14
I.4.2 Equations de continuité	15
I.4.3 Equations de transport	15
I.5 Conclusion	17
Chapitre II: Concepts généraux des cellules solaires	
II.1.Introduction:	19
II.2.Energie solaire:	19
II.3.Le rayonnement solaire:	20
II.4.Principe de fonctionnement d'une cellule solaire:	22
II.5.La conversion photovoltaïque:	24
II.5.1. Historique sur le photovoltaïque	24
II.5.2. Définition de cellules photovoltaïque:	25
II.5.3. Les utilisations possibles:	25
II.6.Les principales téchnologies solaires photovoltaïques:	27
II.6.1. Les cellules à base de photovoltaïque organique	27

II.6.2. Les cellules à base de couches minces	**27**
II.6.3. Les cellules au silicium cristallin	**27**
II.7.Paramètres d'une cellule solaire	**28**
II.7.1. Courant de court-circuit, Icc	**28**
II.7.2. Tension de circuit ouvert, Vco	**28**
II.7.3. Facteur de forme, FF	**28**
II.7.4. Rendement de conversion η	**29**
II.7.5. Réponse spectrale (RS) d'une cellule photovoltaïque	**29**
II.8.Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire	**29**
II.9.Schéma électrique équivalent	**31**
II.10. Conclusion	**32**
Chapitre III: Généralités sur les logiciel de simulation	
III. 1. Introduction	**35**
III.2.1 Notion de base	**36**
III.2.2 Définir le problème	**37**
III.2.4 Les courbes (I-V) sous éclairement	**38**
III.3. Définir le point de fonctionnement	**39**
III.3.1. Lancer SCAPS	**41**
III.3.2. Sélection des caractéristiques à simuler:	**41**
III.3.3. Lancer le calcule	**41**
III.3.4. Afficher les courbes simulées	**41**
III.4. Définition d'une cellule solaire	**42**
III.4.1.Définition des couches	**42**
III.4.2. Edition de la structure d'une cellule solaire:	**46**
III.4.3. Contacts:	**47**
Chapitre IV: résultat et discussions	
IV.1.Introduction	**50**
IV.2 Structure et paramètres de la cellule étudiée	**50**
IV.2.1 Présentation de la cellule étudiée	**50**
IV.2.2. Les paramètres du dispositif étudié	**51**
IV.3 Effet de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule:	**52**
IV .4.Effet de l'épaisseur sur la couche CH3NH3SnBr3 les caractéristiques	**53**
IV.5. Effet de Température sur les paramètres PV de la cellule solaire :	**54**
IV.6. Courbe courant-tension	**55**
IV.7. Conclusion	**56**
Conclusion générale	**58**
Références	**61**
Résumé	**64**

Liste de Figure

	Page
Chapitre I: Etude sur Semi-conducteurs	
Figure I.1: Résistivité pour différents types de matériaux	**6**
Figure I.2: Structure cristalline du Silicium pur.	**7**
Figure I.3: Densité des porteurs intrinsèques en fonction de la temperature	**9**
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	**13**
Chapitre II: Concepts généraux des cellules solaires	
Figure II. 1: le rayonnement solaire	**21**
Figure II. 2: Analyse spectrale du rayonnement solaire.	**22**
Figure II. 3: Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque	**23**
Figure II. 4: Schéma de principe de la conversion photovoltaïque	**26**
Figure II. 5 : Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.	**31**
Chapitre III: Généralités sur les logiciel de simulation	
Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal [42].	**36**
Figure III.2 : Définir le problème.	**38**
Figure III.3 : Panneau d'affichage des courbes I-V sous éclairement.	**39**
Figure III. 4: Panneau des bandes d'énergie	**42**
Figure III5 .: Propriétés de la couche ajoutée .	**44**
Figure III 6 .: Propriétés des dopages définis.	**44**
Figure III 7.: Modèle de l'absorption.	**44**
Figure III.8: Définition des types de recombinaison présents.	**45**
Figure III.9: Définition de la structure d'une cellule solaire.	**46**
Figure III.10: Panneau des propriétés des contacts.	**47**
Chapitre IV: résultat et discussions	
Figure IV. 1: schéma simplifié de la cellule solaire utilisée.	**51**
Figure IV.2 : Variation du paramètres photovoltaïques (Voc et η) avec les changements de température	**54**
Figure IV. 3 : Variation du paramètres photovoltaïques (Jsc et FF) avec les changements de temperature	**54**
Figure IV. 4: 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.	**6**
Tableau I.2 : Extrait de la classification périodique des éléments chimiques [2].	**13**
Chapitre IV: résultat et discussions	
Tableau VI .1: Propriétés des différentes couches (ETL / CH3NH3PbI3/ HTL).	**52**
Tableau VI. 2: L'épaisseur de chaque couche de la cellule de base étudiée.	**52**
Tableau VI. 3: Propriété de couche(CH3NH3PbI3).	**53**

Listes des symboles et abréviations

I ph	Le photo-courant
Rs	La résistance série
Rp	La résistance parallèle
I s	Courant de saturation
n	Le facteur d'idéalité
I (V)	La caractéristique courant- tension de la photopile
I	Le courant électrique
V	La tension électrique
h	est la constante de Planck.
U	la fréquence.
C	la vitesse de la lumière.
λ	la longueur d'onde.
T	La température absolue
Icc	Courant de court circuit
Vco	Tension de circuit ouvert
Pm	Puissance maximale
Im	Curant du point du fonctionnement
Vm	Tension du point du fonctionnement
FF	Le facteur de forme
n	Le rendement

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation de cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a révélé la nécessité d'étudier ces systèmes afin de les améliorer et ainsi développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre qui n'émet pas de gaz à effet de serre, pour ces raisons la branche du solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être utilisée.

L'expérience montre que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres; interne (lié à l'appareil lui-même; la technologie utilisée pour produire l'appareil photovoltaïque) et externe (lié à l'environnement de fonctionnement: éclairage, température, etc.). L'effet de ces différents paramètres sur le fonctionnement des cellules solaires peut être étudié en connaissant l'effet de chaque paramètre sur l'I -. caractéristique de la cellule.

La température est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules solaires. Sachant que sur l'énergie totale perdue, une très petite partie est réfléchie à la surface du capteur et une petite partie est extraite sous forme d'énergie électrique, de sorte que la majeure partie de l'énergie perdue est celle qui doit être dissipée sous forme de chaleur.

En particulier, les performances électriques de la cellule solaire en silicium sont très sensibles à la température. Dans les travaux actuels, nous étudions pour les cellules solaires en silicium polycristallin, le comportement en fonction de la température des principaux paramètres; courant de court-circuit., tension de circuit ouvert., facteur de forme. et l'efficacité de conversion pv1 (.). Ce travail est organisé comme suit:

Dans le premier chapitre que nous avons consacré à une étude sur Semi-conducteurs

Le deuxième chapitre nous allons nous intéresser aux phénomènes qui affectent le transport de charge dans différentes parties d'une cellule solaire à hétérojonction.

Le troisième chapitre nous présenterons le logiciel de simulation SCAPS.

Dans le dernier chapitre nous présenterons et discuterons les résultats obtenus.

Au final, une conclusion générale culmine cette thèse pour résumer nos analyses, constats et commentaires.

Chapitre I:

Etude sur Semi-conducteurs

I.1. Introduction:

Le succès industriel des dispositifs semi-conducteurs est largement dû aux technologies de pointe développées pour leur fabrication. Les semi-conducteurs occupent une place très importante dans notre société. Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques utilisés dans les systèmes informatiques, les télécommunications, les téléviseurs, les automobiles et les appareils électroménagers, entre autres.

Dans le domaine des semi-conducteurs, les composés III-V appartiennent à une classe bien définie dont les propriétés sont une source de connaissances fondamentales et d'intérêt appliqué. Par exemple, le gap direct de GaAs est proche de la valeur idéale de 1,5 eV, ce qui permet aux cellules photovoltaïques de fournir une efficacité de conversion photovoltaïque maximale même dans les jonctions simples. Cette cellule spectrale AM1.5 atteint une efficacité de conversion d'environ 25,7%. [1]

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

I.2.1. Définition:

Un semi-conducteur est un matériau dont la conductivité est comprise entre celle d'un métal (conducteur) et celle d'un isolant. La particularité des semi-conducteurs par rapport aux autres matériaux réside dans les propriétés suivantes :

- conductivité
- photoconduction
- redressement

I.2.2. Conductivité:

Pour les métaux, la conductivité diminue quelque peu avec l'augmentation de la température, tout comme les isolants. Pour les semi-conducteurs, en revanche, il augmente rapidement avec l'augmentation de la température. Dans les métaux, la conduction est assurée par un seul type de porteur, généralement des électrons. D'autre part, les électrons et les trous. Le concept de tels porteurs (électrons et trous) sera développé ultérieurement.

I.2.3. Photoconduction:

Un semi-conducteur éclairé voit sa résistivité diminuer. Cette propriété est absente chez les conducteurs et les isolants.

I.2.4. Redressement:

Dans un semi-conducteur, le passage du courant est 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:

Cependant, d'autres matériaux tels que le silicium et l'arséniure de gallium peuvent agir comme isolants ou conducteurs et sont donc considérés comme des semi-conducteurs. La Figure 1 montre les plages de conductivité typiques pour les isolants, les conducteurs et les semi-conducteurs. La capacité d'un matériau à résister ou à conduire l'électricité dépend de nombreux facteurs, de la structure du réseau, des électrons libres, de l'énergie de la bande interdite et de la température. Certains matériaux ont des propriétés électriques très discrètes qui les définissent comme des isolants ou des conducteurs. Selon le niveau de résistivité de l'élément, il peut être classé comme isolant, conducteur ou semi-conducteur. Le silicium et le

germanium sont des exemples de semi-conducteurs élémentaires, qui appartiennent au groupe IV du tableau périodique des éléments. Une méthode courante de classification des matériaux est basée sur leurs propriétés électriques. Les semi-conducteurs peuvent exister sous forme élémentaire ou composée. Le silicium et le germanium sont des exemples de semi-conducteurs élémentaires, qui appartiennent au groupe IV du tableau périodique.

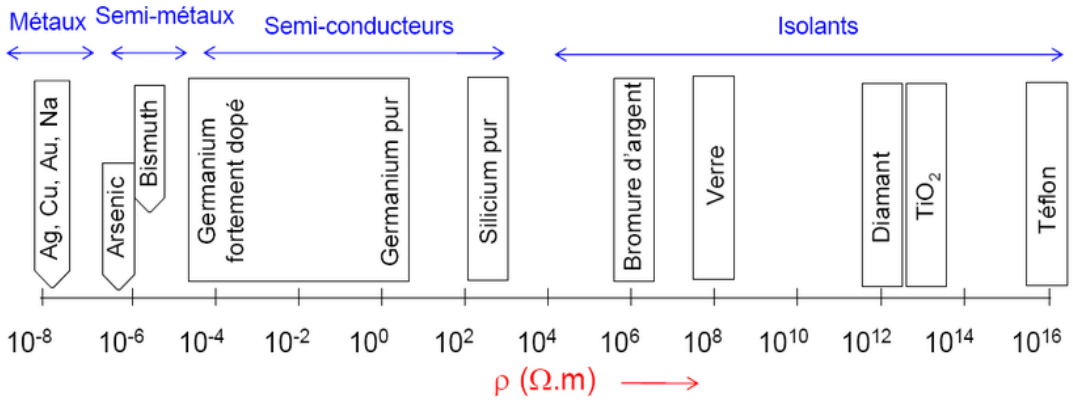


Figure I.1: Résistivité pour différents types de matériaux

I.3.2. Les matériaux semi-conducteurs:

En analysant le tableau de Mendéliev, une partie de ses element (tableau **I.1**) est considérée comme étant formée de semi-conducteurs.

Groupe	**I**	**II**	**III**	**I V**	**V**	**V I**	**V II**	**V II**
			B	C	N	O		
			Al	6Si	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):

Si une liaison semi-conductrice intrinsèque est rompue, un électron libre et un trou sont créés simultanément ; de même, si un électron est excisé de la bande de valence vers la bande de conduction, un trou se crée simultanément dans la bande de valence [3]. Il est difficile de fabriquer des semi-conducteurs intrinsèques complètement purs car les impuretés contaminent le matériau à un moment donné du processus de croissance. Il est possible que le trou soit déplacé par des combinaisons d'électrons [4]. La structure cristalline du silicium pur est représentée sur le diagramme :

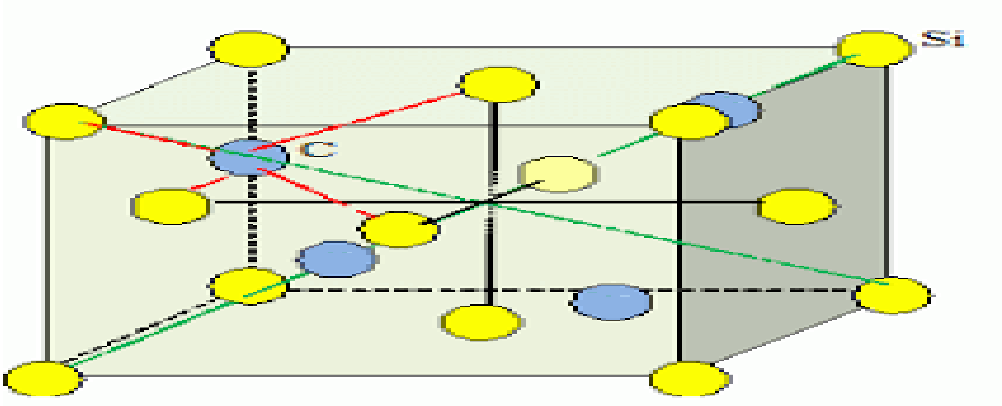


Figure I.2: Structure cristalline du Silicium pur.**[5]**

- ✓ Les semi-conducteurs se trouvent dans la quatrième colonne de la classification périodique des éléments. Par exemple, des atomes de silicium à 4 électrons sur leur dernière couche peuvent être regroupés en échangeant leurs électrons de valence (liaison de covalence). Chaque électron est partagé par deux atomes adjacents, ce qui donne une structure très stable. À 0k Celsius, tous les électrons de valence sont utilisés dans des liaisons covalentes.
- ✓ Pas d'électrons libres aucune possibilité de conduction
- ✓ Le cristal est un isolant.

