

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de sciences



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : physique

Spécialité : physique énergétique & énergie renouvelable

Par :

CHIKHI bouchera

Thème

Analyse, simulation et étude des performances des cellules solaires p-type (Emetteur wrap through)

Soutenu, le 26 / 06 / 2018 , devant le jury composé de :

Mr T.BAGHDADLI	M.C.A	Univ. Tlemcen	Président
Mme W.DIB	M.C.B	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mme D.KHERBOUCHE	M.C.A	Univ. Tlemcen	Examineur
MR B.CHIKH BLED	M.C.B	Univ. Tlemcen	Examineur

Année Universitaire : 2017/2018

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
Chapitre1 : Présentation de la cellule solaire conventionnelle	02
I.1 Introduction.....	03
I.2Historique de la cellule photovoltaïque.....	04
I.2 Quelques dates importantes dans l’histoire du photovoltaïque.....	04
I.3 La structure de la cellule photovoltaïque.....	07
I.4 Constituant de base d’une cellule photovoltaïque.....	08
I.5Fonctionnement d’une cellule photovoltaïque.....	08
I.5.1 L'absorption de la lumière dans le matériau.....	09
I.5.2 Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons.....	09
I.6 Paramètres de la cellule solaire.....	10
I.6.1 Courant de court-circuit, <i>I_{cc}</i>	11
I.6.2 Tension de circuit ouvert, <i>V_{co}</i>	11
I.6.3 Facteur de forme, <i>FF</i>	11
I.6.4 Rendement de conversion, <i>η</i>	12
I.6.5 Réponse spectrale d’une cellule solaire.....	12
I.7 Le rendement du panneau photovoltaïque.....	12
1.7.1La position géographique.....	13
1.7.2 L'implantation du système.....	14
1.8 Les différents types de cellule solaire.....	14
1.8.1 Première génération : cellules cristallines.....	15
1.8.1.a Les cellules poly-cristallines.....	16
1.8.1.b Les cellules monocristallines.....	17
1.8.2 Deuxième génération : couches minces « thin films».....	17
1.8.2.a Les cellules au silicium amorphe.....	18
1.8.2 .b Les cellules CIGS.....	18
1.8.2 .c La technologie liée au CdTe.....	20
1.8.3 Troisième génération.....	21
1.8.3.a La cellule CZTS	22
1.8.3.b Les Cellules organique.....	22
1.8.3.c Les cellules photovoltaïques à concentration.....	23

1.8.3.d Les cellules à pigments photosensibles.....	24
1.8.3.e Les cellules solaires à boîtes quantiques.....	25
Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD	28
II.1 introduction.....	30
II.2 Présentation du logiciel SILVACO.....	30
II.2.1. La VWF: (virtual wafer Fab).....	30
II.2.2.ATHENA.....	30
II.2.3.ATLAS.....	31
II.2.3.a DECKBUILD.....	31
II.2.3.b TONYPLOT.....	31
II.3 Entrées et sorties d'ATLAS.....	31
II.3.1 Définition du programme de simulation dans deckbuild.....	31
II.3.2 Construction de la structure.....	33
II.3.2.a Définition du maillage.....	33
II.3.2.b Définition des régions.....	34
II.3.2 .c Définition des électrodes.....	38
II.3.2 .d Définition des dopages.....	40
II.3.2 .e Définitions de modèles et matériaux.....	42
II.4 analyse.....	43
II.5Organigramme de simulation.....	45
II. Conclusion.....	
Chapitre3 : Présentation de la cellule d'émetteur a contacté arrière (emitter wrap throught solar cells EWT)	48
III.1 introduction.....	49
III.2 Description de la cellule d'émetteur a contact arrière.....	50
III.3 Structure de la cellule photovoltaïque.....	51
III.4 Différence entre la cellule conventionnelle et la cellule a contacts arrière.....	53
III.5 Les cellules à contacts arrière.....	53
III.5.1 La cellule de Jonction arrière (Back-Junction).....	54
III.5.2 La cellule d'émetteur a contact arrière (Emitter Wrap Through).....	54
III.5.3 La cellule Métal Wrap Throught (MWT).....	54

III.6 Les avantages et les inconvénients de la cellule d'émetteur à contacts arrière.....	54
III.6.a Les avantages.....	54
III.6.b Les inconvénients	55
Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	56
IV.1 Introduction.....	57
IV.2 Exploitation des résultats.....	58
IV.2.a Dopage de l'émetteur.....	58
IV.2.b Dopage du bsf.....	59
IV.2.c Dopage du substrat.....	60
IV.2.d La longueur de diffusion.....	61
IV.2.e Comparaison entre la cellule conventionnelle et la cellule EWT...	62
IV.2.f L'épaisseur du substrat.....	63
IV. CONCLUSION.....	64

LISTE DES FIGURES

Titre	Page
représente le premier satellite équipé de panneaux solaire.	05
représente la photo du premier satellite alimenté par la cellule pv.	06
représente une cellule poly cristallin	07
explique le fonctionnement d'une cellule solaire.	08
Répartition de l'énergie solaire moyenne reçue au sol.	13
représente le facteur agissant sur la production d'énergie d'un panneau.	14
représente des étapes principales pour fabriquer une cellule solaire.	15
cellule poly cristalline Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment.	16
cellule monocristallin	17
cellule couche mince	18
calculatrice solaire.	19
cellules photovoltaïques au CIGS	20
La centrale solaire de La Narbonnaise (Aude) est équipée de 95.000 panneaux solaires au CdTe. Elle a été inaugurée le 18 décembre 2008. © H. Hôte (Agence Caméléon), EDF EN	21
le carré de droite représente une cellule photovoltaïque organique très fine et transparente incluse dans une vitre.	23
Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques	27
Présentation des électrodes (la cathode)	42
présentation des électrodes. (l'anode).	42
Définition du dopage de la région 1	44
Définition du dopage de la région 2	44
Présentation du dopage.	45
Définition des paramètres des matériaux.	46
Déclaration de modèle physique.	46
Définition des contacts des électrodes.	47
Déclaration de la technique numérique.	47

Comparaison entre un module photovoltaïque de cellule conventionnel et un module photovoltaïque de cellule d'émetteur a contacté arrière EWT.	49
Exemple des résultats obtenus avec silvaco	50
présente La structure générale d'une cellule d'metteur a contact arrière.	50
Organigramme du programme de simulation	51
constituant d'une cellule EWT	51
MEB d'un bord de trou sur la surface avant texturisée.	52
Différence entre la cellule conventionnelle et la cellule a contacts arrière	53
Les cellules à contacte arrière	54
Paramètres variables pendant la simulation	57
Grandeurs physiques simulées de la cellule référence.	62
performances des cellules photovoltaïque (cellule EWT et cellule conventionnelle) obtenue par la simulation sous Atlas Silvio.	62
représenté les résultats de simulation de l'ISC	66
représenté les résultats de simulation du VOC	67
représenté les résultats de simulation de l'EFF	68

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
I.1	représente les facteur agissant sur la production d'énergie d'un panneau .	15
I.2	Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques	28
IV.1	Paramètres variables pendant la simulation	62
IV.2	Grandeurs physiques simulées de la cellule référence .	68
IV.3	performances des cellules photovoltaïque (cellule EWT et cellule conventionnelle)obtenue par la simulation sous Atlas Silvio.	68

Dédicaces

Avant tous, je dédie ce travail à l'âme de ma chère grand-mère 'Fatiha'. Que Dieu, dans son grand paradis la garde et lui alloue une place de choix dans son royaume céleste.

D'un cœur plein d'amour et de fierté, je dédie ce modeste travail à mes deux bougies qui brûlent pour m'éclairer le chemin,

À la personne qui m'est la plus chère au monde,

Ma mère qui m'a élevée, éduquée et sacrifiée toutes ses belles années de sa vie pour moi,

À l'homme de ma vie

Mon cher père qui n'a jamais cessé de combattre pour me voir réussir un jour

À mon frère Mohamed et mes sœurs Safaa et mon bras droit Wafaa

À ma belle-famille et mon futur mari

À tous mes cousines et cousins et spécialement mon cousin Yassine

À tous mes oncles et leurs femmes

À tous mes tentes et leurs maris

Que dieu les protège pour moi...

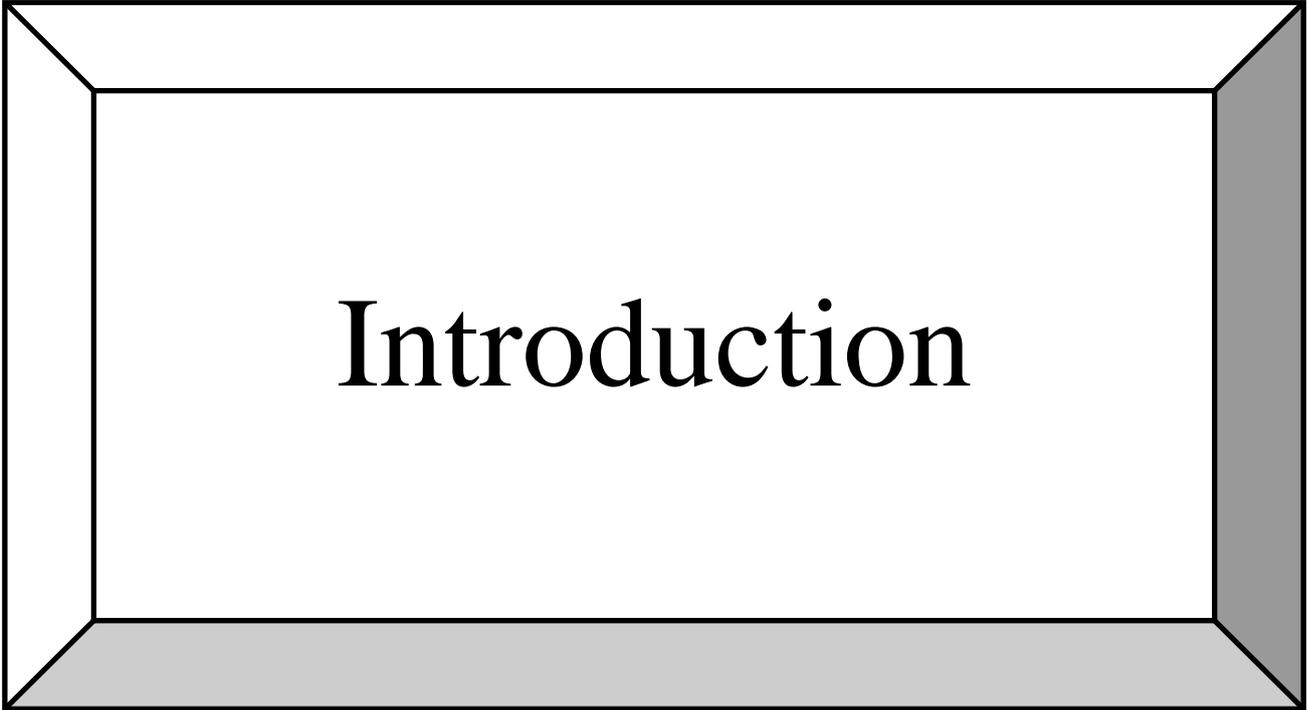
Remerciements

J'adresse mes profonds remerciements à mon encadreur Mme. KAZI TANI WASSILLA pour ce sujet passionnant, originel et d'actualité, pour tous les conseils qu'elle m'a prodigué ainsi pour son assistance continue et ces Encouragements.

Je tiens à remercier aussi Mr. BAGHDADLI d'avoir accepté de présider ma soutenance ainsi Mme .D.KHERBOUCHE et Mr B.CHIKH BLED au d'avoir bien voulu examiner ce modeste travail.

Une pensée pour tous mes camarades de promotion du master énergétique et énergie renouvelable pour les bons moments passés ensemble lors de notre année théorique et le long de notre préparation du mémoire.

Enfin, je tiens à remercier aussi les enseignants/chercheurs, les doctorants, les Masterants et les ingénieurs de l'unité de recherche URMER et de l'Université de Tlemcen.



Introduction

Nous sommes dans une époque où la demande en énergie ne cesse de croître et où les ressources telles que le pétrole diminuent. La cellule photovoltaïque a été inventée il y a 170 ans, et pourtant les centrales photovoltaïques ne sont pas encore en nombre important. Pourtant on entend beaucoup de scientifiques parler du problème de l'effet de serre, du "trou" dans la couche d'ozone. L'énergie solaire représente 0.04% de l'énergie renouvelable mondiale. Celle-ci étant la moins utilisée. La cellule solaire photovoltaïque, est fabriquée par une succession d'étapes industrielles optimisées jour après jour afin d'arriver à des rendements de conversion les plus élevés possibles.

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs électroniques capables de faire la conversion de l'énergie lumineuse en un courant électrique. Le principe de ces cellules est de forcer les électrons et les trous du matériau semi-conducteur les constituant, à se diriger chacun vers une face opposée du dispositif au lieu de se recombiner simplement en volume.

Ainsi, il apparaîtra une tension entre les deux faces, de la cellule comme une pile.

Pour cela, on s'arrange à créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction p-n entre deux couches du semi-conducteur dopées respectivement p et n.

Suite à une excitation lumineuse, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite du semi-conducteur communiquent leur énergie aux atomes et une différence de potentiel est créée.