Lorsque la température augmente, l'agitation thermique fournit une quantité d'énergie suffisante aux électrons notamment pour rompre la liaison covalente.

Ces électrons libres peuvent alors se déplacer sous l'influence d'un champ électrique extérieur.

Le cristal s'est transformé en conducteur. Les cristaux intrinsèques sont des cristaux semi-conducteurs purs ne contenant aucun atome étranger. Il n'y a pas d'EHP dans un semi-conducteur intrinsèque à 0 K° ; néanmoins, lorsque la température augmente, la chaleur absorbée par le matériau crée un certain nombre d'EHP et la conductivité du matériau augmente.

Les EHP sont appelés porteurs intrinsèques car ils sont responsables de la conductivité. Leur nombre croît de manière logarithmique. Ceci est illustré à la Figure I-3 pour Si, Ge et GaAs.

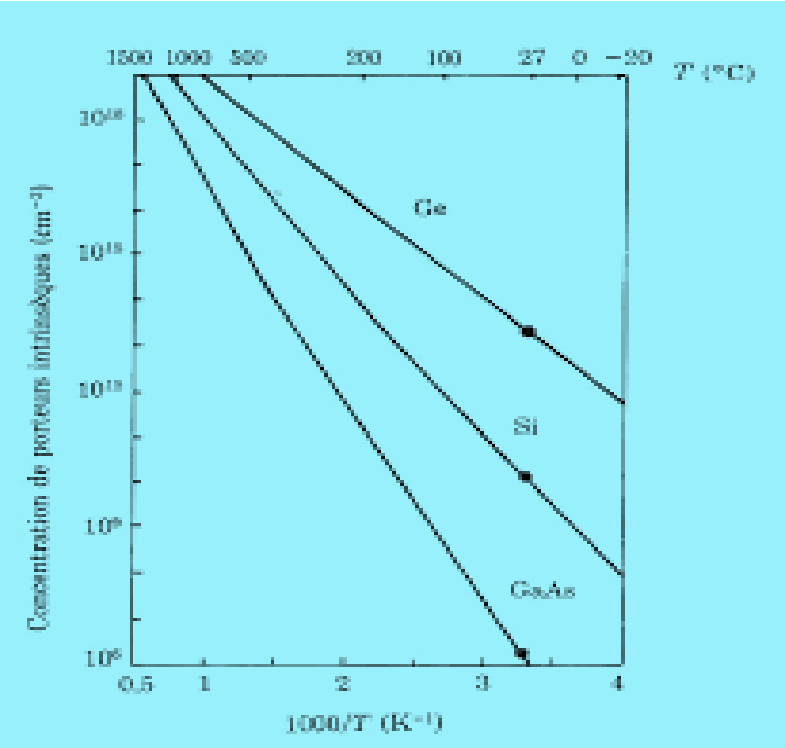


Figure I.3: Densité des porteurs intrinsèques en fonction de la temperature [3]

I.3.4. Semi-conducteurs extrinsèques:

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 de propriétés électriques. -n en fonction du nombre d'électrons libres ou de trous Le dopage d'un cristal intrinsèque consiste à remplacer les atomes semi-conducteurs du réseau par des atomes étrangers. Le dopage est une méthode de contrôle du nombre d'électrons ou de trous dans un matériau en ajoutant une certaine quantité d'impuretés, les résultats étant des matériaux de type. Les semi-conducteurs extrinsèques sont fabriqués en mélangeant des impuretés avec des matériaux intrinsèques. Cependant, l'ajout d'impuretés à un matériau peut être bénéfique pour les performances du semi-conducteur. -p (ou -d) ou -d (ou -d) Deux scénarios sont possibles.:

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

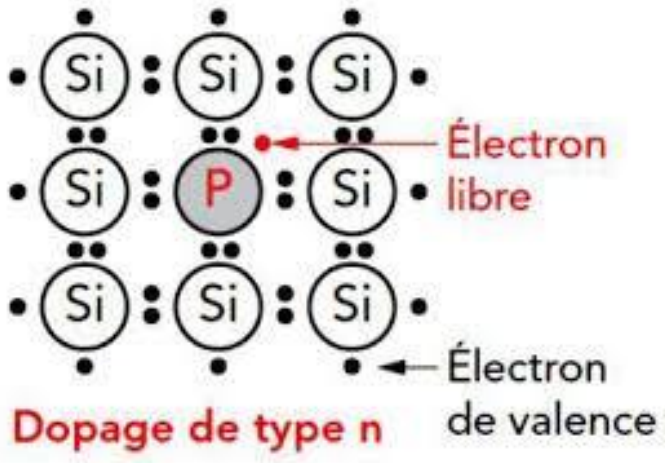


Figure I.4: Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de phosphore, dopage donneur de type-n [4]

Les électrons sont des porteurs majoritaires dans la matière de type n, tandis que les trous sont des porteurs minoritaires [3]. Considérons le cas d'un atome de la colonne V, tel que le phosphore. La couche externe de cet atome contient, par définition, 5 électrons, comme le montre la Figure I.4. Cet atome se retrouvera avec 9 électrons sur sa couche externe, qui est incluse dans le réseau cristallin. Cet atome sortira de son orbite pour circuler dans le cristal une fois que l'énergie thermique sera suffisante.

Dans ce cas, il rejoint la bande de conductivité du cristal. Cet atome va s'ioniser positivement car le noyau de l'atome de phosphore a une charge (due à ses protons) qui n'est pas compensée. Cet atome a un comportement dopant, et on parle de donneur d'atome car il a fourni un électron au cristal (via sa bande de conduction). Nous supposons que la charge globale sur le cristal est nulle et que le

cristal est par ailleurs neutre. Les dopants de type p, également appelés accepteurs, sont des éléments ou des composés avec trois électrons de valence ou moins qui reçoivent des électrons et établissent des liaisons covalentes avec quatre ou plus de leurs cinq trous. Les principaux porteurs dans les matériaux de type p sont des trous, tandis que les porteurs mineurs sont des électrons.

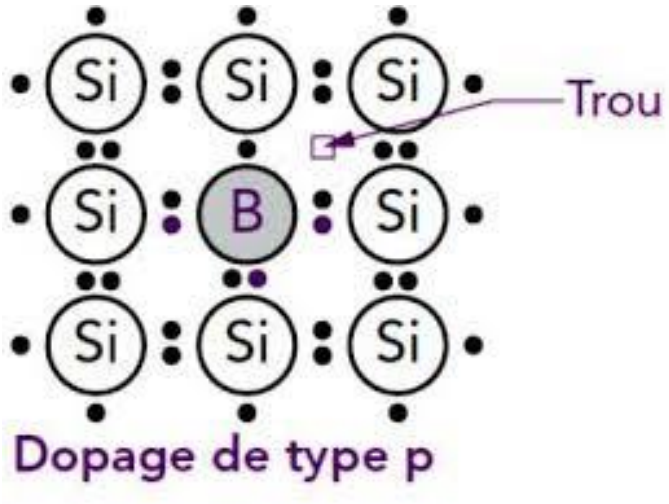


Figure I.5: Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore, dopage accepteur de type-P [4]

Considérons le cas d'un atome de la colonne III, tel que l'alésage. La couche externe de cet atome contient, par définition, trois électrons, comme le montre la Figure I.5. Cet atome se retrouvera avec 7 électrons sur sa couche externe, qui est incluse dans le réseau cristallin. Lorsque l'énergie thermique est suffisante, un électron de valence voisin quittera son orbite et formera un octet autour de l'atome d'alésage. Cela crée un espace dans la bande de valence du cristal, ou un trou. Cet atome va s'ioniser négativement car le noyau de l'atome de bore a une charge insuffisante due à ses protons. Cet atome a un comportement dopant, et parce qu'il a fourni un trou dans le cristal (dans sa bande de valence), il est appelé atome accepteur, car il accepte un électron. Rappelez-vous que la charge globale sur le cristal est toujours nulle, car le cristal est complètement neutre. Le nombre de

grands porteurs est analogue à la dopage dans un matériau, tandis que le nombre de petits porteurs est analogue à la température. Rappelez-vous que les deux types de matériau - p et n sont tous deux neutres. Cependant, même à de très faibles concentrations, l'effet de dopage est excellent pour les propriétés électriques du matériau.

I.3.5. Bandes d'énergie:

Cependant, lorsque les atomes sont plus proches les uns des autres, les atomes de chaque atome se recombinent et les niveaux d'énergie discrets divergent dans une bande d'énergie admissible, indiquée par la partie grise du graphique sur la Figure.

La distance interatomique est représentée graphiquement à l'intersection de l'énergie des électrons dans le diagramme de bande de la Figure I.6. Les états électroniques d'énergie sont distribués selon une loi de dispersion appelée structure de bandes, qui est représentée par une suite de bandes admissibles pouvant être séparées par des bandes interdites. Le diagramme de bande montre que lorsque les atomes d'un même élément sont infiniment séparés les uns des autres, ils ont les mêmes niveaux d'énergie. Les semi-conducteurs et les métaux ont une structure particulière cristalline, ce qui signifie que les atomes sont disposés en réseaux répartis aléatoirement dans l'espace. Pour déterminer l'existence d'une bande interdite, il faut examiner toutes les directions de propagation des électrons, c'est-à-dire tous les points du réseau réciproque (le terme anglais "gap"). Parce que la distance entre les atomes dans ces réseaux est faible, de l'ordre de quelques-uns, les atomes ne peuvent plus être considérés comme isolés. Elle est le résultat d'interactions électrostatiques entre plusieurs atomes.

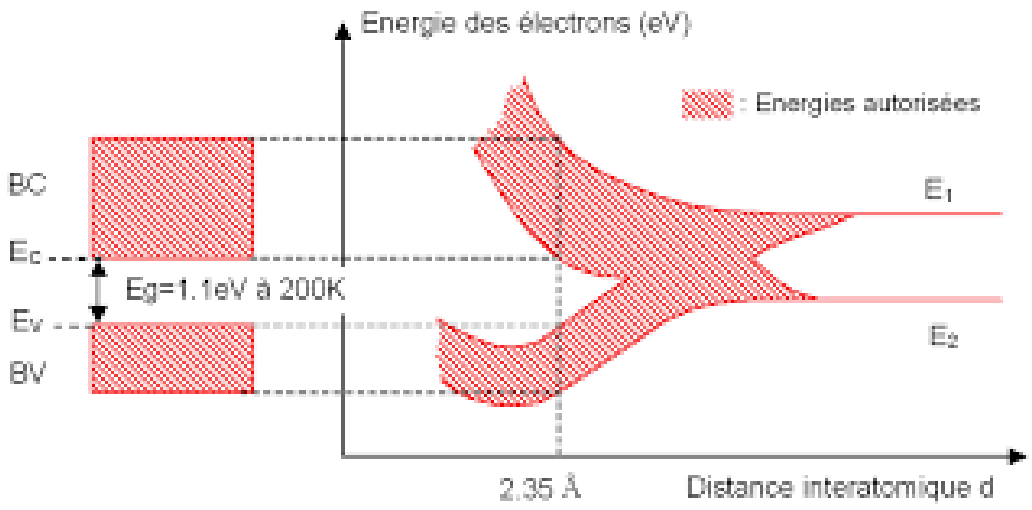


Figure I.6: *Distance inter atomique représentée graphiquement contre l'énergie, pour montrer la formation des bandes d'énergie dans un matériau* [2]

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

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont constitués d'éléments des troisième (III) et cinquième (V) colonnes du système de catégorisation périodique de Mendeleïev. Le tableau (I.2) montre un extrait de cette catégorisation (les nombres en haut et en bas représentent respectivement le numéro atomique et la masse). [2].

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

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

I.4 Equations fondamentales dans les semi-conducteurs :

Des années de recherche sur les propriétés physiques des dispositifs à base de semi-conducteurs ont abouti au développement d'un modèle mathématique [6]. Ce modèle est capable de fonctionner dans presque tous les dispositifs à base de semi-conducteurs. Il est constitué d'un ensemble d'équations fondamentales qui associent le potentiel électrostatique et les densités de porteurs de charge dans un domaine de simulation précisCes équations, qui sont résolues à l'aide de logiciels spécialisés pour la modélisation de dispositifs semi-conducteurs, sont dérivées des équations de Maxwell. L'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport sont les plus courantes. Équation de Poisson La manière dont les densités d'électrons et les trous se comportent par rapport aux processus de transport, de génération et de recombinaison est décrite par des équations de continuité ou de transport. Les variations de potentiel électrostatique sont liées aux densités de charge locales.

Pour résoudre les équations présentées dans le chapitre suivant, une discrétisation a été nécessaire avant de les appliquer à une grille d'éléments finis utilisée pour représenter le domaine de simulation. [7].

I.4.1 Equation de Poisson :

$$Div\ \varepsilon \nabla\psi = -\rho \quad (I.\ 1)$$

- ✓ L'équation de Poisson s'exprime par :
- ✓ Où ψ représente le potentiel électrostatique.
- ✓ ε la permittivité électrique ($\varepsilon=\varepsilon 0\varepsilon r.$, $\varepsilon 0$ est la permittivité du vide et εr est la permittivité relative du matériau)
- ✓ **ρ** est la densité volumique nette de charges libres.

Le champ électrique est donné par la relation:

$$\boldsymbol{E = -\, grad\, \psi \quad (I.\ 2)}$$

I.4.2 Equations de continuité :

Les causes de la variation des concentrations des trous ou des électrons sont :

Génération causée par un agent externe (qui aboutit fréquemment à la formation de paires d'électrons) ; Les équations de continuité décrivent le taux de variation des concentrations des porteurs en fonction du temps.

Les phénomènes de transport (par la présence des courants de conduction ou diffusion). les générations

L'équation de continuité s'exprime par :

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

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

I.4.3 Equations de transport :

Le champ électrique et le gradient de concentration des porteurs de charge sont à l'origine de l'apparition de courants dans des hypothèses basées sur des équations physiques du semi-conducteur (le champ magnétique externe est nul, et la température est constante dans toute la structure).

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).

En l'absence d'équilibre thermodynamique, nous définissons deux quasi-niveaux de Fermi, un pour les électrons et un pour les trous, qui expriment l'évolution de la probabilité d'occupation des états. Les courants déterminés par le champ électrique sont appelés courant du champ ou courant de dérive. Dans ce modèle, les densités de courants sont exprimées en fonction des quasi-niveaux de Fermi par les expressions :

$$\overrightarrow{J_n} = -q\mu_n n \nabla \varphi_n \quad \textbf{(I. 5)}$$

$$\overrightarrow{J_p} = -q\mu_p p \nabla \varphi_p \quad \textbf{(I. 6)}$$

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 :

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

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

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

$$\overrightarrow{J_n} = qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla \psi - \mu_n n\left(kT_L \nabla (ln n_{ie})\right) \textbf{(I. 9)}$$

$$\overrightarrow{J_p} = -qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla \psi - \mu_p p\left(kT_L \nabla (ln n_{ie})\right) \textbf{(I. 10)}$$

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

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

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

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue un concept général de semi-conducteurs (semi-conducteur).

Chapitre II:

Concepts généraux des cellules solaires

II.1.Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux phénomènes qui affectent le transport de charge dans différentes parties d'une cellule solaire à hétérojonction. Nous allons d'abord revenir sur la définition du rayonnement solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule solaire et ses caractéristiques électriques.

La cellule solaire est l'un des composants de base d'un semi-conducteur qui convertit l'énergie lumineuse en électricité. La quantité d'énergie électrique qu'il produit est déterminée par le flux et la distribution spectrale du rayonnement solaire. La lumière incidente générée par les courants dans la cellule solaire. Ainsi, contrairement aux capteurs thermiques qui produisent de la chaleur (chauffage, capteur planaire, capteur tubulaire, etc.), les panneaux solaires photovoltaïques produisent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière par conversion photovoltaïque.

La lumière est composée de photons, porteurs d'énergie, pouvant extraire des charges électriques des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium.

II.2.Energie solaire:

La quantité de rayonnement solaire qui frappe la Terre est appelée rayonnement solaire. Une zone spécifique capable de générer de l'énergie électrique. La Terre n'est affectée que par une fraction de 2 milliards de copies de la lumière solaire, estimée à 130 mégawatts par mètre carré de surface solaire, et on estime que c'est le cas. Toute l'énergie thermique à la surface et dans l'atmosphère est due à une petite quantité de matière. La Terre capte une partie de l'énergie solaire émise dans l'espace. Avec une moyenne de 1367 watts par mètre carré, la frontière extérieure est atteinte. La distance moyenne entre la Terre et le Soleil est de 150 millions de kilomètres, connue sous le nom de constante solaire, qui est

égale à 1367 Watts par mètre carré. La proportion d'énergie reçue par la surface de la Terre est déterminée par l'épaisseur de la surface de la Terre. L'atmosphère de déplacement est définie par le nombre de masses d'air (AM)

Dans un ciel clair, la quantité de rayonnement nécessaire pour atteindre le niveau moyen de la mer est de 1000 W/m2, ce qui est classé comme rayonnement "massique de l'air" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace dans le ciel, la lumière le traverse. L'air est plus épais et perd plus d'énergie. quand le soleil ne brille pas Parce que le zénith n'est là que pour une courte durée, la qualité de l'air est meilleure. En raison de l'efficacité constante, l'énergie disponible est inférieure à 1000 W/m2.

II.3.Le rayonnement solaire:

La distance entre la terre et le soleil est estimée à plus de 150 millions de kilomètres. Malgré cette grande distance, le soleil fournit une quantité importante d'énergie aux confins de l'atmosphère sous la forme d'un rayonnement dont le spectre est majoritairement partagé entre les longueurs d'onde de 0,3 et 4 mètres.

This intermittent nature of solar energy is a disadvantage that may be overcome by storing the energy obtained in a usable form, mostly electrical.

L'atmosphère terrestre déforme cette distribution spectrale, modifiant l'intensité du rayonnement solaire réfléchi et absorbé par l'atmosphère, l'espace et les nuages. Sur Terre, la durée d'ensoleillement varie d'une région à l'autre, ainsi qu'en fonction des saisons et des caractéristiques climatiques du lieu [9].

En raison de l'absorption principalement par l'ozone, l'eau et le dioxyde de carbone, la densité de puissance à la surface de la terre n'est pas supérieure à 0,9 kW/m2. L'intensité du rayonnement au-dessus de l'atmosphère est de 1,35 kW/m2, avec un spectre centré autour de 0,48 m.

Les rayons du soleil se rapprochent de la température d'un corps noir à 6000 degrés Celsius. De plus, le spectre n'est plus continu mais contient des bandes d'absorption [10].

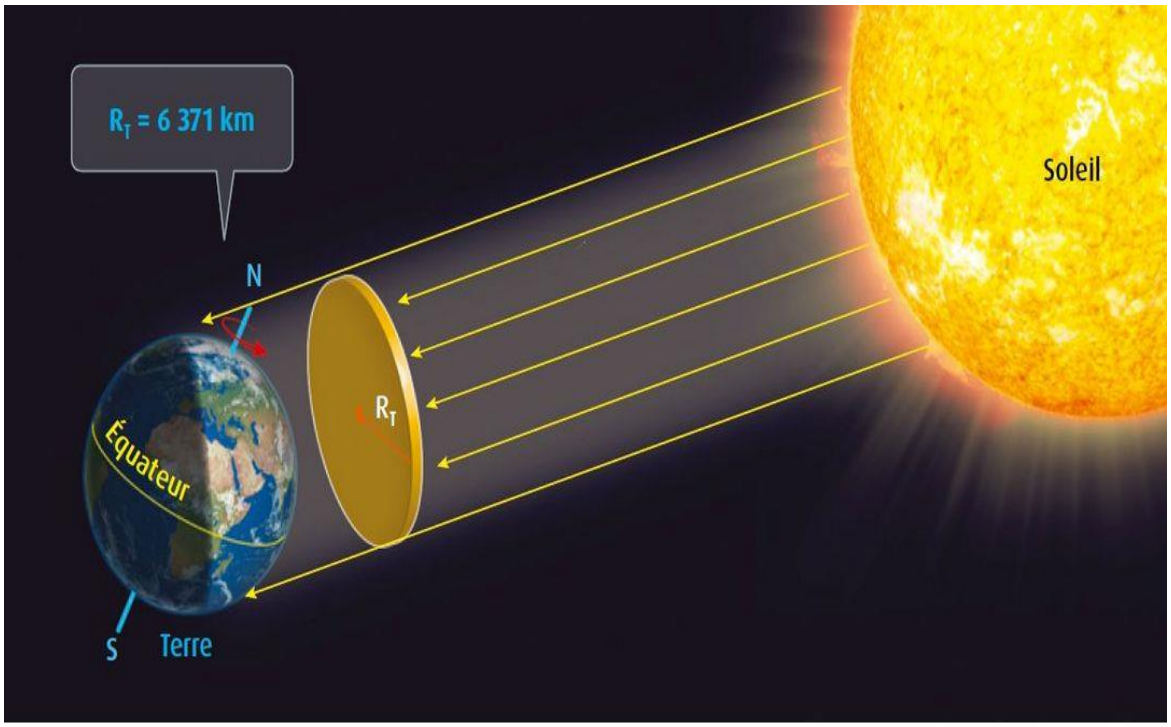


Figure II. 1: le rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 µm à 10 µm, 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 µm).
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 µm).
- 44% dans la bande des infrar ouges (>0,8 µm).

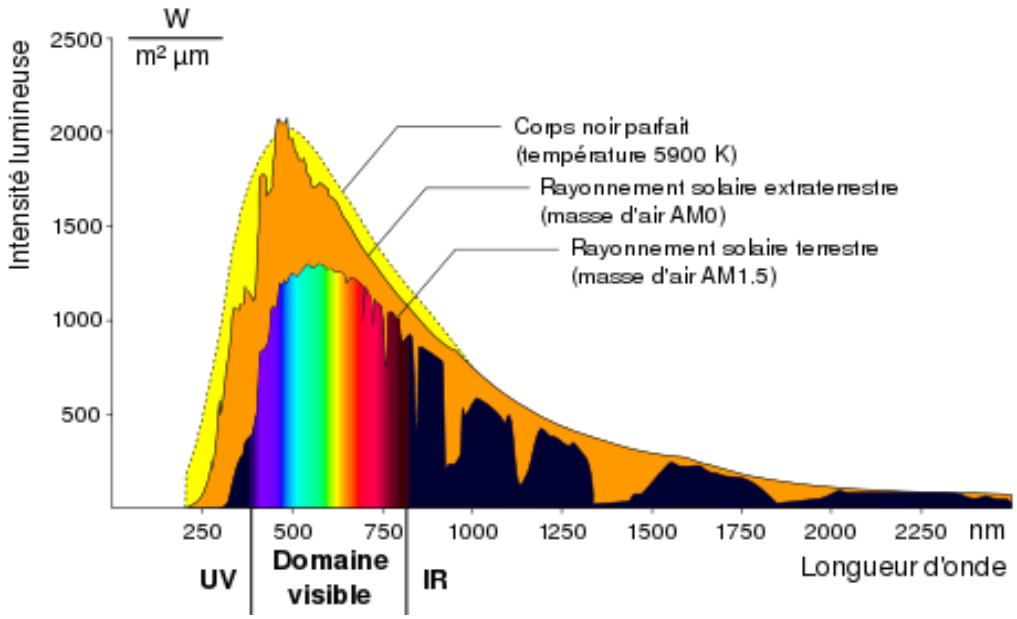


Figure II. 2: Analyse spectrale du rayonnement solaire.

II.4.Principe de fonctionnement d'une cellule solaire:

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'un avec un excès d'électrons et l'autre avec un déficit d'électrons. Cet effet permet aux cellules de transformer directement l'énergie lumineuse des photons en électricité grâce à l'utilisation d'un matériau semi-conducteur qui transporte les charges électriques. Le dopage de silice cristaux implique l'ajout d'atomes supplémentaires pour améliorer la conductivité du matériau. Les cellules photovoltaïques utilisent l'effet photoélectrique pour générer un courant continu par l'absorption du rayonnement solaire. Ces deux parties sont appelées "duplicates" de type n et de type -p, respectivement.

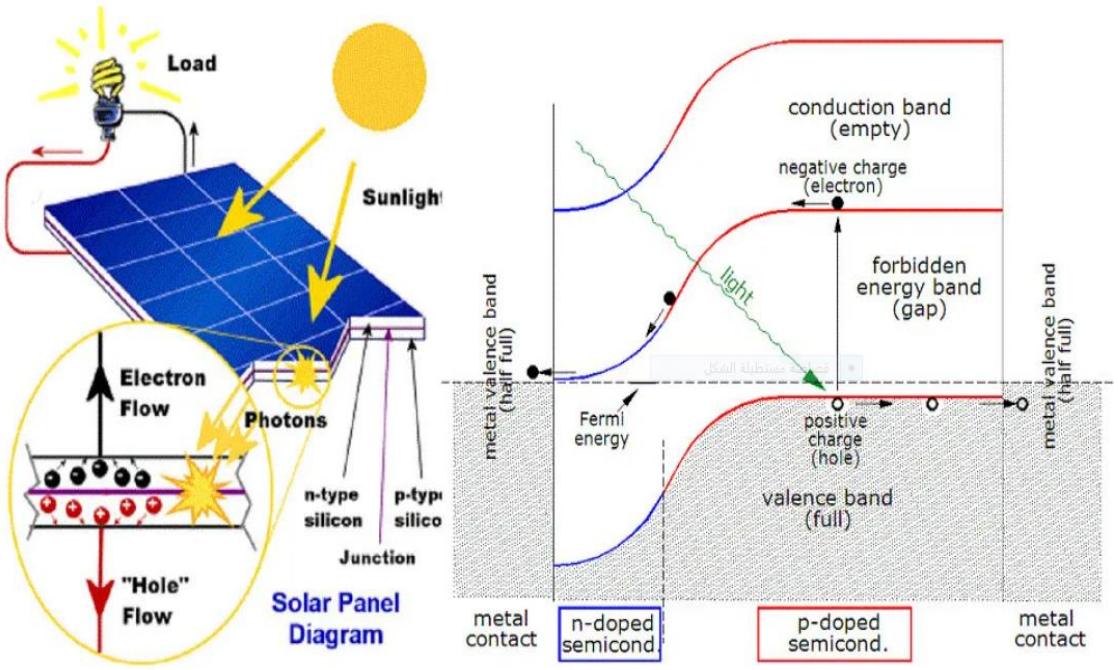


Figure II. 3: Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque

Les paires d'électrons créées par photons sont dissociées par le champ électrique dans la zone de charge-décharge, l'électron étant propulsé dans la région de type N et la truite dans la région de type P. Ceux qui ciblent la zone de charge spatiale sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent dominants. Dans les régions N, P et la zone de charge d'espace, les photons entrants créent des porteurs. En conséquence, ces photoporteurs contribuent ou créent un courant photo de dispersion par leur distribution. Ces deux contributions se combinent pour former Iph, un photo-courant qui contribue à l'inverse actuel de la diode.

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est vu dans la Figure II.4. Le comportement de ces porteurs libres varie selon l'endroit où ils ont été créés. Les photoporteurs minoritaires diffusent dans les zones électriquement neutres P et N [10].

II.5.La conversion photovoltaïque:

Le terme "photovoltaïque" peut désigner soit le phénomène physique, soit la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite en convertissant une partie du rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque. Un photon de lumière entrante peut mettre un électron en mouvement dans certaines circonstances, entraînant un courant électrique.

II.5.1. Historique sur le photovoltaïque:

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

♣ 1838: EDMOND BEQUEREL, physicien français, découvre la méthode d'utilisation de l'ensoleillement pour générer du courant électrique dans un matériau solide : c'est l'effet 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.

♣ 1954: À l'heure où l'industrie spatiale cherche des moyens d'alimenter ses satellites, trois chercheurs américains ont mis au point une cellule photovoltaïque à haut rendement.