L'effet photovoltaïque est basé donc, sur une bonne absorption de photons et une conversion très performante de l'énergie absorbée en charges électriques. La cellule solaire photovoltaïque, est fabriquée par une succession d'étapes industrielles optimisées jour après jour afin d'arriver à des rendements de conversion les plus élevés possibles mais la présence des contacts sur la face avant engendre des pertes, car cela crée de l'ombrage et n'exploite pas entièrement toute la surface exposée et de cette raison les cellules à contact arrière ont été inventées.

On présente trois types de cellules (Back-contact) cellules à contact arrière :

La cellule en Back-Junction :

Cette technologie est maîtrisée et présente l'avantage de n'avoir ni contacts métalliques ni émetteurs sur la face avant du module.

De plus, elle possède un haut niveau de rendement. (figure 46)

La cellule Metal Wrap Through (MWT) :

Cette cellule est très proche du modèle EWT, mais comprend la présence d'une fine grille sur la face avant, qui communique avec l'arrière par des trous percés au laser. On peut percevoir visuellement les contacts, qui restent légers. (figure 46)

La cellule Emitter Wrap Through (EWT) :

Sur cette cellule, l'émetteur reste présent sur la face avant, mais les contacts sont bien sur la face arrière. Cette disposition permet une meilleure collection des porteurs de charge, et représente un avantage pour les matériaux ayant une faible longueur de diffusion de porteurs. (figure 46)c'est la cellule étudié .

Pour prédire les paramètres physiques et géométriques des matériaux et systèmes Électroniques et optoélectroniques de plus en plus les chercheurs font appel à la Simulation. Ceci leur permettra de fabriquer moins de prototypes avec la prédiction de Certains paramètres qui seront testés et améliorés grâce à la caractérisation (optique Et électrique).

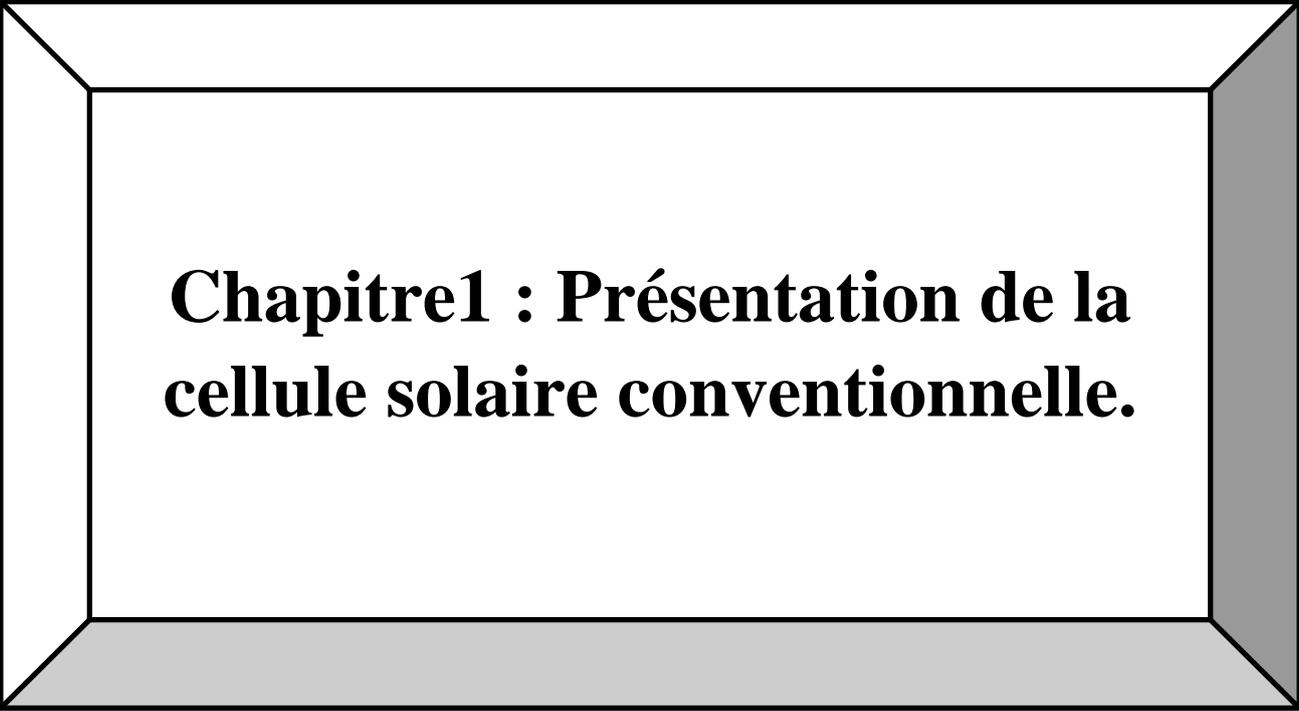
Dans notre travail nous allons tout d'abord procéder dans le premier chapitre, l'état de l'art de ce genre des cellules photovoltaïques conventionnelles.

Le deuxième chapitre est consacré pour présenter le logiciel de simulation Atlas Silvaco qui est utilisé dans notre travail.

Dans le troisième chapitre, nous décrirons sa, dans le premier temps, nous allons voir la cellule Photovoltaïque d'émetteur à contact arrière, c'est la cellule à étudier et à simuler dans notre étude. Dans un deuxième temps nous énoncerons ces propriétés physiques et nous verrons auxquels point sont affrontées les chercheurs et les industriels pour la conception de ces cellules.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons les résultats de la simulation et leurs interprétations puis on va faire une comparaison en performance entre l'EWT (notre cellule) étudiée et la cellule conventionnelle.

Nous terminerons le manuscrit avec une conclusion générale sur l'objectivité de la simulation et des perspectives.



**Chapitre1 : Présentation de la
cellule solaire conventionnelle.**

I. I Introduction :

Le Soleil est à la fois une réalité astrophysique fondamentale et l'origine de toutes les ressources énergétiques terrestres. Il fait pour cela l'objet d'un immense travail culturel, scientifique et technologique.

Le développement humain s'organise autour de l'extraction indirecte de l'énergie solaire absorbée et transformée par les différentes espèces vivantes, par le biais de processus biologiques et géologiques complexes.

Les différentes sociétés humaines ont un rapport complexe aux différentes sources et formes d'énergie qui découlent, directement ou indirectement, des interactions entre le Soleil et l'écosystème terrestre.

Grâce à la chimie et à la physique, il est désormais possible de mieux comprendre les interactions entre la Terre et le Soleil.

L'homme à trouver une des meilleures méthodes pour utiliser cette énergie solaire c'est l'énergie photovoltaïque, la cellule solaire a été inventé il y a 170 ans en effet les centrales photovoltaïques ne sont pas encore en nombre important.

Pourtant on entend beaucoup de scientifiques parler du problème de l'effet de serre, du "trous" dans la couche d'ozone.

L'énergie solaire représente seulement 0.04% de l'énergie renouvelable mondiale à cause de ce rendement de ces cellules, les scientifiques font beaucoup de recherche pour améliorer les performances de celle-ci...¹

¹« Introduction », consulté le 6 mai 2018, <http://tpeenergiephotovoltaïque.e-monsite.com/pages/introduction/introduction.html>.

II. Historique de la cellule photovoltaïque :

Considéré dans l'Antiquité comme un dieu, le soleil est aujourd'hui réduit au statut d'énergie, une énergie qu'il nous faut apprendre à capter, à transformer, à stocker... capter cette énergie solaire et la transformer directement en électricité par effet photovoltaïque est une alternative.²

- Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français « Edmond Becquerel » découvre l'effet photovoltaïque.³

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles 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.⁴

²« Histoire du Photovoltaïque », *Technics* (blog), consulté le 9 juin 2018, <http://www.prime-energy-technics.ch/media/histoire-du-photovoltaïque/>.

³sdn72master, « Edmond Becquerel... découvre l'effet photovoltaïque en 1839 – Sortir du Nucléaire 72 », consulté le 6 mai 2018, <http://www.sdn72.org/2014/03/27/1839-edmond-becquerel-france-1839-france/>.

⁴« NASA - NSSDCA - Spacecraft - Details », consulté le 6 mai 2018, <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1958-002B>.

Chapitre1 : Présentation de la cellule solaire conventionnelle

Le premier satellite scientifique Américain l'Explorer-6 lancé en août 1959 il est équipé de panneaux solaires, il a une masse de 40 kg et dispose d'une caméra sommaire pour voir la terre. (Doc NASA 1959)

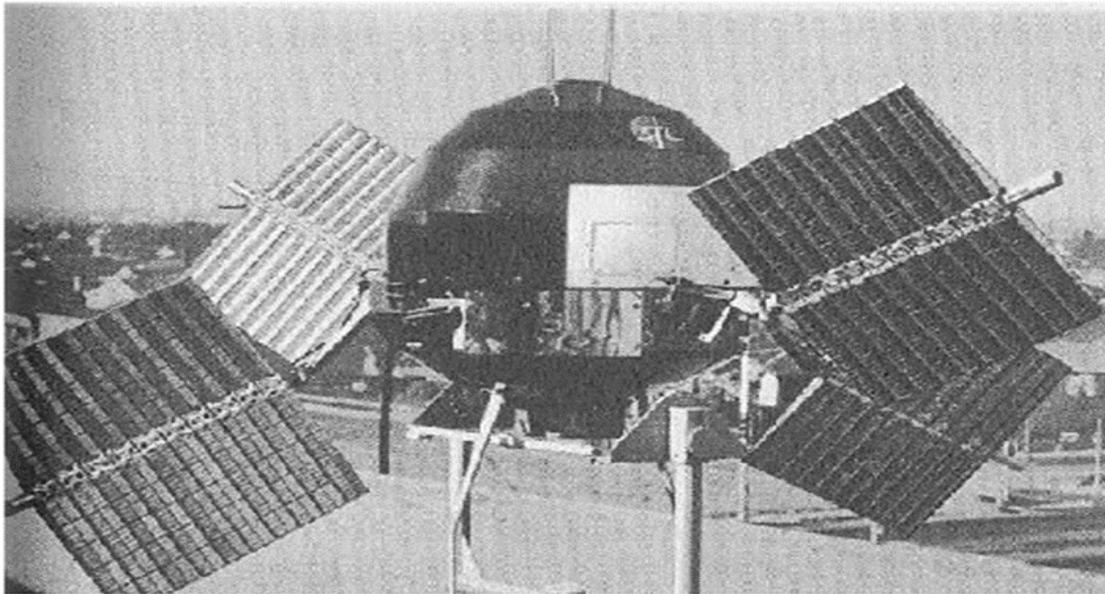


Figure1 : représente le premier satellite équipé de panneaux solaire.

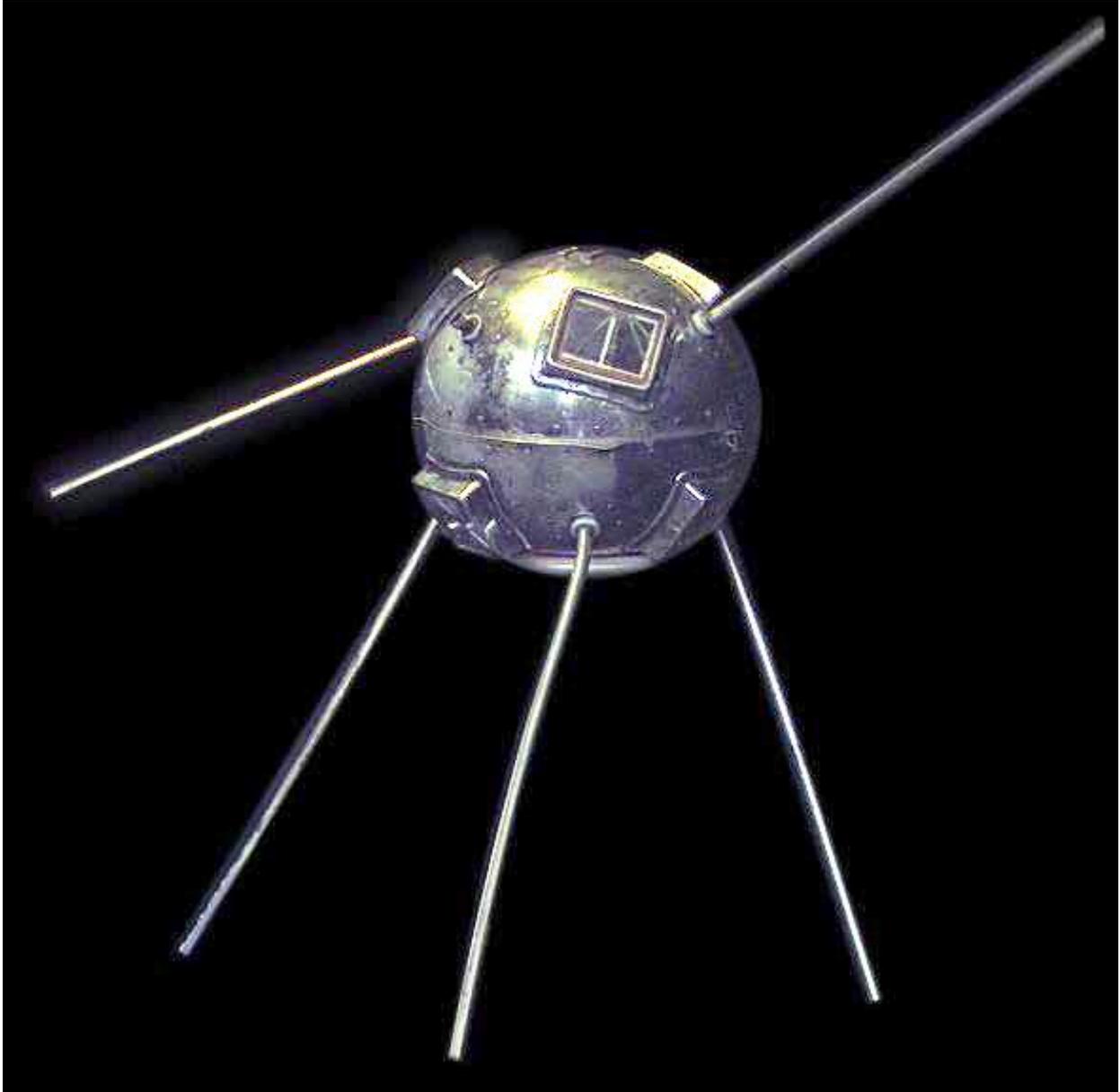


Figure2 : représente la photo du premier satellite alimenté par les cellules pv⁵.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.⁶

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.⁷

⁵« NASA - NSSDCA - Spacecraft - Details ».