♣ 1958: Le premier engin spatial propulsé par des cellules solaires est mis en orbite, avec un retour sur investissement de 9%.

♣ 1985: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque en Australie.

♣ 1995: Des programmes de toits photovoltaïques en réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne et sont largement utilisés depuis 2001.

♣ 1973: la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.

♣ L'effet photovoltaïque, qui consiste directement à convertir la lumière en électricité, a été découvert en 1838.

♣ 1875: WERNER VON SIEMENS présente un essai sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs à l'Académie des sciences de Berlin.

♣ La conversion photovoltaïque est la conversion directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en une énergie électrique continue, directement utilisable.

♣ L'abréviation commune pour le photovoltaïque est: « PV » [12].

- 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.5.2. 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 des matériaux semi-conducteurs spécifiques.
Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés du rayonnement solaire ainsi que celles des semi-conducteurs[13].

II.5.3. Les utilisations possibles:

La cellule photovoltaïque a un large éventail d'applications potentielles. Lorsqu'il est utilisé seul, il est utilisé pour alimenter une source de lumière (par exemple, une lumière extérieure) ou pour alimenter un dispositif électrique de faible puissance (comme une calculatrice ou une horloge).

Dans ce cas, elle remplace une batterie dont les composants sont toxiques.

Les cellules photovoltaïques assemblées créent un module solaire qui, lorsqu'il est combiné, produit de l'électricité. Cela vous permet de générer de l'électricité et d'alimenter une variété d'appareils ou d'installations électriques. La cellule solaire a un large éventail d'applications. En fait, la cellule photovoltaïque

peut fournir de l'électricité, par exemple :

- ❖ Un logement s'il s'agit d'une copropriété.
- ❖ Le réseau public d'électricité, dans le cas de systèmes solaires thermiques.
- ❖ Satellites envoyés dans l'espace
- ❖ Les bateaux solaires, avions solaires et autres véhicules alimentés grâce à des cellules photovoltaïques

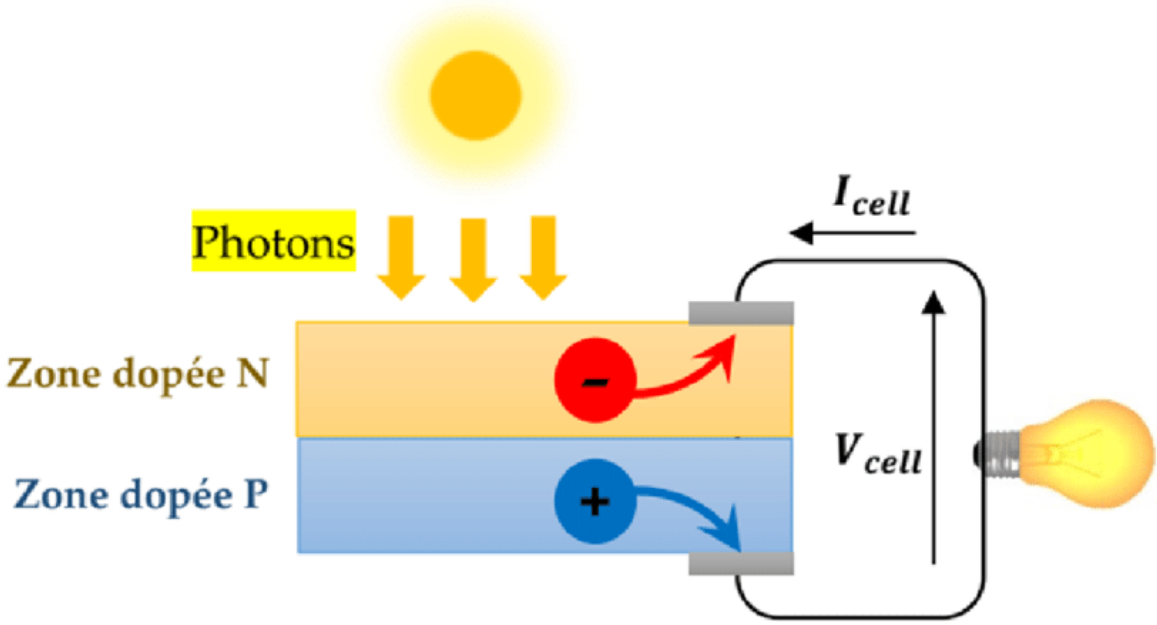


Figure II. 4: Schéma de principe de la conversion photovoltaïque

II.6.Les principales téchnologies solaires photovoltaïques:

On peut distinguer trois grandes familles de cellules solaires:

II.6.1. Les cellules à base de photovoltaïque organique

La recherche dans ce domaine s'intensifie afin de produire des batteries pour de nouvelles utilisations à des coûts extrêmement bas. leurs principes directeurs L'opération est basée sur les unités de couleur de Michal Grätzel, et le type de matériel utilisé varie. Avec des rendements de l'ordre de 3 % à 5 %, leur viabilité à long terme est limitée.

Enfin, la famille hybride vue dans la Figure ci-dessous se compose de cellules qui combinent de nombreuses technologies naturelles pour une performance maximale.

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

Leur point commun est l'utilisation de matériaux semi-conducteurs minces pour assurer une apparence uniforme sur une variété de substrats, ce qui donne des modules à rendement légèrement inférieur (allant de 7 % à 13 %). Toutes ces technologies ont une part de marché d'environ 10 % et sont encore relativement écurie:

Ces secteurs ont perdu l'avantage d'une baisse des coûts de production à la suite de lourds investissements dans le silicium au début des années 2000.

II.6.3. Les cellules au silicium cristallin:

L'ingrédient actif est le silicium, qui est présent dans la masse. Malgré son âge, en raison de sa durabilité et de ses performances (les sorties des modules varient de 12 à 20% pour une durée de vie d'environ 30 ans), un investissement important a été fait dans ce domaine, que ce soit pour la modernisation de silicium, la fabrication de cellules ou l'assemblage de modules.

II.7.Paramètres d'une cellule solaire:

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque est le résultat de la tension créée par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, sont déterminées par les propriétés électriques de la cellule ainsi que la charge électrique appliquée à ses membres.

Donc les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont [14]:

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

II.7.1. Courant de court-circuit, Icc:

Ce courant est créé en court-circuitant les connexions de la cellule ; il croît linéairement avec la clarté de la cellule et dépend de la zone illuminée, de la longueur d'onde de rayonnement, et de la température.

II.7.2. Tension de circuit ouvert, Vco:

Lorsqu'aucun courant ne traverse la cellule, la tension dans le circuit ouvert est mesurée en millivolts. Ceci est déterminé par la différence dans le travail d'électrode de sortie et la résistance de shunt. Elle diminue avec la température et varie avec l'intensité lumineuse.

II.7.3. Facteur de forme, FF:

La puissance fournie par une cellule photovoltaïque à un circuit externe est clairement influencée par la résistance de charge. Pour un point de fonctionnement P m (I m, V m) de la courbe courant-tension, cette puissance est maximale (noté P m).

II.7.4. Rendement de conversion η:

L'efficacité de conversion (efficacité) est définie comme la relation entre la puissance maximale fournie par une cellule et l'énergie lumineuse incidente. Pinc, exprimé en pourcentage, indique le taux de conversion énergétique.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF.I_{cc}V_{oc}}{P_{inc}} \qquad \textbf{(II.1)}$$

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

II.7.5. Réponse spectrale (RS) d'une cellule photovoltaïque:

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

La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante [14]:

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)}(A|W) \qquad \textbf{(II.2)}$$

Le rendement de l'EQE externe de la cellule est le rapport entre le nombre de porteurs générés et le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde; il est lié à la réponse spectrale par:

$$EQE(\lambda) = SR(\lambda)\frac{hc}{\lambda q} \qquad \textbf{(II.3)}$$

Le rapport entre le nombre de porteurs générés et le nombre de photons pénétrants dans le matériau est le rendement interne en IQE de la cellule., il est I

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \qquad \textbf{(II.4)}$$

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

II.8.Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire:

Une cellule solaire connectée à une résistance électrique et exposée à la lumière du soleil génère un courant qui est divisé entre la résistance et sa structure interne de diodes.

Sa caractéristique *I(V)* correspond à la soustraction du photocourant et du courant de la diode à l'obscurité par [10 ,15]:

$$I(v) = I_{obs}(V) - I_{ph} = I_s\, exp(qV|KT - 1) - I_{ph} \qquad \textbf{(II.5)}$$

Avec:

$\boldsymbol{I_{ph}}$**:** la densité de courant photogénèré.

$\boldsymbol{I_{obs}}$**:** la densité de courant d'obscurité.

$\boldsymbol{I_s}$**:** le courant de saturation de la diode.

q: la charge élémentaire.

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

Notez que la courbe d'éclairage est simplement décalée de la première par la valeur de Icc, qui reflète la génération continue de courant par la lumière. Sur la Figure II.5, nous avons montré deux caractéristiques de la tension d'une cellule solaire dans l'obscurité (pointillées) et dans la lumière (lignes pleines).

L'obscurité caractéristique de la cellule est la même que celle de la diode. Cette valeur est connue comme le courant d'un circuit fermé puisque c'est le courant qui génère la cellule sans contrainte. Il représente l'égalisation du courant généré par la lumière et du courant généré par l'obscurité [16].

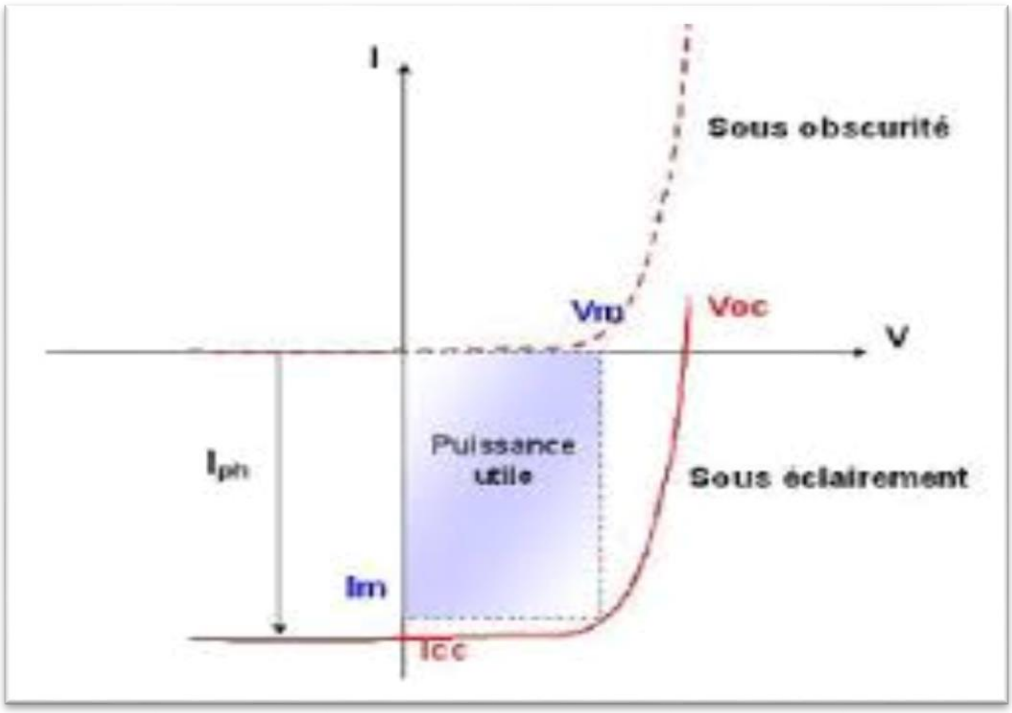


Figure II. 5 : *Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.*

II.9.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}).

$$I = I_E - (I_{obs1} + I_{obs2}) - I_P \qquad \textbf{(II.6)}$$

Soit**:**

$$I = I_E - I_{S1}\left[\left(\frac{V_j}{U_T}\right) - 1\right] - I_{S2}\left[exp\left(\frac{V_j}{2U_T}\right) - 1\right] - \frac{V_j}{R_p} \qquad \textbf{(II.7)}$$

$$V_J = V + I.R_S \qquad \textbf{(II.8)}$$

Avec:

I: courant dans la charge

$\boldsymbol{I_E}$**:** courant d'éclairement

$\mathbf{I_{obs1}}$ **et** $\boldsymbol{I_{obs2}}$**:** courant de diode

$\boldsymbol{I_P}$**:** courant dans la résistance parallèle.

II.10. Conclusion:

Depuis quelques années, le monde de la conversion photovoltaïque a connu une profonde transformation liée à l'intérêt croissant pour l'énergie solaire, tant au niveau de la recherche qu'au niveau industriel.

Ce chapitre servira de base théorique pour le reste de notre travail. Nous avons commencé par une explication de base des cellules photovoltaïques et de leur histoire. Après cela, l'énergie et le rayonnement solaire sont définis. Après cela, nous sommes passés par le fonctionnement de base 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 est un logiciel de simulation de cellules solaires unidimensionnelles développé par le Département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS) de l'Université de Gent en Belgique. Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemegeers et Stefaan Degrave 20-25 étaient parmi les chercheurs qui ont contribué à son développement. Une description du logiciel, ainsi que les algorithmes qu'il emploie, peut être trouvée dans la littérature. Le logiciel est disponible gratuitement à la communauté de recherche photovoltaïque (universités et instituts de recherche). Il fonctionne sous Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista et Windows 7, et occupe environ 50 mégaoctets d'espace disque. Le logiciel est disponible en téléchargement gratuit. Il est nécessaire d'informer Marc Burgelman du téléchargement d'une version de SCAPS (le nom et l'adresse de l'établissement, ainsi que le nom du promoteur pour les doctorants). SCAPS a été conçu à l'origine pour les architectures de cellules CuInSe2 et CdTe. Cependant, plusieurs versions ont amélioré ses capacités, lui permettant d'être utilisé à la fois dans les cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et amorphes (a-Si et Si micro-morphe).

Un aperçu de ses caractéristiques principales est donnée ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conducteurs .
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule) Par exemple: χ , ε , NC ,NV , Vthn , Vthp , μn , μp NA, ND tous les pièges (défauts) Nt.
- Les mécanismes de recombinaison comprennent la bande à bande (directe) et la tarière SRH.

- Niveaux de défaillance : en volume ou à l'interface, en tenant compte de leurs états de charge et de recombinaison à leurs niveaux.
- Niveaux d'échec, type de charge : pas de charge (nul), monovalent (donneur unique, accepteur), divalent (donneur double, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Niveaux de défaut, distribution d'énergie : discret, uniforme, gaussien, file d'attente, ou une combinaison de ceux-ci.
- Niveaux de carence, propriétés optiques : L'excitation directe de la lumière est possible (connue sous le nom d'effet d'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux de carence, ainsi que les transitions métal-stables entre eux.
- Coordonnées : Travail d'extraction de métal ou régime à bande Propriété optique du filtre (réflection ou transmission).
- Tunnel, inter-bandes (dans la bande de conduction ou la bande de valence), tunnel en fonction des états d'interface.
- Génération : basée sur un calcul interne ou un fichier g(x) fourni par l'utilisateur. Illumination: du côté p ou n.
- points pour les calculs de travail : la tension , la fréquence , la température.
- Le logiciel calcule les bandes d'énergie, les concentrations et les courants à un point de fonctionnement donné en fonction des caractéristiques (JV), des caractéristiques du courant alternatif (C et G en fonction de V et/ou f), et de la réponse spectrale (également avec la lumière de polarisation ou de tension).
- Il est possible de calculer de nombreux lots; les résultats et les paramètres sont présentés sous forme graphique.
- Tous les paramètres sont chargés et enregistrés ; SCAPS est démarré dans une configuration personnalisée ; et il y a un langage de script avec une fonction définie par l'utilisateur.
- interface utilisateur très intuitive

- Toutes les variables internes peuvent être consultées et suivies par le script lors de l'utilisation d'un langage de script pour exécuter SCAPS à partir d'un "fichier script."
- un établissement ajustement de courbe intégré
- un panneau pour faciliter l'interprétation des critères d'admission

III.2.1 Notion de base:

SCAPS est un logiciel Windows développé par la division LabWindows/CVI de National Instruments. SCAPS commence par l'icône 'Action Panel.' La fenêtre ouverte est visible dans la Figure III.1.

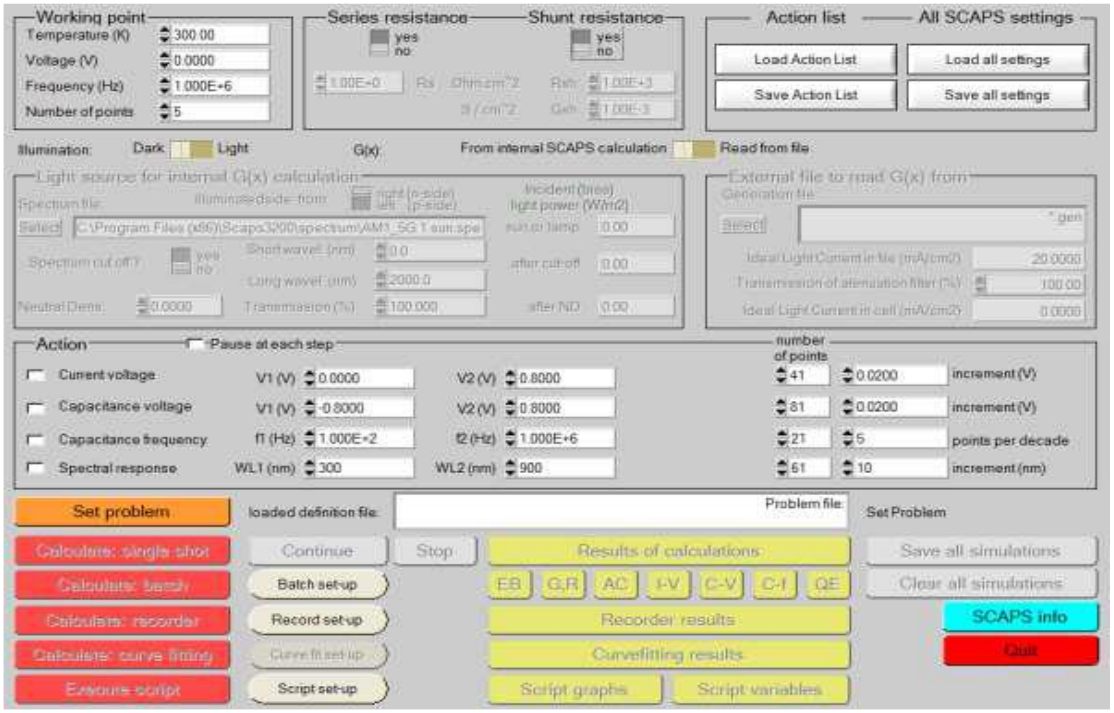


Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal .

- Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base :

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

III.2.2 Définir le problème :

Dans le panneau d'action, cliquez sur le bouton SET PROBLEM, puis sélectionnez LOAD dans le coin inférieur droit du panneau, qui s'ouvre automatiquement. Sélectionner et ouvrir (par exemple, NUMOS CIGS Baseline.def.) Voici un exemple de cellule solaire basée sur la technologie CIGS. Ensuite, vous pouvez modifier toutes les propriétés de la cellule en sélectionnant 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action [ ].

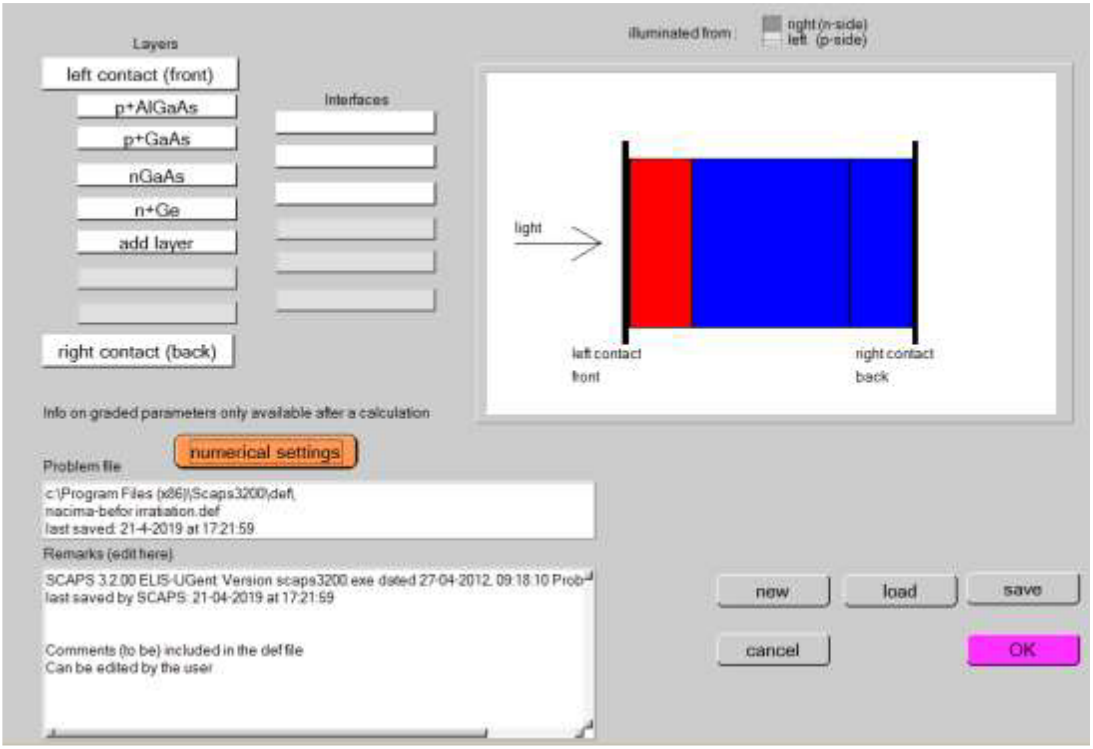


Figure III.2 : Définir le problème.

III.2.4 Les courbes (I-V) sous éclairement :

Le panneau d'apposition pour les courbes I-V sous élucidation (Figure III.3). La couleur de la courbe calculée la plus récente s'affiche (pour effacer tous les graphiques, cliquez sur EFFACER TOUS LES GRAPHIQUES dans le panneau d'action). Les courbes de taux de recombinaison ne sont affichées que pour la simulation la plus récente. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe. Si CURVE INFO est activé et que vous cliquez sur une courbe graphique, une fenêtre contextuelle apparaît avec des informations sur le graphique, la courbe et l'endroit sur lequel vous avez cliqué.

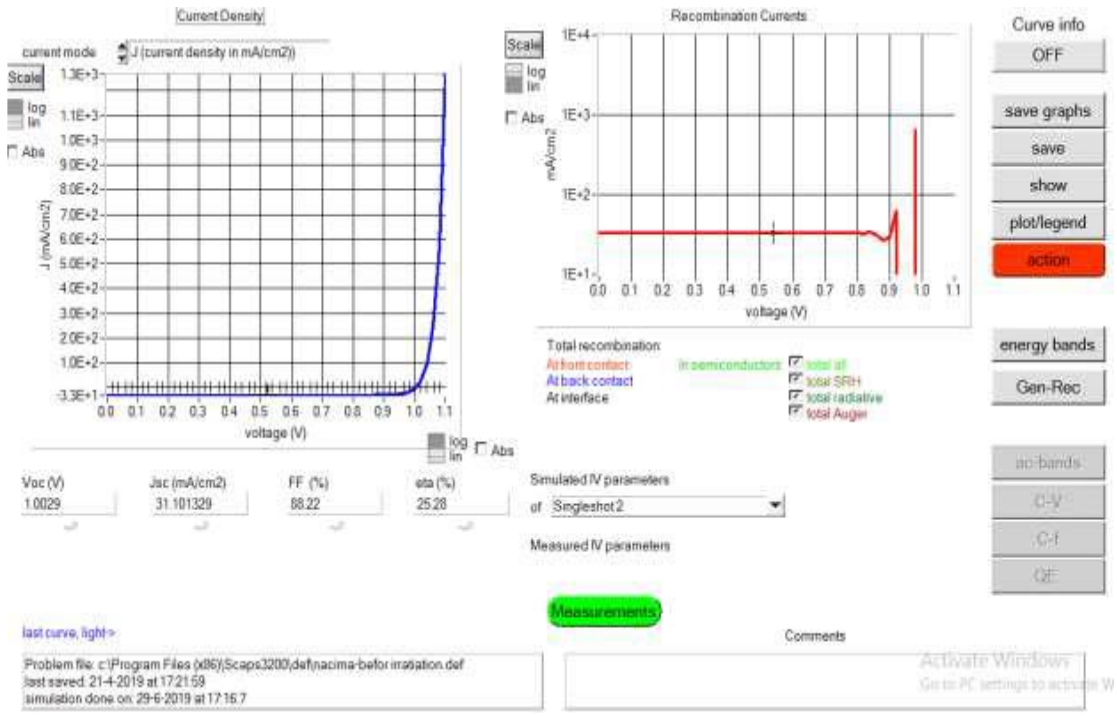


Figure III.3 : Panneau d'affichage des courbes I-V sous éclairement.

III.3. Définir le point de fonctionnement:

Il s'agit de préciser les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (de préciser le point de fonctionnement).

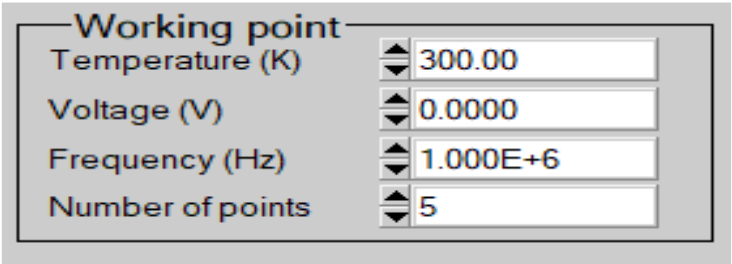


Figure III. 3: Le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas des variables dans les mesures simulées mais qui sont liés à l'opération de mesure.Ceci implique:

❖ **La température T:**

C'est essentiel pour toutes les mesures. Note : Dans SCAPS, seules les valeurs Nc (T), Nv (T), les vélocités thermiques, la tension thermique k et tous leurs dérivés sont les seules variables ayant une dépendance thermique explicite ; pour chaque valeur T, les paramètres matériels correspondants doivent être saisis manuellement.

❖ **Le voltage V:**

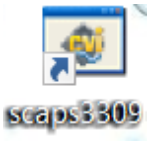
Cela n'a rien à voir avec les simulations I-V et C-V. Dans une simulation C-f et QE, il s'agit de la tension de polarisation CC. Le SCAPS commence à 0 V et atteint la tension de fonctionnement par une série d'étapes qui doivent être spécifiées.La fréquence f:

elle ne concerne pas les simulations I-V, QE(λ) 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(), elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont les suivants : opacité ou lumière, sélection de côté éclairé et sélection de spectre. Le spectre d'éclairage par défaut est un soleil (= 1000 W / m2) avec une masse d'air globale de 1,5, mais il existe également une large gamme de lumières monochromatiques et spectrales et des spectres pour des simulations plus personnalisées. Si vous avez un simulateur optique, vous pouvez créer un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre tout de suite.

III.3.1 Lancer SCAPS :



Double-cliquez sur le fichier SCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou toute autre version de SCAPS) ou cliquez sur l'icône ci-dessus sur le bureau. SCAPS est activé en appuyant sur le bouton d'action..

III.3.2. Sélection des caractéristiques à simuler:

Ce cluster est spécialisé dans la simulation de caractéristiques. Dans la section Action du panneau d'action, vous pouvez simuler une ou plusieurs des mesures suivantes : I-V, C-V, C-f et QE(). Les valeurs de début et de fin de l'argument, ainsi que le nombre d'étapes, peuvent tous être modifiés.

III.3.3. Lancer le calcule:

C'est une commande pour lancer le calcule.