⁶« L'invention des panneaux photovoltaïques », consulté le 9 juin 2018, <http://tpe-panneauxphotovoltaïques.e-monsite.com/pages/panneaux-photovoltaïques/l-histoire-du-panneaux-photovoltaïques/l-invention-des-panneaux-photovoltaïques.html>.

⁷« DE L'ELECTRICITE A PARTIR DU SOLEIL », consulté le 6 mai 2018, <http://sulfate.ch/Energie/A%20PARTIR%20DU%20SOLEIL.htm>.

III. La structure de la cellule photovoltaïque :



figure3 : représente une cellule poly cristallin⁸

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile .L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante.

⁸http://www.dhammaenergy.com/comment_marche.html.

IV. Constituant de base d'une cellule photovoltaïque :

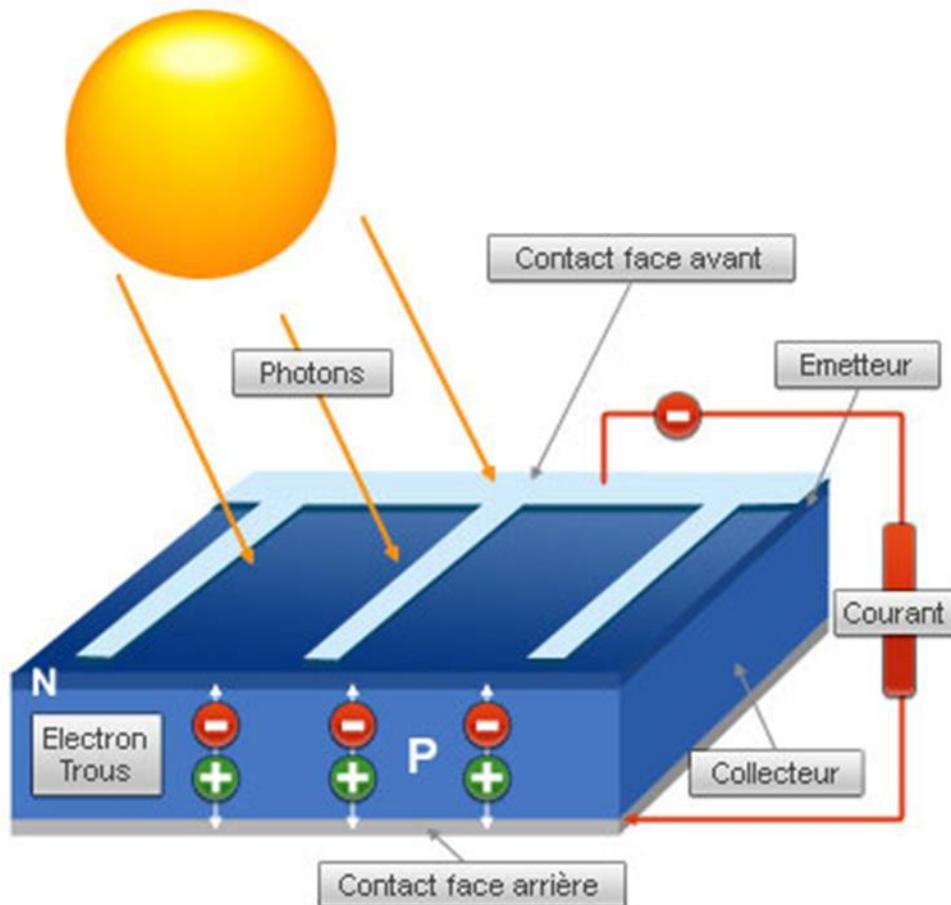


Figure4 : explique le fonctionnement d'une cellule solaire.

Un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N. Et d'épaisseur e égale à quelques millièmes. Entre les deux zones se trouve une jonction J. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode k tandis qu'une plaque métallique a recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm. Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. En général le semi-conducteur de base est du silicium monocristallin comme celui qui est utilisé pour la fabrication des transistors mais on rencontre maintenant plus fréquemment du silicium poly cristallin moins coûteux à produire.⁹

⁹ « La cellule photovoltaïque », consulté le 6 mai 2018, <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23e/RM23e03.html>.

V. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Les photons, énergie lumineuse des rayons solaires, atteignent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince.

L'énergie des photons est alors transférée aux électrons qui gravitent autour des atomes dont est formé le matériau. C'est l'effet photoélectrique. Les électrons libèrent l'énergie des photons sous forme de chaleur.

L'énergie est récupérée sous forme électrique. L'électron forme avec le « trou » qu'il laisse au niveau inférieur une paire « électron-trou ». Les électrons et les trous sont de charges de signes opposés (-q ; +q). Les cellules photovoltaïques sont des jonctions PN, faites en associant un semi-conducteur de type n avec un semi-conducteur de type p, comme le silicium dopé phosphore et le silicium dopé bore. Soumises à un champ électrique dans une jonction PN branchée sur un circuit extérieur, les paires électrons-trous vont se séparer et les électrons ayant libéré l'énergie des photons vont se mettre en mouvement dans une direction particulière : un courant électrique est créé.

Le courant électrique continu créé est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante.

Le courant s'additionne en passant d'une cellule à l'autre jusqu'aux bornes de connexion du module, et il peut ensuite s'additionner à celui des autres modules raccordés en "champs".

1. L'absorption de la lumière dans le matériau :

La lumière est composée de photons. Les photons sont des éléments capables de traverser la lumière et de la pénétrer. Plus généralement un rayon lumineux qui arrive sur un objet peut subir trois événements optiques :

-**la réflexion** : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet

-**la transmission** : la lumière traverse l'objet¹⁰

-**l'absorption** : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est alors restituée sous une autre forme.¹¹

¹⁰ « Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque », consulté le 28 mars 2018, <http://tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/principe-de-fonctionnement-de-la-cellule-photovoltaique.html>.

¹¹ Encyclopædia Universalis, « ABSORPTION, physique », Encyclopædia Universalis, consulté le 6 mai 2018, <http://www.universalis.fr/encyclopedie/absorption-physique/>.

2. Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons :

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, (de charge 1.6×10^{-19}) charges négatives élémentaires contenues dans la matière semi-conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Ce sont les électrons des couches électroniques périphériques qui vont absorber l'énergie des photons, ce qui les libère de l'attraction électrostatique (et gravitationnelle) du noyau de l'atome.

L'énergie d'un photon d'un certain rayonnement est donnée par une relation simple puisqu'elle est proportionnelle à la fréquence du rayonnement utilisée. La constante universelle qui lie ces deux grandeurs est " h ", la constante de Planck.

La constante de Planck a pour unité la fraction de l'énergie sur un temps, c'est-à-dire le Joule-seconde (J.s). Sa valeur, dans le système international d'unités, est : $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ J.s. On a donc la formule : $e = hc/\lambda$

L'effet photoélectrique est donc l'émission d'électrons par un métal quand il est exposé à des radiations lumineuses, on doit son explication à Einstein, lui-même inspiré par Maxwell. Les électrons libérés sont ensuite susceptibles de produire un courant électrique.

VI. Paramètres de la cellule solaire :

- Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :
 1. Le courant de court-circuit ***I_{cc}***
 2. La tension en circuit ouvert ***V_{co}***
 3. Le facteur de forme ***FF***
 4. Le rendement de conversion d'énergie ***η***
 5. La réponse spectrale ***RS***

Chapitre1 : Présentation de la cellule solaire conventionnelle

1. Courant de court-circuit, I_{cc} : Le courant de court-circuit exprimé en mA , est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

2. Tension de circuit ouvert, V_c : La tension de circuit ouvert exprimée en V est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

3. Facteur de forme, F : La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée $P_m = P_{max}$) pour un point de fonctionnement $P_m I_m = I_{max}, = V_{max}$ de la courbe courant-tension. Le facteur de forme est défini par la relation suivante: $FF = P_m V_{co} / I_{cc} = V_m \cdot I_m V_{co} / I_{cc}$

4. Rendement de conversion, η : Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} . $\eta = P_m / P_{in} = FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc} / P_{in}$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert $P_m = 0, = V_{co}$ ou en court-circuit $R_c = 0, = I_{cc}, =$, aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale .

5. Réponse spectrale d'une cellule solaire : 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 : $RS = I_{cc} \lambda P_{in} \lambda A / W$

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 : $EQE \lambda = .h.c \lambda . q$

Chapitre1 : Présentation de la cellule solaire conventionnelle

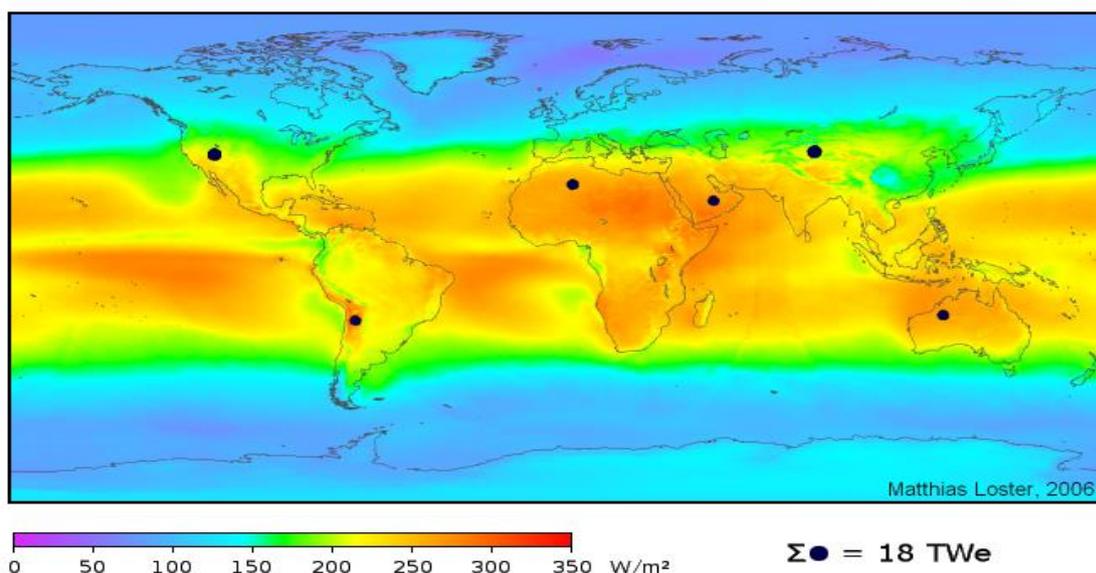
Le rendement quantique interne IQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe EQE par l'équation : $IQE\lambda = EQE\lambda(1-R\lambda)$

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

VII. Le rendement du panneau photovoltaïque

1. La position géographique :

La production électrique d'un site photovoltaïque dépend de sa position géographique : en effet le lieu doit être éclairée de façon abondante et donc dépendre d'une position géographique appropriée¹², le rayonnement solaire reçu sur la terre de façon intermittente. Les rayons du soleil sont occultés par les différentes couches constitutives de l'atmosphère, ainsi que par les nuages. De plus la géométrie pseudo-sphérique de notre planète induit une différence d'ensoleillement selon la localisation considérée. Son mouvement, à l'origine du phénomène de jour et de nuit, réduit de moitié le flux solaire perçu [13]



¹² « Historique de la cellule photovoltaïque », consulté le 6 mai 2018, <http://tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/historique-de-la-cellule-photovoltaique.html>.

Figure5 : Répartition de l'énergie solaire moyenne reçue au sol.¹³ Les couleurs de la carte indiquent le rayonnement solaire, en moyenne, (24 heures/jour), en considérant les données des nuages des satellites météorologiques. Le rayonnement dans les régions sous les points foncés peuvent fournir toute la puissance électrique, thermique, carburant, etc. pour le monde entier si ces régions étaient couvertes de panneaux solaires d'une efficacité de 8%.¹⁴

2. L'implantation du système

L'inclinaison de la cellule est un facteur jouant sur l'efficacité du module à produire de l'énergie. L'implantation du système est le positionnement de la cellule suivant son orientation et l'inclinaison du système.¹⁵ Observons maintenant ce tableau

FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNEES					
INCLINAISON					
ORIENTATION		0° —	30° /	60° /	90°
Est		0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est		0,93	0,96	0,88	0,66
Sud		0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest		0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest		0,93	0,90	0,78	0,55

 : position à éviter si elle n'est pas imposée par une intégration architecturale

source Hespul

NB : ces chiffres n'incluent pas les possibles masques qui pourraient réduire la production annuelle.

Tableau 1 : représente les facteurs agissant sur la production d'énergie d'un panneau.

Le tableau ci-contre donne le facteur de correction à appliquer à la production attendue du système en fonction de son orientation et de son inclinaison .On remarque qu'une orientation vers le sud produit une énergie plus grande.

¹³ « Fichier:Solar land area.png — Solarpedia », consulté le 6 mai 2018, http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Fichier:Solar_land_area.png.

¹⁴ « SIGMA TEC Photovoltaïque - Les principes - », consulté le 9 juin 2018, http://www.sigma-tec.fr/textes/texte_principes.html.

¹⁵ « Principes de base pour l'orientation de panneaux photovoltaïques », consulté le 6 mai 2018, <http://www.lepanneausolaire.net/principes-base-l-orientation-panneaux-photovoltaïques.php>.

VIII. Les différents types de cellule solaire :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui lorsqu'il est exposé au spectre solaire génère une tension électrique par effet photovoltaïque.

Toutes les cellules sont créées à partir de matériaux semi-conducteurs. La plupart du temps, c'est le silicium (Si) qui est utilisé mais on rencontre aussi le sulfure de cadmium (CdS), le tellure de cadmium (CdTE), des alliages de cuivre indium et sélénium(CIS).¹⁶

Trois technologies de cellules existent suivant leur mode de production :

➤ 1ère génération : cellules cristallines

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "wafers" à partir d'un silicium très pure, reste très énergivore et coûteuse.



Figure6 : représente des étapes principales pour fabriquer une cellule solaire.

Méthode de fabrication : le cristal formé par refroidissement du silicium en fusion dans des creusets parallélépipédiques est ensuite découpé en fines tranches appelées "wafers". Les cellules sont alors obtenues après "dopage" et traitement de surface¹⁷

¹⁶ « Les différents types de cellules photovoltaïques - Ecosources », consulté le 9 juin 2018, https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques.

¹⁷ « Cellule Solaire Cristalline », consulté le 9 juin 2018, <http://www.bipv.ch/index.php/fr/materiel/glossaires/item/711-cellulesolairecristalline>.

❖ On distingue deux types de cellules cristallines :

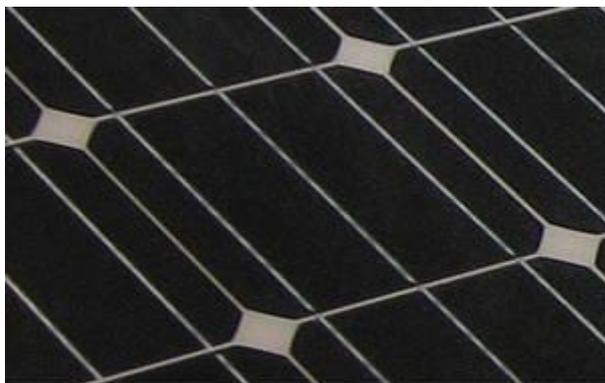
a) Les cellules poly-cristallines :



Figure7 : cellule poly cristalline.

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux¹⁸. Son rendement est : 11-15 % la puissance est de 110 à 150 Wc par m², ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leurs homologues monocristallin son dire que rendement est faible par rapport au éclairement réduit¹⁹.

b) Les cellules monocristallines :



¹⁸ « Quelle est la différence entre polycristallin monocristallin et amorphe cellule solaire à couche mince? - Solar Water Heater », consulté le 8 mai 2018, http://www.sunflower-solar.com/index_fr.php?act=content&scheduler_id=3629.

¹⁹ « Les différents types de cellules photovoltaïques - Ecosources ».

Figure8 : cellule monocristallin

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium. Leur rendement *est à* 12-19 % (On obtient ainsi une puissance de 120 à 190 Wc par m²), donc elle a un très bon rendement mais le Coût reste élevé.²⁰

➤ 2eme génération : couches minces « thin films » :



Figure9 : cellule couche mince

Dans le cas de "couches minces", le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre). Le silicium amorphe (a-Si) (silicium non cristallisé de couleur gris foncé), le tellure de cadmium (CdTe), le di sélénium de cuivre indium (CIS) font notamment partie de cette génération.²¹ Ce sont des cellules de cette technologie que l'on retrouve dans les montres, calculatrices,... dites solaires on peut citer quelque une :

- a) Les cellules au silicium amorphe : Les cellules au silicium amorphe (a-Si) sont apparues en 1976. Elles marquent une transition importante entre les

²⁰ Définition de Silicium monocristallin », Actu-Environnement, consulté le 9 juin 2018, https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/silicium_monocristallin.php4.

²¹ « Epaisseur des couches minces - HORIBA », consulté le 9 juin 2018, <http://www.horiba.com/fr/scientific/products/ellipsometers/ellipsometry-academy/ellipsometry-tutorial/thin-film-properties/thin-film-thicknes>

Chapitre1 : Présentation de la cellule solaire conventionnelle

structures de première génération et de deuxième génération. Ces entités se composent toujours de silicium, mais sur une épaisseur d'environ 1 μm seulement.²²



Figure10 : calculatrice solaire.

- b) Les cellules CIGS : Les cellules CIGS utilisent, comme les technologies au silicium ou au tellure de cadmium, le principe de la jonction p-n. Elles se démarquent cependant des autres pour deux raisons : elles ne possèdent ni silicium, ni élément toxique comme le cadmium (ou alors en infime quantité).²³ Aucun souci environnemental ou sanitaire n'est donc à craindre. Le semi-conducteur employé présente par ailleurs l'un des meilleurs coefficients d'absorption toutes cellules

²² « Cellule au silicium amorphe — Solarpedia », consulté le 9 juin 2018, http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Cellule_au_silicium_amorphe.

²³ Rama Goudiaby, « les cellules photovoltaïques type CIGS », 04:03:30 UTC, <https://fr.slideshare.net/ramagoudiaby39/expose-cigs>.

confondues (le record étant détenu par le silicium amorphe).²⁴



Figure11 : cellules photovoltaïques au CIGS

Le marché mondial du photovoltaïque CIGS a fortement augmenté ces dix dernières années. La production mondiale de ces cellules a été estimée à 450 MW en 2011.²⁵

²⁴ « CIGS Solar Cells, Simplified », consulté le 9 juin 2018, <https://www.solarpowerworldonline.com/2014/01/cigs-solar-cells-simplified/>.

²⁵ Rongrong Chen et al., « Efficiency Enhancement of Cu₂ZnSnS₄ Solar Cells via Surface Treatment Engineering », *Royal Society Open Science* 5, n° 1 (1 janvier 2018): 171163, <https://doi.org/10.1098/rsos.171163>.

c) La technologie liée au CdTe :

Le tellure de cadmium est employé en tant que semi-conducteur dopé p. Un autre matériau est donc requis pour réaliser la jonction p-n, à savoir du sulfure de cadmium dopé n (CdS).²⁶ Une telle union entre deux semi-conducteurs différents est appelée hétérojonction.



Figure 12 : La centrale solaire de La Narbonnaise (Aude) est équipée de 95.000 panneaux solaires au CdTe. Elle a été inaugurée le 18 décembre 2008. © H. Hôte (Agence Caméléon), EDF EN

²⁶ « CIGS Solar Cells, Simplified ».

L'emploi du tellure de cadmium procure plusieurs avantages aux cellules. Seuls 1 à 8 μm de CdTe suffisent pour absorber une grande quantité de lumière, y compris lorsqu'elle vient à manquer, comme à l'aube, au crépuscule ou par temps couvert. Les panneaux solaires rigides se comportent également mieux que les autres lorsque leur température monte, ce qui survient aux plus chaudes heures de la journée.²⁷ Ils ne perdent que 3 % de leur puissance par tranche de 10 °C supplémentaires, contre 5 % pour les cellules cristallines (chiffres de First Solar).

➤ 3ème génération :

a) La cellule CZTS :

Une cellule solaire sans élément rare. 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, silicium, terres rares ou plastiques sont employés, mais chaque technologie a des atouts et des faiblesses dans ce domaine prometteur.²⁸ De nouvelles cellules sont déjà en cours de développement en prévision de la pénurie probable d'indium. Cependant, remplacer les cellules au CIGS représente un véritable défi tant cet absorbant est efficace. Une alternative exploitant le principe de la jonction p-n se démarque néanmoins depuis la fin des années 2000 : la cellule CZTS. Elle possède des propriétés optiques et électroniques similaires à celle au CIGS, tout en ayant l'avantage d'être composée d'éléments abondants (à l'inverse du tellure ou de l'indium) et non toxiques pour la santé ou l'environnement (le cadmium peut être banni). Par ailleurs, ses constituants de base seraient cinq fois moins coûteux que ceux de la filière CIGS.²⁹

b) Les Cellules organique :

Les cellules photovoltaïques de première génération ou de deuxième génération précédemment présentées sont toutes composées d'éléments inorganiques, ce qui les rend durables, stables et surtout robustes.

²⁷ cdtpv, « CdTe Solar Cells », 08:10:09 UTC, <https://www.slideshare.net/cdtpv/cdte-solar-cells>.

²⁸ « CZTS Thin Film Solar Cells », consulté le 9 juin 2018, <http://www.ucl.ac.uk/institute-for-materials-discovery/research/clean-energy/czts-thin-film-solar-cells>.

²⁹ « CIGS : une cellule photovoltaïque sans élément toxique | Dossier », consulté le 9 juin 2018, <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/11/>.

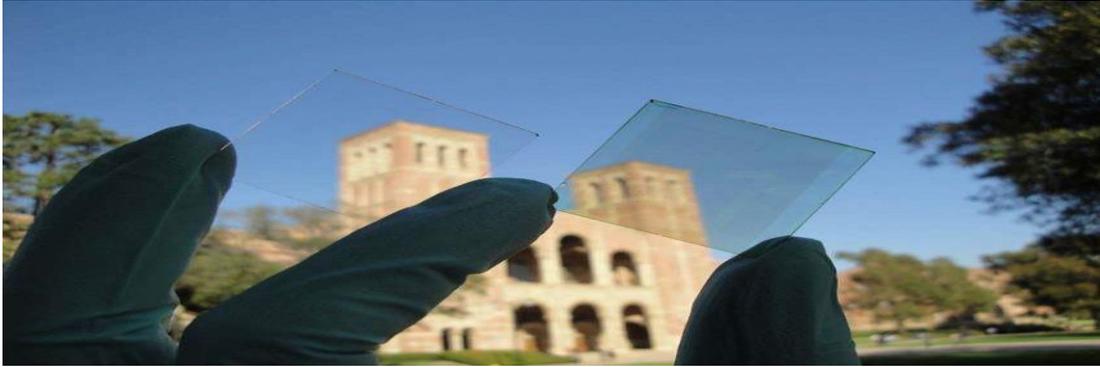


Figure13 : le carré de droite représente une cellule photovoltaïque organique très fine et transparente incluse dans une vitre.

Certaines entités de troisième génération ne partagent pas toutes ces caractéristiques, mais cela ne les rend pas inintéressantes pour autant, car elles disposent d'autres avantages qu'il peut être utile d'exploiter. C'est particulièrement vrai pour les cellules solaires organiques (OPV), car elles sont partiellement ou totalement faites de plastique.³⁰

Ces structures sont peu onéreuses, tout en étant faciles à produire et à manipuler. Elles sont par ailleurs dégradables, ce qui autorise leur intégration dans des objets jetables. Il s'agit donc d'une technologie propre. Leur légèreté (moins d'un gramme par mètre carré pour certaines) et leur souplesse permettent également leur installation dans des lieux uniques, par exemple à l'intérieur de vitres, surtout lorsqu'elles font moins d'un millimètre d'épaisseur.³¹

Un dernier détail distingue les cellules organiques des inorganiques : la couleur. Des pigments peuvent être utilisés pour les teindre en rouge, vert, rose ou encore violet (la liste n'est pas exhaustive).³²

³⁰« Memoire Online - Etude des paramètres influençant les performances des cellules solaires sensibilisées par colorant - Hichem et Moussaab MAMMAR et BELARBI », consulté le 9 juin 2018, https://www.memoireonline.com/05/12/5856/m_Etude-des-parametres-influenant-les-performances-des-cellules-solaires-sensibilisees-par-coloran6.html.

³¹Futura, « Cellules solaires organiques : bientôt un développement industriel ? », Futura, consulté le 9 juin 2018, <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-cellules-solaires-organiques-bientot-developpement-industriel-53177/>.