III.3.4. Afficher les courbes simulées:

À la suite des calculs, le SCAPS passe au panneau de bandes d'énergie présenté à la Figure III.4. Sur ce panneau, vous pouvez voir les diagrammes de bande, les densités de port libre, et la densité de courant, ainsi que le dernier point de polarisation. Les résultats pour les tensions intermédiaires peuvent être vus en appuyant sur le bouton pause sur le panneau d'action. Les résultats peuvent être affichés avec les commandes PRINT, SAVE GRAPHS et SHOW, et les valeurs s'affichent à l'écran.

Il est possible de faire un Couper & Coller à un tableur, comme Excel, ou d'enregistrer les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers l'un de vos panneaux personnalisés (tant que vous avez simulé au moins une opération de mesure).

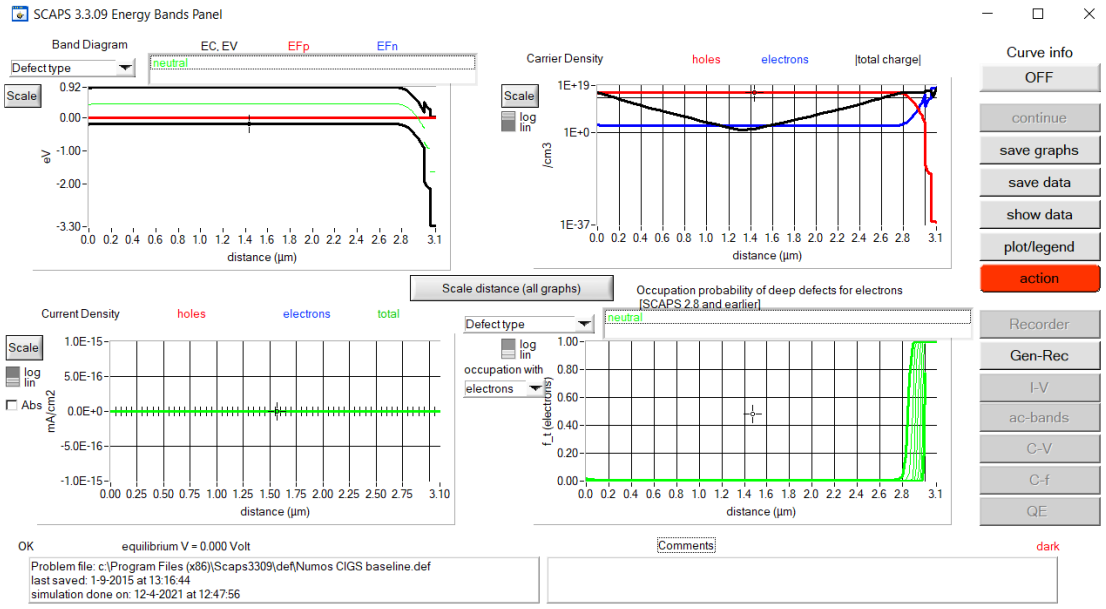


Figure III. 4: Panneau des bandes d'énergie

III.4 Définition d'une cellule solaire:

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. Cela vous permet de saisir tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière interactive, en évitant les valeurs qui sont soit impossibles, soit incohérentes.

III.4.1.Définition des couches:

En sélectionnant le bouton "ajouter un calque", une fenêtre (Figure III.5) apparaît, incluant les différents paramètres du matériau à introduire. Selon les propriétés physiques du matériau, ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes.

Dans le premier scénario, le nom du canapé est introduit (qui correspond au type du dopage).

L'épaisseur du canapé est présentée dans le deuxième exemple. Le troisième bloc concerne la pureté et le profil du matériau.

Le quatrième bloc introduit l'écart d'énergie, les affinités électroniques, la permittivité diélectrique, les densités efficaces des bandes de conduction et de valence, les vitesses thermiques des atomes et des trous libres, et la mobilité atomique. Enfin, une situation qui permet d'ajouter les masses effectives d'électrons et de trous si l'on tient compte du passage tunnel des porteurs.

Si le matériau est composé d'éléments non uniformément répartis, il est possible d'introduire des changements graduels aux paramètres précédents.

La Figure III.6 présente le dopage, la nature et la densité dans le cinquième bloc. Le dopage peut être introduit soit comme étant uniforme, soit comme ayant des variations graduées (linéaires, paraboliques, etc.).

L'absorption du canapé est définie dans le sixième bloc, comme le montre la Figure III.6. L'absorption peut être définie à l'aide du modèle analytique fourni par SCAPS, ou elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit une variété de données d'absorption pour de nombreux types de semi-conducteurs. D'autres données d'absorption pour les semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS peuvent être utilisées si le fichier a la même extension que les fichiers d'absorption fournis par SCAPS.

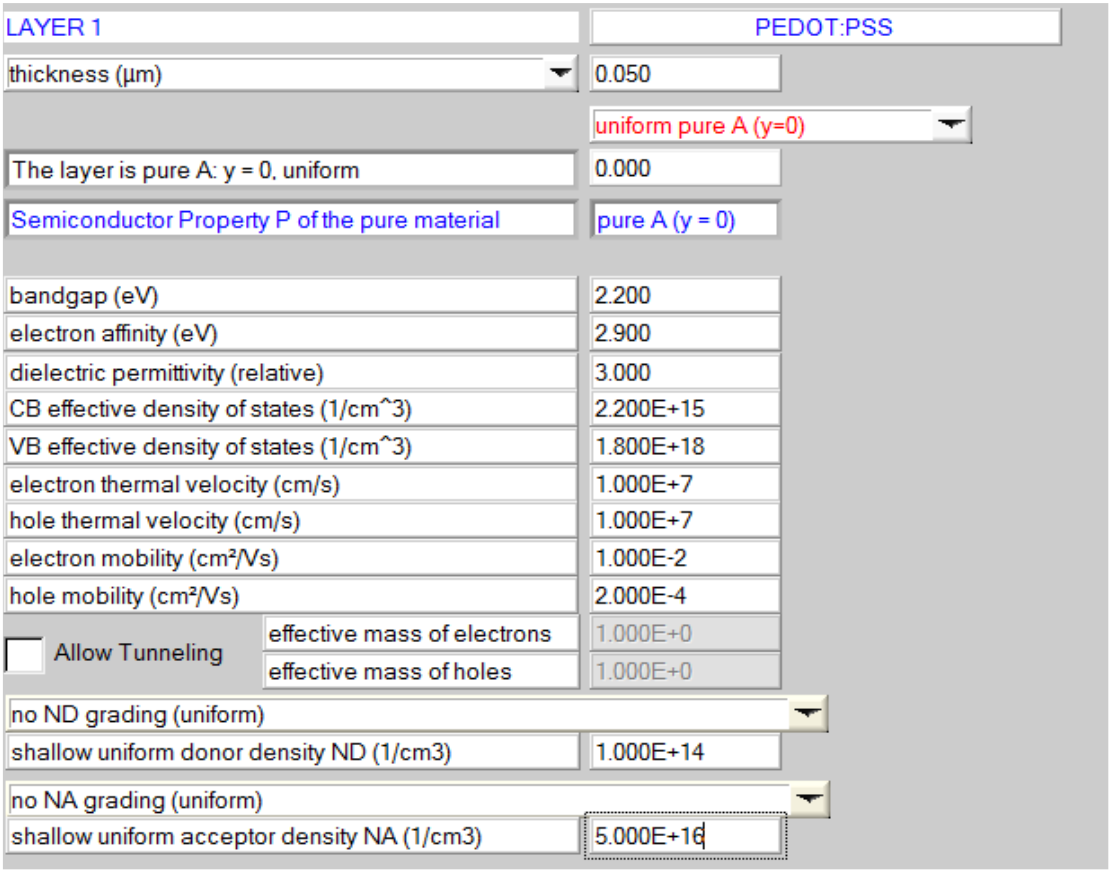


Figure III. 5: Propriétés de la couche ajoutée .

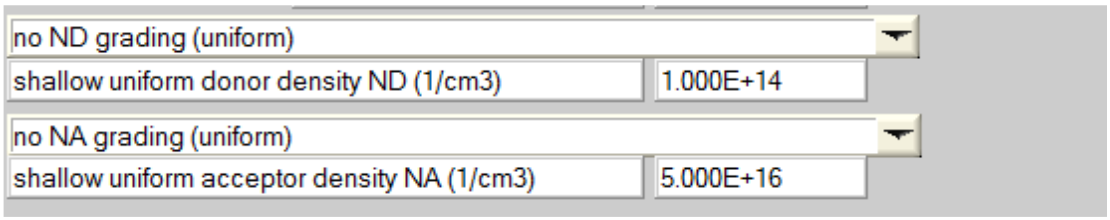


Figure III . 6: Propriétés des dopages définis.

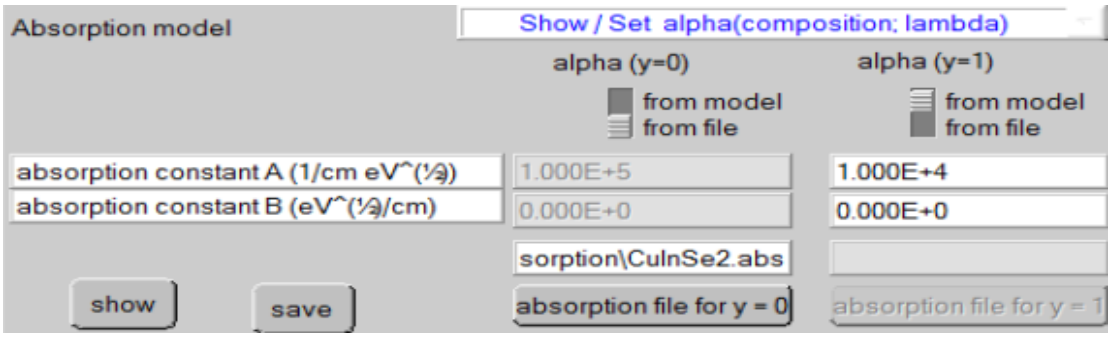


Figure III .7: Modèle de l'absorption.

Le type de recombinaisons en volume présent est indiqué sur le côté droit du panneau des propriétés du canapé (Figure III.8). Toutes sortes de recombinaisons sont présentes, qu'elles soient directes ou via des pièges..

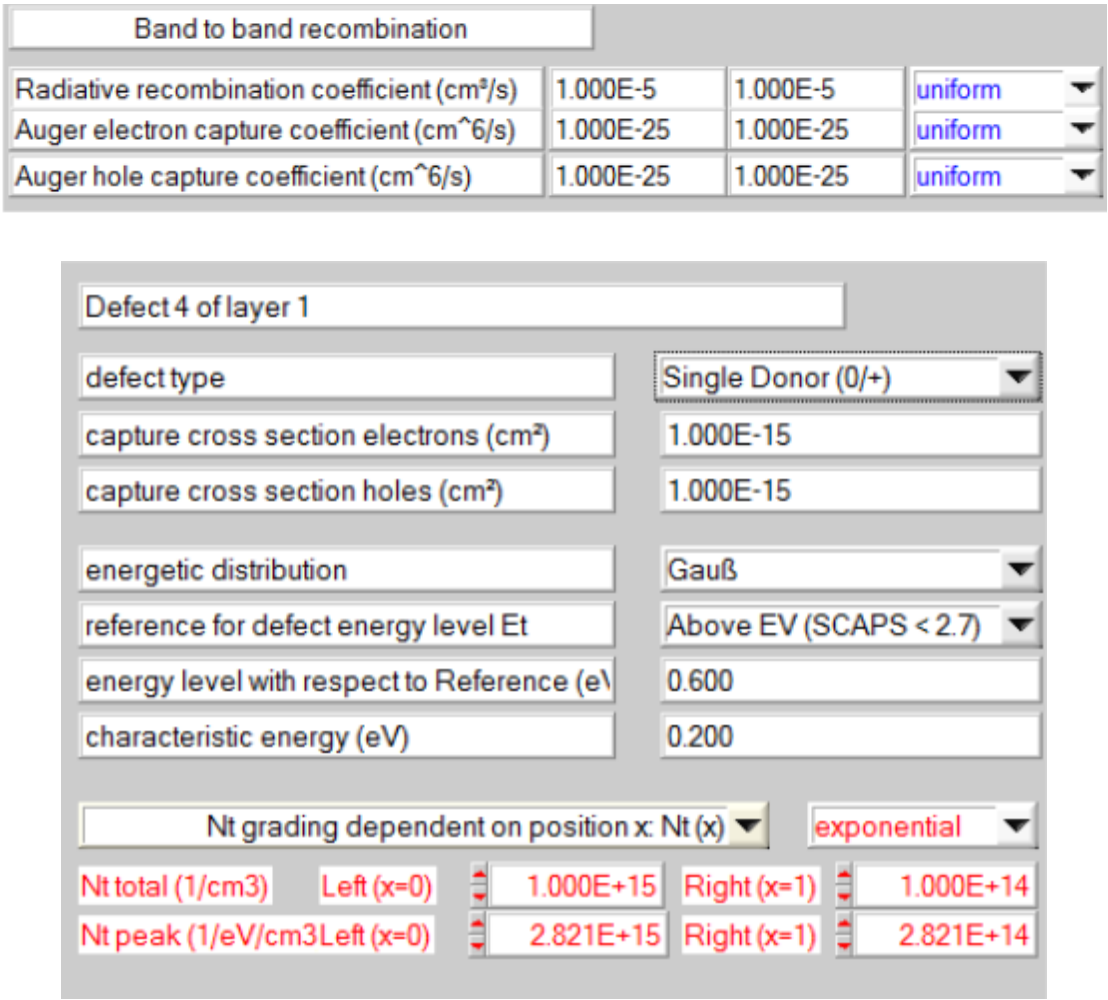


Figure III.8: Définition des types de recombinaison présents.

Si des défauts (pièges) sont introduits, ils peuvent être uniformes ou non, discrets ou avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents.

Les transitions entre les différents niveaux d'énergie des pièges peuvent également être définies [17].

III.4.2. Edition de la structure d'une cellule solaire:

Lorsque vous cliquez sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' apparaît. Ce programme vous permet de créer, modifier et enregistrer des structures de cellules solaires, ainsi que de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers ASCII (American Standard Code for Information Interchange) avec l'extension.def qui peuvent être ouverts en utilisant Notepad.exe ou Wordbad.exe. Il n'est pas recommandé de les modifier puisqu'ils pourraient devenir inutilisables à l'avenir..