³²« Cellules Photovoltaïques Organiques : de la molécule aux composants », IRAMIS, consulté le 9 juin 2018, http://iramis.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=1684.

c) Les cellules photovoltaïques à concentration :

Dans un panneau solaire, les cellules photovoltaïques sont ce qu'il y a de plus onéreux. Des solutions ont donc été recherchées pour réduire leur nombre. L'une d'entre elles consiste à concentrer 500 à 1.000 fois la lumière solaire sur des cellules à multi-jonction (elles ont des rendements de 30 à 40 %), grâce à des miroirs paraboliques ou des lentilles de Fresnel.³³

Les cellules à multi-jonction s'obtiennent en empilant plusieurs entités photovoltaïques différentes les unes sur les autres, ce qui permet de convertir une plus grande partie du spectre lumineux (ondes courtes, ondes moyennes, rayonnement infrarouge). Ces cellules sont couramment exploitées dans l'industrie spatiale, mais pas par les particuliers, tant elles sont coûteuses.³⁴

Cependant, cette technologie n'est efficace qu'à une seule condition : les panneaux doivent suivre la course du Soleil. En effet, le rayon lumineux concentré doit en permanence être axé sur la cellule si l'on souhaite générer un courant.³⁵

Dans un panneau solaire, les cellules photovoltaïques sont ce qu'il y a de plus onéreux. Des solutions ont donc été recherchées pour réduire leur nombre. L'une d'entre elles consiste à concentrer 500 à 1.000 fois la lumière solaire sur des cellules à multi-jonction (elles ont des rendements de 30 à 40 %), grâce à des miroirs paraboliques ou des lentilles de Fresnel.³⁶

Les cellules à multi-jonction s'obtiennent en empilant plusieurs entités photovoltaïques différentes les unes sur les autres, ce qui permet de convertir une plus grande partie du spectre lumineux (ondes courtes, ondes moyennes, rayonnement infrarouge). Ces cellules sont couramment exploitées dans l'industrie spatiale, mais pas par les particuliers, tant elles sont coûteuses.³⁷

³³ « Photovoltaïques Concentrés - Zytech Solar », *Zytech Solar - Energía Solar FV* (blog), consulté le 9 juin 2018, <http://fr.zytechsolar.com/photovoltaiques-concentres/>.

³⁴ Thevenot 3 août 2013 à 20 h 26 min, « La centrale solaire photovoltaïque à concentration », *Electricité et énergie* (blog), 7 mars 2013, <http://www.electricite-et-energie.com/la-centrale-solaire-photovoltaique-a-concentration-a-concentration/>.

³⁵ « Heliotrop - Systèmes solaires à concentration innovants », consulté le 9 juin 2018, <http://www.heliotrop.fr/>.

³⁶ « Prof. Michael Graetzel | LPI », consulté le 9 juin 2018, <https://lpi.epfl.ch/graetzel>.

³⁷ Zakaria Yameogo, « Les Photopiles Organiques: Photopile de Grätzel », consulté le 9 juin 2018, http://www.academia.edu/31819271/Les_photopiles_organiques_Photopile_de_Gr%C3%A4tzel.

Cependant, cette technologie n'est efficace qu'à une seule condition : les panneaux doivent suivre la course du Soleil. En effet, le rayon lumineux concentré doit en permanence être axé sur la cellule si l'on souhaite générer un courant.³⁸

d) Les cellules à pigments photosensibles :

Grâce aux travaux de Michael Grätzel³⁹, les cellules à pigments photosensibles ont vu le jour en 1991 à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Elles s'inspirent directement de la photosynthèse pratiquée par les végétaux.⁴⁰

Ces cellules se composent d'une surface conductrice transparente (par exemple en oxyde d'étain dopé au fluor) sur laquelle est déposé un matériau semi-conducteur comme le dioxyde de titane (TiO₂). Des pigments, telle la poly pyridine au ruthénium, sont insérés à l'intérieur de cette dernière couche. Leur fonction est comparable à celle de la chlorophylle des végétaux. Le dispositif est complété par une couche d'électrolytes (une solution iodure-tri iodure), puis par la cathode qui forme la paroi inférieure de la cellule.⁴¹ La lumière solaire provoque l'éjection d'un électron hors du pigment. Il diffuse ensuite dans le semi-conducteur, jusqu'à rejoindre l'anode. Ce mouvement n'est possible que pour une seule raison : l'électrolyte donne des électrons au pigment qui vient d'en perdre, avant que la charge négative excitée puisse se recombiner. L'accumulation des électrons dans la partie haute de la cellule cause alors l'apparition d'une différence de potentiel.

En mai 2013, un rendement record de 15 % a été atteint en laboratoire par Michaël Grätzel à l'EPFL. Quant aux cellules commerciales, elles ne dépassent pas 5 %, mais elles ont cependant un important défaut : elles vieillissent très rapidement.

³⁸ « Le solaire s'impose comme l'énergie du futur », Réseau Sortir du nucléaire, consulté le 9 juin 2018, <http://www.sortirdunucleaire.org/Le-solaire-s-impose-comme-l>.

³⁹ « Le « Nobel suisse » pour Michael Grätzel de l'EPFL », *Le Temps*, 30 août 2013, <https://www.letemps.ch/sciences/nobel-suisse-michael-gratzel-lepfl>.

⁴⁰ « Les boîtes quantiques et l'amélioration de l'efficacité des panneaux solaires - Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France aux Etats-Unis », consulté le 9 juin 2018, <https://www.france-science.org/Les-boites-quantiques-et-l.html>.

⁴¹ Jihene Zribi, « Croissance et caractérisation des boîtes quantiques InAs/GaAs pour des applications photovoltaïques », 2014, <http://hdl.handle.net/11143/5927>.

e) Les cellules solaires à boîtes quantiques :

Le domaine des nanotechnologies n'a pas encore été abordé dans cette étude. Il est pourtant prometteur, bien que toujours expérimental. Les boîtes quantiques sont des nano-cristaux semi-conducteurs mesurant moins de 10 nm. Ces boîtes présentent deux caractéristiques importantes : elles captent la lumière à différentes longueurs d'onde, et sont faciles à produire à moindre coût.⁴²

Les cellules à boîtes quantiques se composent d'une plaque de verre qui est recouverte par de l'oxyde d'étain dopé au fluor. Il sert de conducteur transparent. Un matériau semi-conducteur, comme le dioxyde de titane ou l'oxyde de zinc, est alors posé sur cette couche, avant d'être lui-même recouvert par les boîtes quantiques. Le tout est finalement fixé par un oxyde de molybdène, de l'or et de l'argent. L'épaisseur totale du dispositif est d'environ 1,5 µm.

Un rendement record de 7 % est actuellement détenu par des chercheurs de l'université de Toronto, au Canada. Cependant, il serait théoriquement possible d'atteindre des valeurs de 60 à 83 %.⁴³

➤ **Comparaison entre le rendement de chaque type énergétique :**

Type de cellule	Rendement des cellules PV			Domaines d'applications
	Théorique	en laboratoire	disponibles	
Si mono (silicium monocristallin) ⁴⁴	27,0 %	24,7 %	14,0-16,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)

⁴²« Silicium monocristallin, une technologie photovoltaïque Le silicium monocristallin entre dans la composition de certains modules photovoltaïques. Le silicium monocristallin a ouvert la voie à de nouveaux matériaux | Solareo », consulté le 8 mai 2018, <http://www.solareo.fr/silicium-monocristallin-technologie-photovoltaïque/>.

⁴³« Quelle est la différence entre polycristallin monocristallin et amorphe cellule solaire à couche mince? - Solar Water Heater ».

⁴⁴« Une cellule solaire en silicium amorphe et souple : a-Si | Dossier », consulté le 8 mai 2018, <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/9/>.

Chapitre1 : Présentation de la cellule solaire conventionnelle

Si poly (silicium poly cristallin)	27,0 %	19,8 %	12,0-14,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Si a (silicium amorphe)	25,0 %	13,0 %	6,0-8,0 %	Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée (calculatrice montres...) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
GaAs	29,0 %	27,5 %	18,0-20,0 %	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIGS	27,5 %	18,2 %	10,0-12,0 %	Appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
CdTe	28,5 %	16,0 %	8,0 %	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)
Si ruban (silicium en ruban)	27,0 %	27,0 %	9,0-11,0 %	Module non spécifique

Tableau 2 - Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

Conclusion :

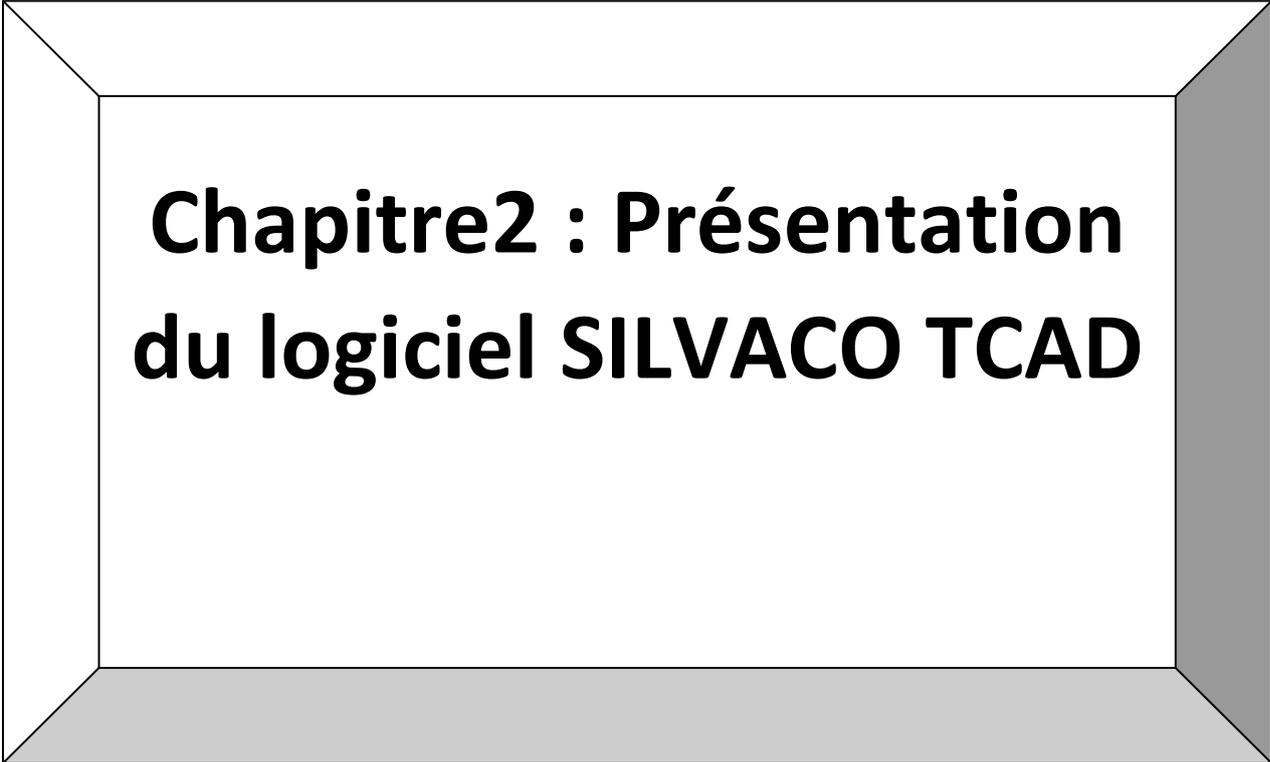
Dans le cas de cellules photovoltaïques conventionnelles, la jonction p-n est placée sur la face avant de la cellule et les contacts à l'émetteur et au Substrat sont sur les faces opposées.

Ce genre de structure est simple et l'industrie les utilise depuis longtemps.

Par contre, elle présente les inconvénients suivants :

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

Ces problèmes sont en partie lèvés dans la cellule photovoltaïque d'émetteur à contacts arrière.



Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

I. Introduction :

Quel que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour prédire son meilleur rendement avant de passer à la phase technologique. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts et le confinement optique. Les valeurs optimales des paramètres dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau du substrat (durée de vie, mobilité), de la qualité des contacts ohmiques, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc.

L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximal.

La simulation numérique est couramment utilisée pour l'optimisation des systèmes et composants optoélectroniques.

Pour les cellules photovoltaïques elle présente les avantages suivants :

- Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules des paramètres différents. Ce qui est très coûteux.
- Elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres).
- On peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants (par exemple : mobilité, longueur de diffusion et durée de vie).

Elle permet donc un gain de temps, de matériau et par conséquent d'argent.

Dans le cadre de notre travail nous avons utilisé la simulation comme outil de prédiction en utilisant le logiciel SILVACO.

Celui-ci nous permet de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires p-type EWT.

Par ailleurs il nous permet de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximal.

Dans ce type de structure, la difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres qui sont en relation avec le rendement.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

En effet, la cellule solaire à contact arrière est caractérisée par les paramètres suivants :

- les dimensions géométriques des contacts et des régions diffusées (largeur de l'émetteur et du BSF, espacement entre l'émetteur et le BSF).
 - L'épaisseur du substrat.
 - Les niveaux de dopage (substrat, émetteur, BSF, FSF ou émetteur flottant).
- La profondeur du dopage pour les régions diffusées (émetteur, BSF, FSF ou Emetteur flottant) ;
 - Les paramètres qui interviennent dans les modèles de recombinaison (taux de recombinaison pour les faces avant et arrière, durée de vie des porteurs minoritaires) ;
 - Les coefficients de réflexion pour les faces avant et arrière.