Les propriétés des canapés, des contacts et des interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié, comme le montre la Figure III 9. De même, en sélectionnant 'ADD LAYER,' d'autres calques peuvent être ajoutés.

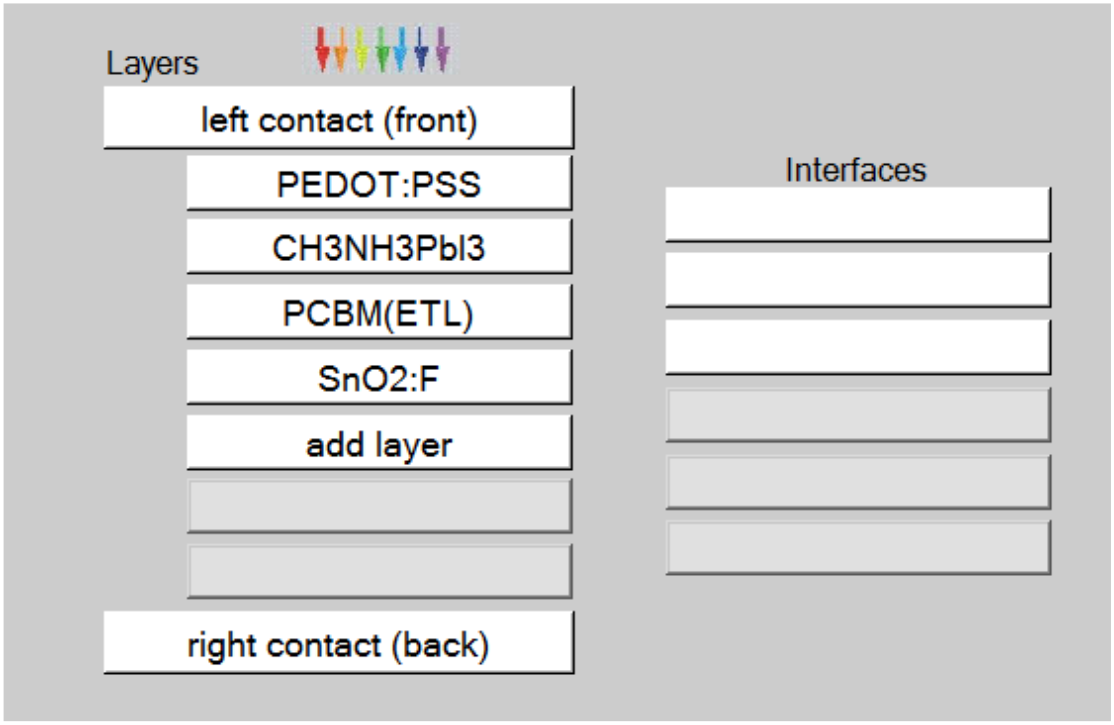


Figure III.9: Définition de la structure d'une cellule solaire.

III.4.3. Contacts:

Les propriétés des contacts peuvent être saisies en cliquant sur les boutons avant ou après le contact dans le panneau de définition de la cellule. Comme le montre la Figure III.10, un panneau de propriétés de contact appelé 'PANNEAU DE PROPRIÉTÉS DE CONTACT' apparaît.

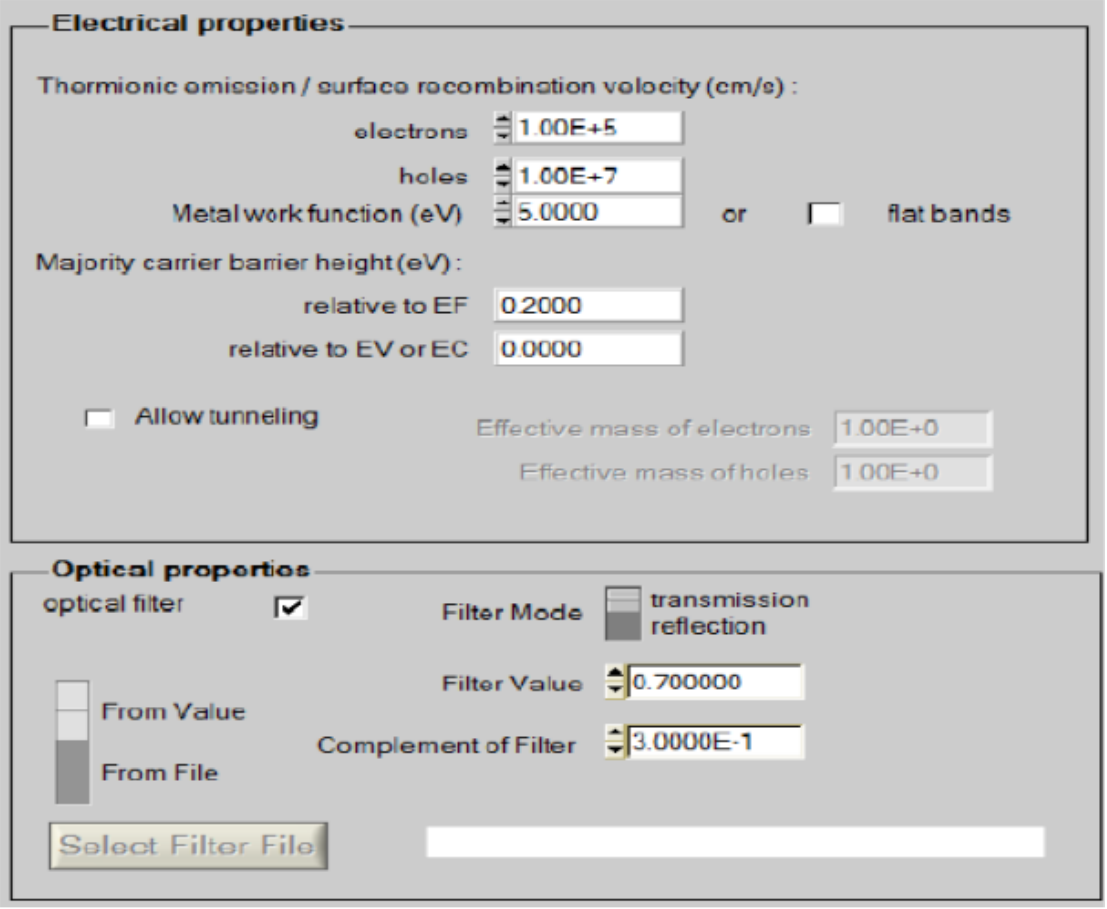


Figure III.10: Panneau des propriétés des contacts.

Les propriétés des contacts sont divisées en deux catégories : les propriétés électriques et optiques. Le terme "propriétés électriques" est utilisé pour décrire les propriétés de l'électricité.:

- 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).

Une valeur ou un fichier de données peut être utilisé pour définir des propriétés optiques telles que la transmission ou la réflexion.

Chapitre IV:

résultat et discussions

IV.1.Introduction:

Afin d'optimiser une conception spécifique d'une structure hétérojonctive NIO/CH3NH3PbI3/PCBM, nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer l'impact des paramètres physiques et technologiques sur les performances de l'appareil, épaisseur, densité superficielle de l'accepteur uniforme NA et densité superficielle du donneur uniforme ND..

Dans les travaux suivants, nous allons simuler une cellule solaire basée sur le matériau CH3NH3PbI3 afin d'améliorer l'efficacité en utilisant des matériaux NIO et PCBM, où nous allons étudier l'effet de l'épaisseur sur la densité du courant de court-circuit (Jsc), tension en circuit ouvert (Vco), facteur de forme (FF) et le rendement en puissance (η).

Les résultats de 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 :

Ce travail comprend une simulation d'une cellule solaire basée sur CH3NH3PbI3 en raison de ses propriétés telles qu'une bande interdite idéale, un large spectre d'absorption, un bon mécanisme de transmission, la facilité de fabrication sur un substrat flexible, le réglage de l'espacement et de la longueur de propagation, et la simulation de ces paramètres optiques et techniques afin de concevoir une cellule avec la plus grande efficacité électrique possible.

Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée de les congénères suivants: (NIO (HTL) / CH3NH3PbI3 / PCBM (ELT)) Une structure typique de cellules solaires à base de CH3NH3SnBr 3 constituée d'une couche

absorbante et supérieure de type p (PCBM (ELT)) et de type n (NIO). Comme le montre la Figure suivante VI.1.

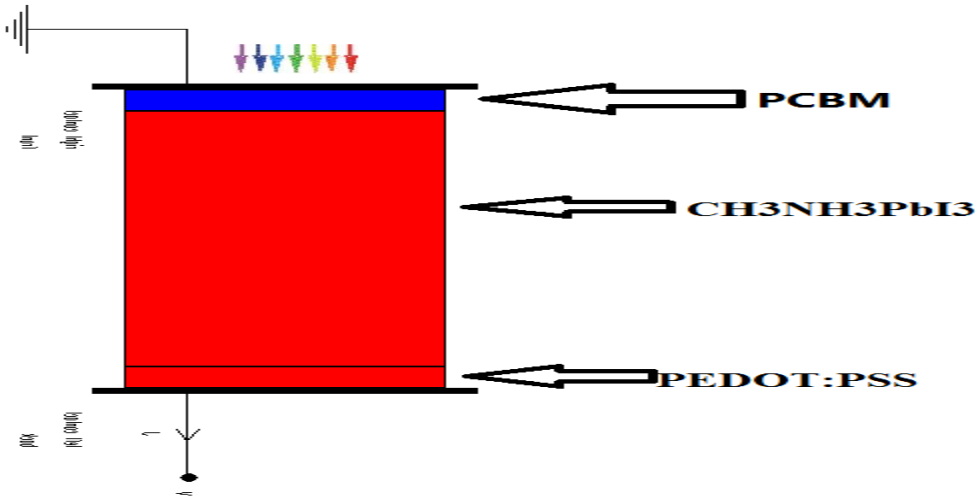


Figure IV. 1: schéma simplifié de la cellule solaire utilisée.

IV.2.2. Les paramètres du dispositif étudié :

❖ **Propriétés des différentes couches:**

Parameter	**ETL**	**Absorber (CH3NH3PbI3)**	**HTL**
Thickness (µm)	0.03	0.35	0.1
Band gap (eV)	3.2	1.5	2.98
Electron affinity (eV)	4.26	3.9	2.1
Relative permittivity	38	10	6.5
conduction band density (cm^{-3})	2.00×10^{18}	2.75×10^{18}	$.280\times 10^{19}$
valance band density (cm^{-3})	1.80×10^{19}	3.90×10^{18}	1.00×10^{19}
Electron mobility	4	2	1.69×10^{-4}

($cm^2V^{-1}s^{-1}$)			
Hole mobility ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)	2	2	1.69×10^{-4}
Donor concentration (cm^{-3})	1.00×10^{16}	0	0
Acceptor concentration (cm^{-3})	0	$.210\times 10^{17}$	1.00×10^{18}
Defect density (cm^{-3})	1.00×10^{15}	4.50×10^{17}	1.00×10^{15}
Capture cross section for Electrons (cm^2)	1.00×10^{-15}	2.00×10^{-14}	1.00×10^{-15}
Capture cross section for holes(cm^2)	1.00×10^{-15}	2.00×10^{-14}	1.00×10^{-15}

Tableau VI .1: Propriétés des différentes couches (ETL / CH3NH3PbI3/ HTL).

IV.3 Effet de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule:

Les épaisseurs et les paramètres utilisées des différentes couches de la cellule de base étudiée sont regroupées dans les tableaux VI (1 et2) :

	Les couches	**Epaisseur (µm)**
1	PEDOT : PSS	0.030
2	CH3NH3PbI3	1.000
3	PCBM	0.030

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

IV .4.Effet de l'épaisseur sur la couche CH3NH3SnBr3 les caractéristiques

électriques de la cellule :

Les paramètres de la structure, dérivés des caractéristiques susmentionnées, sont récapitulés dans les cas suivants:

Nous avons modifié l'épaisseur du matériau (CH3NH3PbI3) de 0,15 à 0,85 m, choisi les meilleures propriétés et installé leur propre épaisseur, une fois que l'épaisseur de la substance (PEDOT/PSS) et (PCBM) a été ajoutée aux propriétés indiquées dans le tableau VI.2.

Épaisseur (***μ***m)	Voc (V)	Jsc (mA/cm2)	FF (%)	eta (%)
0.150	0.7800	14.543929	57.73	6.55
0.250	0.7785	16.614955	49.61	6.42
0.350	0.8110	16.767735	47.71	6.49
0.450	0.8303	16.585684	51.74	7.13
0.550	0.8368	16.630919	54.67	7.61
0.650	0.8389	16.875490	54.59	7.73
0.750	0.8398	17.089007	54.01	7.75
0.850	0.8404	17.144383	53.83	7.76

Tableau VI. 3: Propriété de couche(CH3NH3PbI3).

IV.5. Effet de Température sur les paramètres PV de la cellule solaire :

Nous prenons 8 valeurs. Lorsque la température monte au-dessus (300 à 450 K), cela a un effet sur les paramètres PV de la cellule solaire.