Par conséquent, pour décrire la cellule solaire a contact arrière, 15 paramètres environ sont nécessaires.

Les logiciels les plus utilisés pour la simulation numérique des cellules photovoltaïques sont le PC1D et Silvaco.

Nous avons choisi le SILVACO dans notre travail pour sa disponibilité dans notre unité de recherche, pour sa force et sa diversité de calcul et surtout pour son aptitude de nous offrir une modélisation a trois dimensions.

II. Présentation du logiciel SILVACO :

Le Silvaco est un logiciel de simulation des dispositifs électronique il appartient au célèbre compagnie américaine Silvaco-Tcad international, il est constitué d'une gamme d'outil de simulation formant ce qu'on appelle la VWF (virtuelle wafer fabrication).¹

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

1. La VWF: (virtual wafer Fab)

Parmi les différents logiciels qu'il forme la VWF on note les deux fameux les plus

Utilise ATHENA et ATLAS, ces outils sont divis en deux catégories principales.

- Outil principal
- Outil auxiliaire

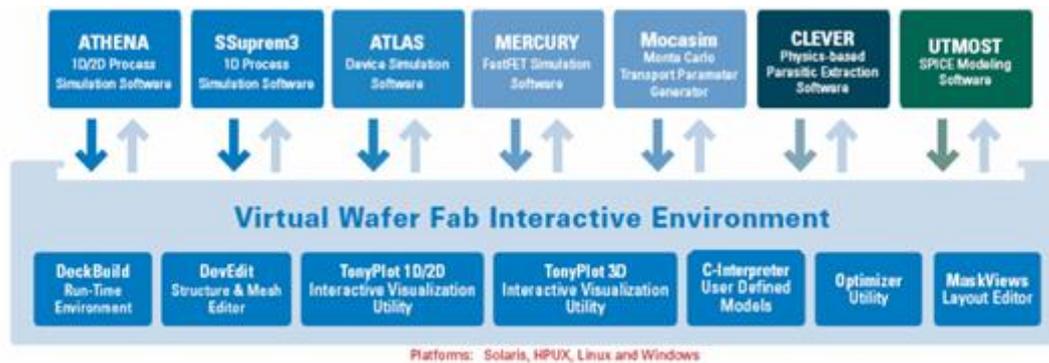


Figure14 : la virtuelle wafer fabrication.

2. ATHENA

C'est un logiciel de simulation y compris dans le silvaco et sert a la fabrication

virtuelle des différents constituants d'un dispositif électronique, il traite la simulation

Comme une série d'événements consécutifs, et simule généralement en simultanéité

Avec Atlas.

3. ATLAS :

L'outil de simulation Atlas qui est utilisé pour notre simulation est un simulateur physique de dispositifs semi-conducteur 2D ou 3D qui permet de simuler le comportement électrique de structures spécifiées des dispositifs de semi-conducteur .En plus du comportement électrique ,il fournit des information sur la distribution interne de variables tels que les concentration des porteur , les lignes de courant , le champs électrique ou le potentiel,...etc. autant de données importante pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de poisson et les équation de continuité des électrons

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

et des trous en deux dimensions en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme.

Ce simulateur est composé de deux parties :

- une partie traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...).
- une partie formée de modèles physique de composants semi-conducteur (modèles de recombinaisons, démobilisés, d'ionisation par impact...).

ATLAS a été conçu de façon à pouvoir utiliser d'autres outils qui facilitent son utilisation .Ces outils sont les suivants :

a. DECKBUILD :

Environnement de développement et d'exécution pour tous les simulateurs SILVACO.DECKBUILD offre une aide et une prise en charge qui permet d'éviter l'apprentissage d'une syntaxe de commande généralement très complexe.il permet aussi une exécution automatique et très pratique de programmes et des sauvegardes systématiques des étapes intermédiaires d'exécution .La structure et son maillage peut également être défini dans Deckbuild.

b. TONYPLOT :

Environnement ou sont visualises résultats des simulations (structure du composant, distribution de grandeurs divers dans celui-ci, caractéristiques électriques...).

III.-Entrées et sorties d'ATLAS :

La figure 1 montre les entrées et sorties d'ATLAS. La plupart des simulations ATLAS utiliser deux fichier texte qui contient les commode a exécuté .le seconde est un fichier défini la structure qui sera simulé. Atlas produit trois types de fichier défini la structure qui sera simulé.

ATLAS produit trois types de fichiers de sortie. Le premier fichier résume. L'état d'avancement, les erreurs et les messages d'avertissement de la simulation.la deuxième est le fichier qui enregistre tous les valeurs maximales des tensions et des courants .le troisième est le fichier solution qui enregistre les données 2D et 3D .

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

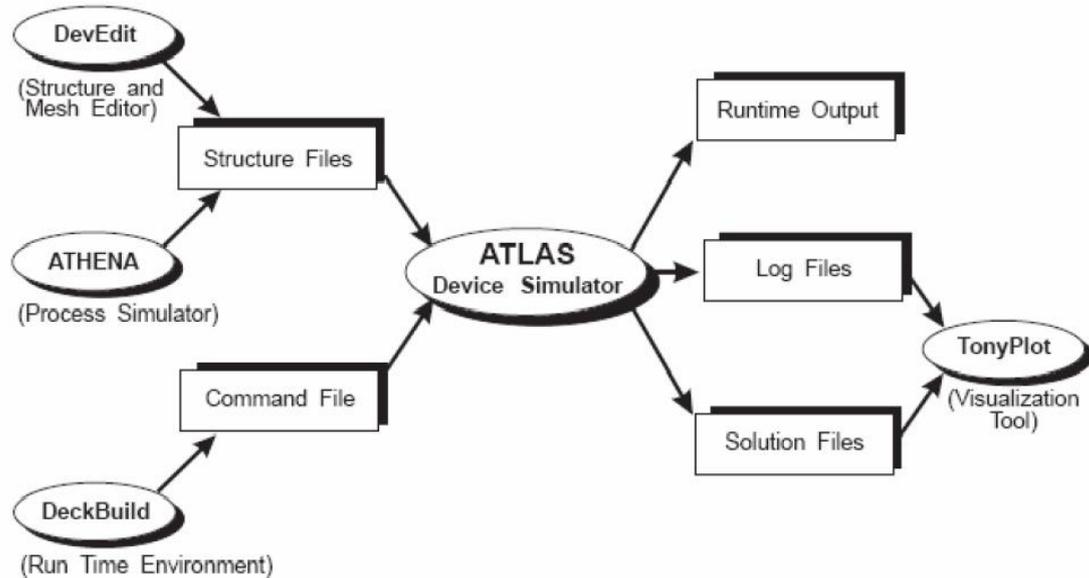


Figure15 : Entrées et sorties d'ATLAS.

1) -Définition du programme de simulation dans deckbuild :

La méthode utilisée pour mener à bien la modélisation à partir du code de la simulation comporte cinq étapes principales qui sont regroupées dans la figure2.

<i>Group</i>		<i>Statements</i>
1. Structure Specification	_____	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	_____	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	_____	METHOD
4. Solution Specification	_____	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	_____	EXTRACT TONYPLOT

Figure16: les commandes d'Atlas.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

2) Construction de la structure :

Il s'agit de définir la structure la plus réaliste .la construction de la structure consiste en quatre étapes : définition du maillage, définition des régions, définition des électrodes et définition des dopages.

A. -Définition du maillage :

Pour procéder à la simulation numérique, il est nécessaire de définir le maillage de la structure (figure 3).

Ce logiciel (ATLAS-SILVACO) permet de définir les dimensions de la structure simulée, les paramètres des zones dopées (l'emplacement, le type, le niveau et le profil de dopage), de placer les contacts électriques sur la structure et de définir le maillage. Le maillage divise la structure simulée en petites cellules pour pouvoir résoudre les équations de poisson numériquement.

Pour assurer une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible .Malheureusement, si le maillage est très fin on augmente le nombre d'éléments à calculer et par conséquent temps de calcul est très élevé .il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le temps et la précision de calcul. Pour

Cela on affine le maillage seulement au niveau des zones sensibles.

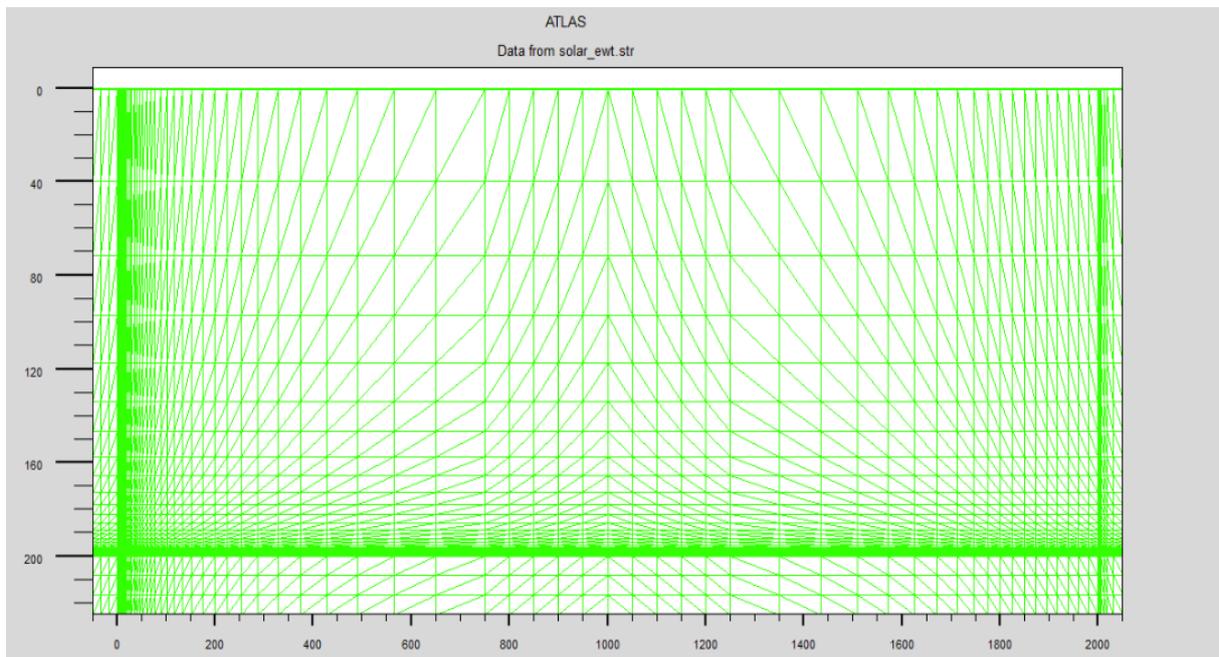


Figure17: représentation du maillage.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

La forme générale pour définir le maillage est donnée par :

- pour le plan X :

X.MESH LOCATION =<VALUE> SPACING=<VALUE>

Dans le cas de notre cellule :

```
x.mesh loc=$Ag1x spac=20

x.mesh loc=0 spac=20
x.mesh loc=$emitter1x spac=0.125
x.mesh loc=$Ag3x spac=25
x.mesh loc=$emitter2x spac=100
x.mesh loc=$bsf1x spac=50
x.mesh loc=$A11x spac=50
x.mesh loc=$A12x spac=50
x.mesh loc=$bsf2x spac=50
x.mesh loc=$emitter3x spac=100
x.mesh loc=$Ag4x spac=25
x.mesh loc=$emitter4x spac=19.9

x.mesh loc=2000 spac=0.125
x.mesh loc=$Ag6x spac=20
```

Figure18 : représentante la déclaration du maillage suivant l'axe des X

- Pour le plan y :

Y.MESH LOCATION =<VALUE> SPACING=<VALUE>

Dans le cas de notre cellule :

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

```
y.mesh loc=$sio2y spac=0.02
y.mesh loc=$SiNy spac=0.04
y.mesh loc=0 spac=0.1
y.mesh loc=$emitterly spac=39.5
y.mesh loc=$bsfy spac=0.5
y.mesh loc=$emitter2y spac=0.1
y.mesh loc=$thickness spac=7.5
y.mesh loc=$AgAl spac=7.5
```

Figure19: déclaration du maillage suivant l'axe des y

B. Définition de la région :

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions. Dans cette partie nous définissons les régions (figure4).

- région1 : le contact : il contient une seul région

```
###vacuum
region num=1 material=vacuum x.min=$Ag3x x.max=$Al1x y.min=$thickness y.max=$AgAl
region num=1 material=vacuum x.min=$Al1x x.max=$Ag4x y.min=$thickness y.max=$AgAl
```

Figure20: définition de la region1.