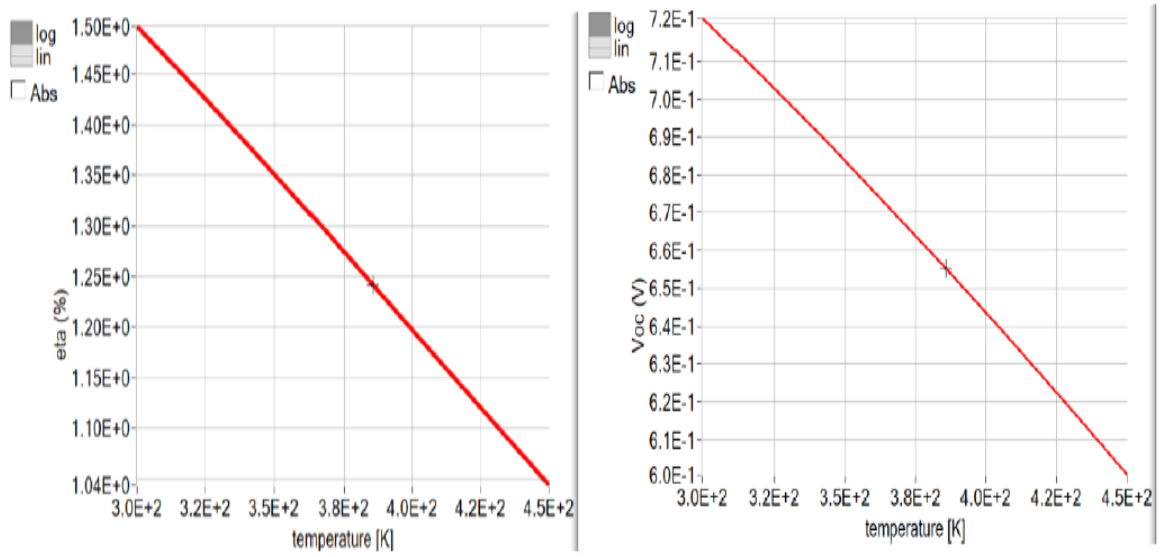


Figure IV.2 : Variation du paramètres photovoltaïques (Voc et η) avec les changements de température

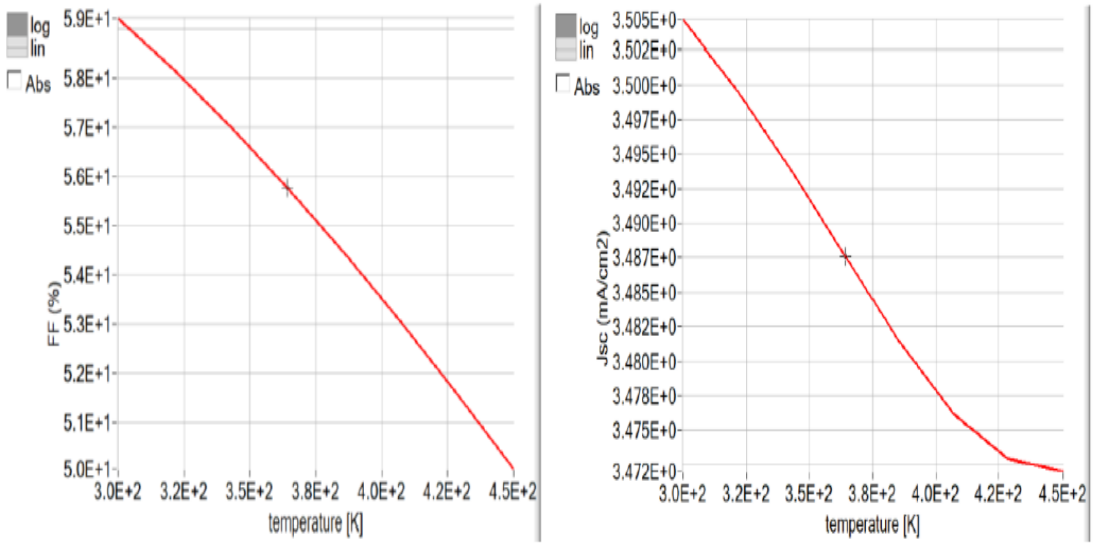


Figure IV. 3 : Variation du paramètres photovoltaïques (Jsc et FF) avec les changements de temperature

Rappelez-vous que lorsque la température augmente, la performance des paramètres photovoltaïques diminue.

En conséquence, la température est influencée négativement par les paramètres photovoltaïques.

IV.6. Courbe courant-tension:

Tous les paramètres améliorés du modèle conceptor peuvent maintenant être obtenus dans la courbe I-V finale. La forme finale a une épaisseur de couche de CH3NH3PbI3 = 0,850 μm:

Voc = 0.8404, **Jsc** = 17.144383, **FF** = 53.83, $\boldsymbol{\eta}$ (%)=7.76

La Figure IV.4 montre la courbe I-V finale du modèle simulé une fois que tous les paramètres précédents ont été optimisés.

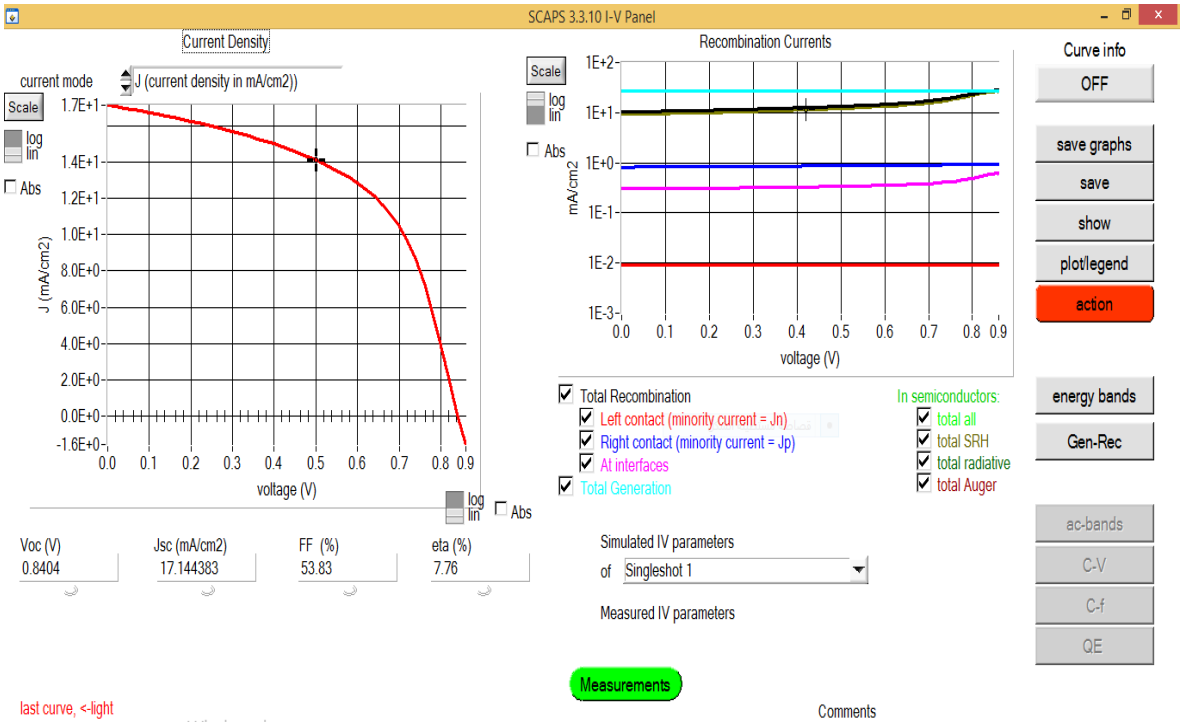


Figure IV. 4: Courbe I-V simulée.

IV.7. Conclusion:

Une cellule pérovskite solaire à architecture Verre (PEDOT : PSS/CH3NH3PbI3/PCBM) a été conçue et analysée à l'aide d'un simulateur de capacité de cellule solaire. L'épaisseur de la couche absorbante et la densité des défauts ont un impact sur la performance de la cellule solaire, ainsi que sur la concentration de dopage HTM et l'effet ETM sur le PV, selon les caractéristiques observées.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec une épaisseur modérée et un absorbeur à faible défaut. Les concentrations de dopage HTM, ETM, entraînent une amélioration significative des paramètres PV.

Simulant la cellule étudiée à travers le programme scaps:

Après avoir affiné tous les paramètres et choisi les meilleurs résultats:

Epaisseur d'absorption de couche (CH3NH3PbI3=0,850 m). Nous avons obtenu un rendement de conversion d'énergie de 7,76 % et une bonne valeur Jsc (17,144383mA / cm2), en plus de 53,83 % FF) et Voc (0,8404v), en notant que le faible rendement est attribuable à un écart de bande dans la couche CH3NH3PbI3.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie à la fois naturelles et durables. Elles sont en perpétuel mouvement et n'ont pas de frontières définies. À titre d'exemple :

Est l'énergie solaire, qui est l'une des sources d'énergie les plus abondantes.

Ressources renouvelables et renouvelables dans le monde et c'est le rayonnement solaire qui peut être utilisé de diverses façons, mais nous continuons de l'utiliser et d'en tirer profit.

Il sera en mesure de répondre de manière appropriée à une grande partie des besoins énergétiques futurs du monde. L'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique par un mécanisme connu sous le nom de cellule, que nous avons appris et discuté dans cette mission.

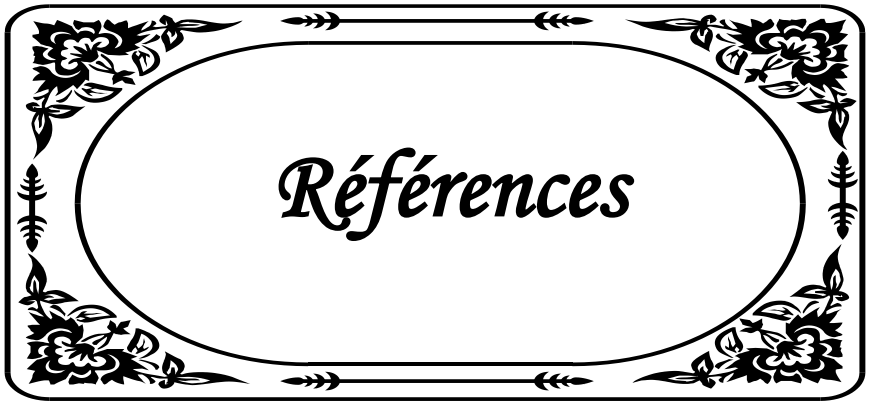
La recherche présentée dans cette thèse se concentre sur l'étude des cellules photovoltaïques faites de pérovskites semi-conducteurs.

En termes d'efficacité, les cellules photovoltaïques pérovskites sont apparues comme l'alternative la plus efficace aux cellules solaires.

Dans cette étude, des simulations numériques ont été utilisées pour estimer et étudier les effets des coefficients d'absorption sur la performance des cellules solaires pérovskites. Pour évaluer la performance d'un dispositif photovoltaïque avec la structure (CuSbS2 / CH3NH3 / PCBM), le dispositif a été modélisé à l'aide d'un logiciel de simulation personnalisé (SCAPS), et l'analyse a été effectuée en utilisant des paramètres physiques tels que l'épaisseur de la couche absorbante et l'épaisseur de la couche de transport du trou.

Là où il a été découvert qu'après avoir changé l'épaisseur de CH3NH3PbI3 de 0,15 m à 0,85 m, le meilleur rendement a été obtenu. De plus, l'épaisseur de la couche de transport CuSbS2 et de la couche de transport d'électrons PCBM a été fixée à 0,030 m.

Nous avons pu construire un système photovoltaïque avec une grande efficacité et des performances en utilisant ce kit.


Références

Références

[1]. R. Castagné et all, Circuits Intégrés en arséniure de Gallium., Physique, technologie etrègles de conception. Masson et Cinet ENST Paris, (1989).

[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 solaries en InGaN en utilisant Atlas Silvaco,Mémoire de Magister. Université Med KhiderBiskra, 2013.

[8] SELBERHERR, S. Analysis and simulation of semiconductor devices. Wien, NewYork: Springer-Verlag, 1984. (s.d).

[9]. A.GREEN.M. " Solar cell ", Ed, University of New South Wales, 1992,

p.336 .

[10]. H. Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants

électroniques", 2ème Edition, Masson, 1990.

[11].http://www.grenoble-isere.com/etudes-etterritoires/pdf_filieres/ photovoltaiqueEtude2010 V14- Fr.pdf

[12]. A. Labouret et al: "Cellules solaires: "les bases de l'énergie photovoltaïque", collection ETSF, Dunod, 4e édition, 2005

[13]. O. Daranfed, "Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de Cu2ZnSnS4", Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine , 2013.

[14]. 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.

[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]. Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Stefaan Degrave, Johan Verschraegen, Koen Decock, " SCAPS manual ", Version 24 April 2012.

[18]. http://scaps.elis.ugent.be/

Résumé

Résumé

Dans cette note, nous étudions l'effet de la chaleur sur les propriétés photovoltaïques de la cellule solaire, afin d'identifier l'efficacité des paramètres photovoltaïques, la structure de la cellule pérovskite (CH3NH3Pbl3) a été modifiée et nous avons calculé divers paramètres de performance tels que Jsc , FF, Voc et eta. La simulation a été effectuée dans des conditions d'éclairage sombres et lumineuses. Dans des conditions d'éclairage sombre.

Nous avons observé que lorsque la température augmente, l'efficacité des paramètres photovoltaïques diminue et donc la température affecte négativement les paramètres photovoltaïques uniquement.

Mots-clés : cellule solaire, chaleur, propriétés photovoltaïques

Summary

In this note, we study the effect of heat on the photovoltaic properties of the solar cell, in order to identify the efficiency of the photovoltaic parameters, the structure of the perovskite cell (CH3NH3Pbl3) was modified and we calculated various performance parameters such as Jsc, FF, Voc and eta. The simulation was conducted in both dark and bright lighting conditions. In the case of dark lighting.

We observed that when the temperature increases, the efficiency of the photovoltaic parameters decreases and thus the temperature negatively affects the photovoltaic parameters only.

Keywords: solar cell, heat, photovoltaic properties

ملخص

قمنا في هذه المذكرة، دراسة تأثير الحرارة على الخصائص الكهروضوئية للخلية شمسية، وذلك قصد التعرف على كفاءة المعلمات الكهروضوئية ، تم تعديل بنية خلية البيروفسكايت (CH3NH3Pbl3) قمنا بحساب معلمات الأداء المختلفة مثل Jsc و FF و Voc و eta. حيث جرت المحاكاة في ظروف الإضاءة المظلمة والمشرقة. في حالة الإضاءة المظلمة.

لاحظنا أنه عندما تزداد درجة الحرارة ، تنخفض كفاءة المعلمات الكهروضوئية وبالتالي فإن درجة الحرارة تأثر سلبا المعلمات الضوئية فقط.

الكلمات المفتاحية: الخلية الشمسية، الحرارة، الخصائص الكهروضوئية