- region2 : la couche antireflet

Elle se compose de 2 région, une région qui se compose de nitrite et l'autre on oxyde(.

```
###Anti-reflexion coating
region num=2 material=nitride x.min=$Ag1x x.max=$Ag6x y.min=$SiNy y.max=0
region num=8 material=oxide x.min=$Ag1x x.max=$Ag6x y.min=$sio2y y.max=$SiNy
```

Figure 21: la définition de la région 2.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

➤ Region3 :l'émetteur :

```
###emitter

region num=3 material=silicon x.min=0 x.max=2000 y.min=0 y.max=$emitterly
region num=3 material=silicon x.min=0 x.max=$emitterlx y.min=0 y.max=$thickness
region num=3 material=silicon x.min=0 x.max=$emitter2x y.min=$emitter2y y.max=$thickness
region num=3 material=silicon x.min=$emitter3x x.max=2000 y.min=$emitter2y y.max=$thickness
region num=3 material=silicon x.min=$emitter4x x.max=2000 y.min=0 y.max=$thickness
```

Figure 22: définition de la région 3

➤ Region4 :la base :

```
###base

region num=4 material=silicon x.min=$emitterlx x.max=$emitter4x y.min=$emitterly y.max=$bsfy
region num=4 material=silicon x.min=$emitterlx x.max=$bsflx y.min=$bsfy y.max=$emitter2y
region num=4 material=silicon x.min=$bsf2x x.max=$emitter4x y.min=$bsfy y.max=$emitter2y
region num=4 material=silicon x.min=$emitter2x x.max=$bsflx y.min=$emitter2y y.max=$thickness
region num=4 material=silicon x.min=$bsf2x x.max=$emitter3x y.min=$emitter2y y.max=$thickness
```

Figure 23: la définition de la région 4.

➤ Region5 :bsf

```
###bsf

region num=5 material=silicon x.min=$bsflx x.max=$bsf2x y.min=$bsfy y.max=$thickness
###doping bsf
```

Figure 24: la définition de la région 5.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

➤ **Region6 :l'électrode : se compose d'élément la cathode et l'anode**

```
#electrodes
region num=1 material=vacuum x.min=$Ag1x x.max=0 y.min=0 y.max=$thickness
region num=6 material=silver x.min=$Ag1x x.max=$Ag3x y.min=$thickness y.max=$AgAl
region num=1 material=vacuum x.min=2000 x.max=$Ag6x y.min=0 y.max=$thickness
region num=6 material=silver x.min=$Ag4x x.max=$Ag6x y.min=$thickness y.max=$AgAl
region num=7 material=aluminum x.min=$Al1x x.max=$Al2x y.min=$thickness y.max=$AgAl
. . . .
```

Figure 25: la définition de la région 6.

- Ainsi que les différentes dimensions sont définies en micromètre.

La forme générale pour définir les régions est :

REGION NUMBER=<INTEGER><material_type><position parameters>.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

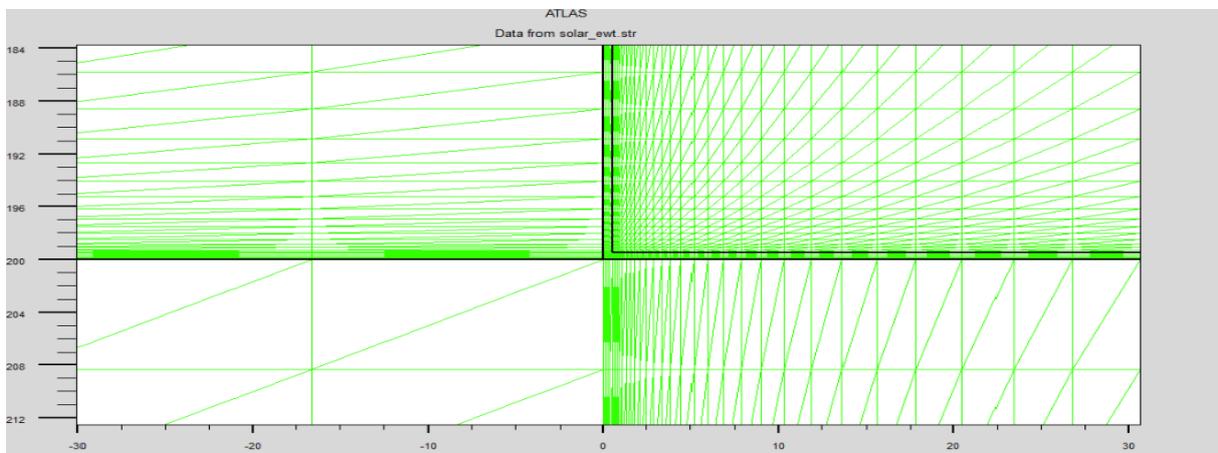
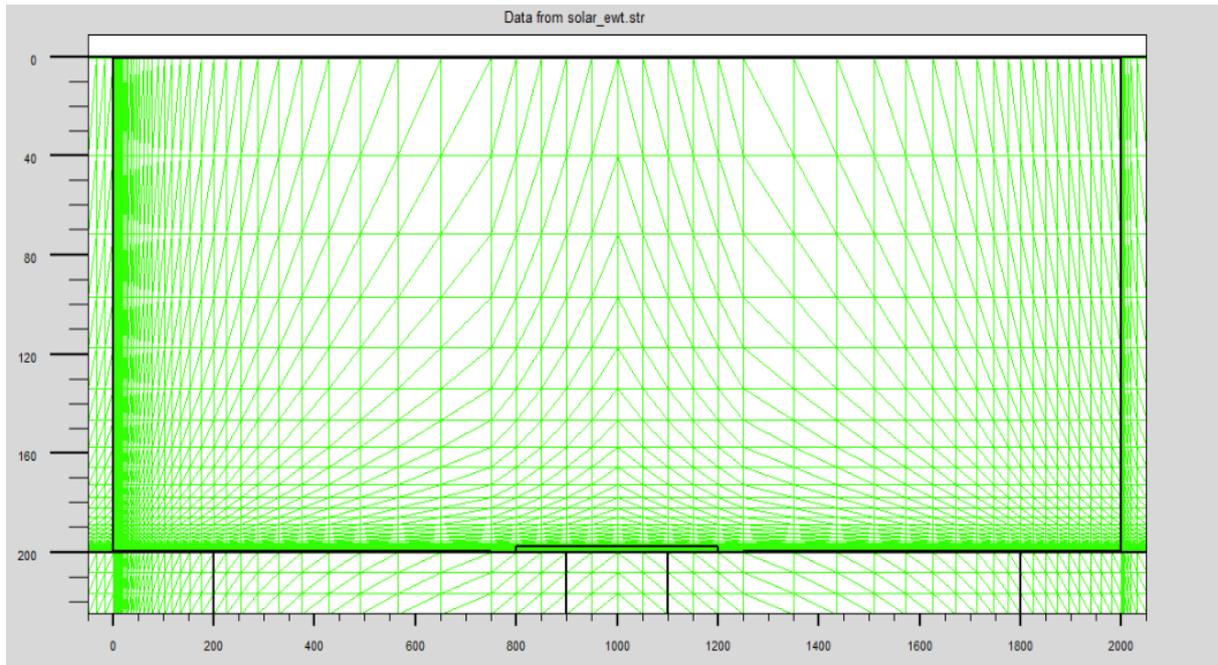


Figure26 : représentation des régions.

Il y a 6 régions qui sont définies dans la figure 4. Les limites de chaque région sont identifiées par les axes x et y.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

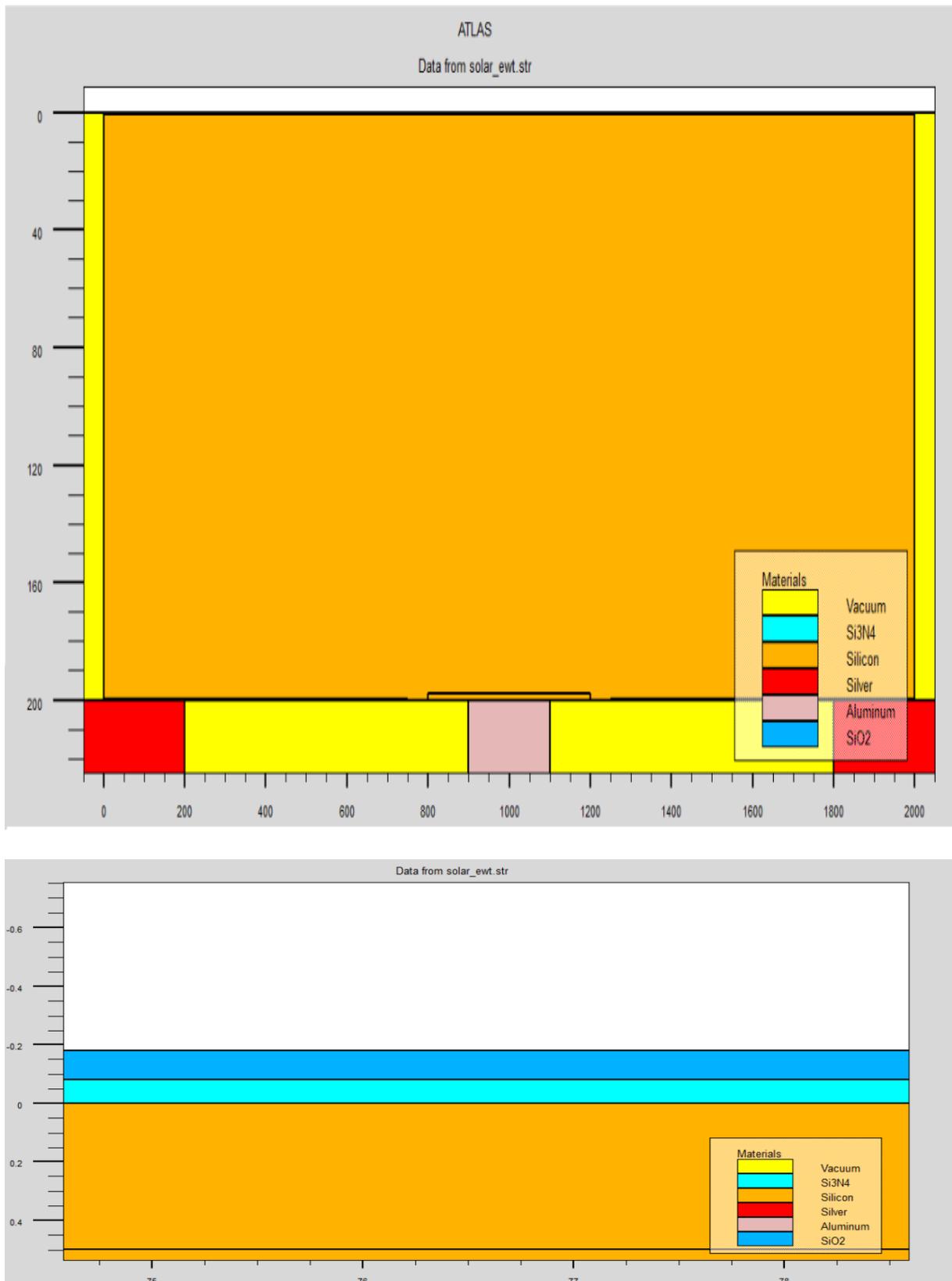


Figure27: représentation des matériaux.

La figure5 représente le type de matériau pour chaque région, ainsi que les couleurs pour identifier le matériau.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

La partie agrandie représente le matériau utilisé pour la couche anti reflet.

C. -Définition des électrodes :

La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode.

La formule générale pour définir les électrodes est la suivante :

« ELECTRODE NAME=<electrodename><position_parameters>

- la cathode.
- la cathode.

```
#cathode  
  
#####  
  
electrode name=cathode material=silver x.min=$Ag1x x.max=$Ag3x y.min=$thickness y.max=$AgAl  
  
electrode name=cathode material=silver x.min=$Ag4x x.max=$Ag6x y.min=$thickness y.max=$AgAl
```

Figure 28: représente la définition des électrodes (la cathode)

- l'anode.

```
#anode  
  
#####  
  
electrode name=anode material=aluminum x.min=$Al1x x.max=$Al2x y.min=$thickness y.max=$AgAl
```

Figure 29 : représente la définition des électrodes (l'anode)

Dans ce cas la cathode et l'anode est en bas de la cellule.

La figure6 représente les électrodes qui sont désignée par l'anode et la cathode.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

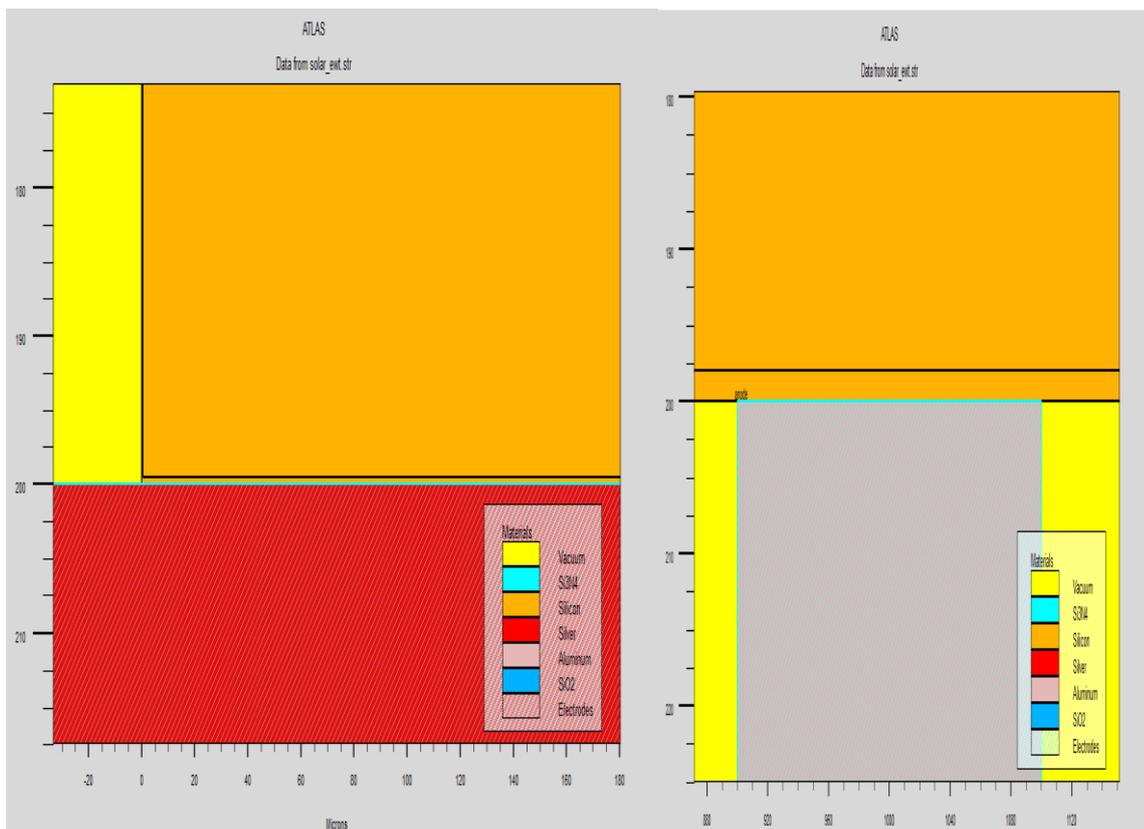
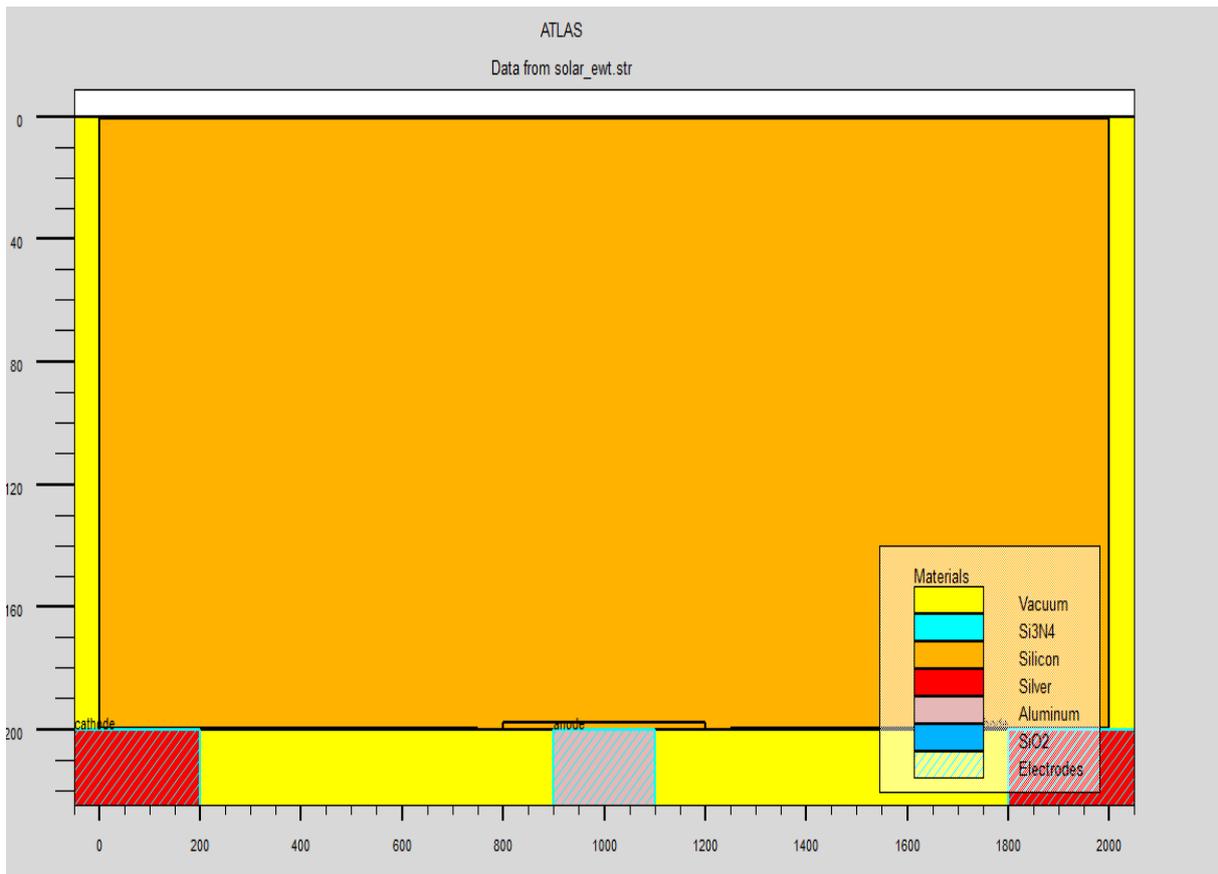


Figure 30: représentation des électrodes.(cathode(a gauche) ;anode(a droite)).

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

D. -Définition des dopages :

Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage (figure7).la formule générale dans ATLAS est donnée par :

« Doping <distribution type><dopant_type><position parametrs>

Le dopage peut être de type n ou p aussi la distribution peut être uniforme ou gaussien .les paramètre définissant la distribution sont indiquées dans la déclaration doping. Eaux exemples sont présentées :

« DOPING UNIFORM CONCENTRATION=1^E20 N.TYPE REGION=1.

DOPPING GAUSSIAN CONCENTRATION=5^E16 CHARACTERISTIQUE=0.05 P.TYPE
/ X.LEFT=0.0

X.RIGHT=1.0 PEAK=0.1

- Dans le premier exemple la région numéro 1 :

Correspondre à un dopage de type n avec une concentration uniforme de 10^{20} cm^{-3} .

```
###doping emitter
```

```
doping erfc n.type peak=0 junction=$emitterly concentration=1e20 characteristic=0.19 x.min=0 x.max=2000 dir=y  
doping erfc n.type peak=0 junction=$emitterlx concentration=1e20 characteristic=0.24 y.min=0 y.max=$thickness dir=x  
doping erfc n.type peak=$thickness junction=$emitter2y concentration=1e20 characteristic=0.19 x.min=0 x.max=$emitter2x dir=y  
doping erfc n.type peak=$thickness junction=$emitter2y concentration=1e20 characteristic=0.19 x.min=$emitter3x x.max=2000 dir=y  
doping erfc n.type peak=2000 junction=0.5 concentration=1e20 characteristic=0.24 y.min=0 y.max=$thickness dir=x
```

Figure 31:définition du dopage de la région 1.

- Dans une autre région le dopage est gaussien de type p avec un maximum de concentration a 5^{16} cm^{-3} .

```
###doping base
```

```
doping uniform region=4 p.type conc=5e16
```

Figure 32:définition du dopage de la région 2.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

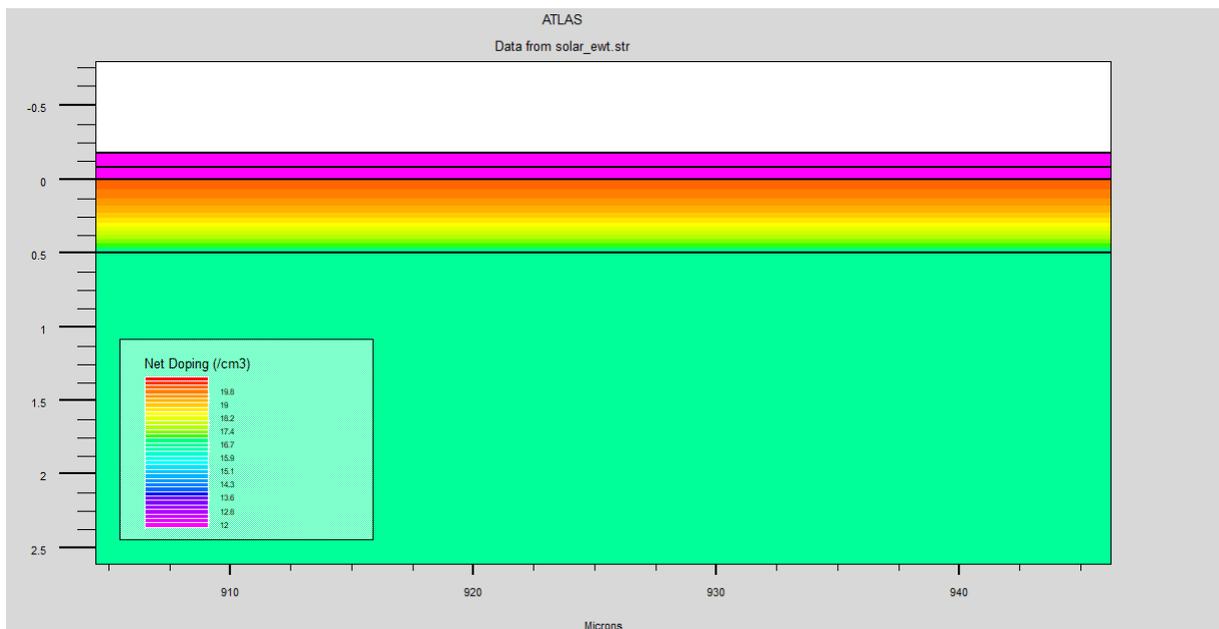
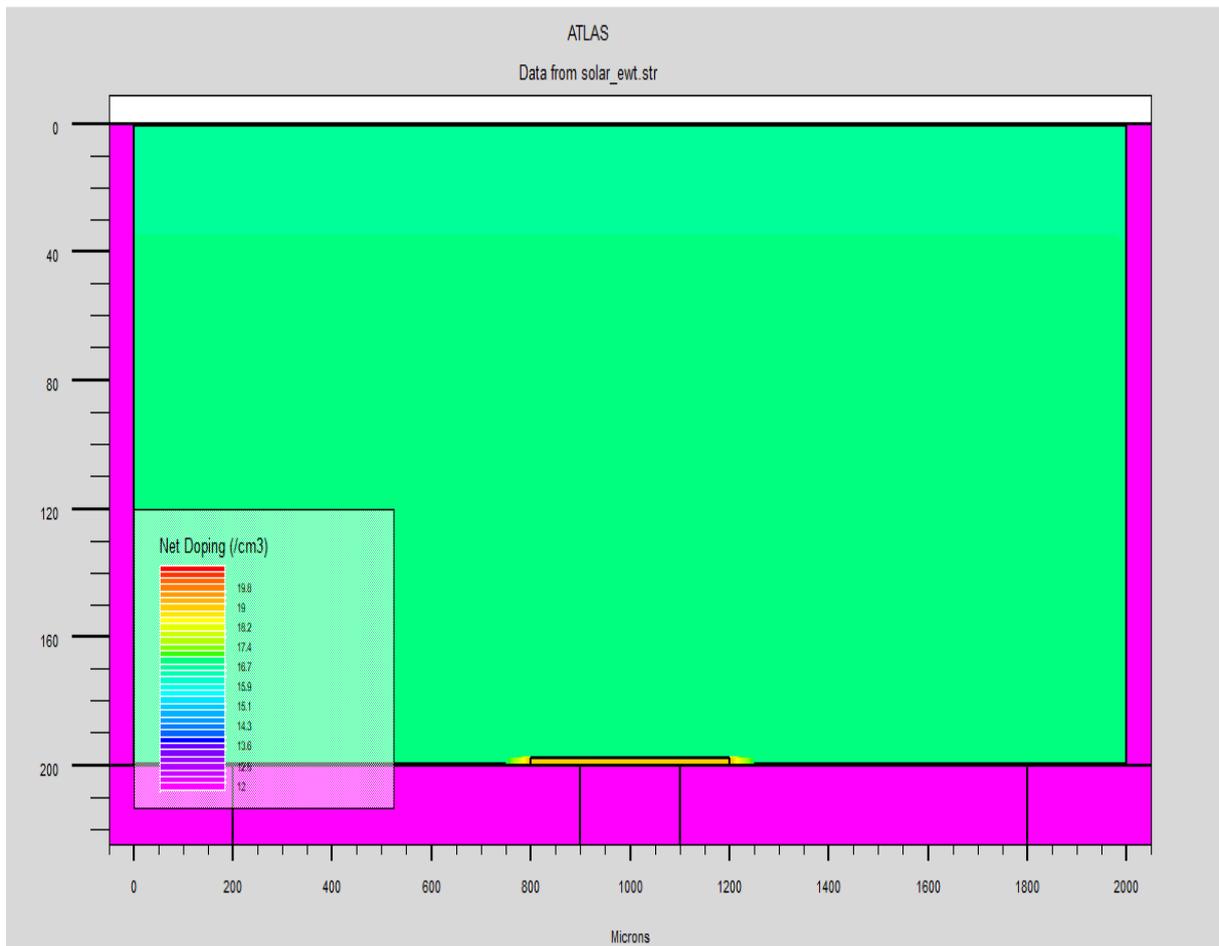


Figure33 : présentation du dopage.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

E. -Définitions de modèles et matériaux :

Après la construction de la structure il est nécessaire de préciser les modèles physique et de définir les matériaux. la spécification de modèles et matériaux comporte en quatre étapes qui sont :

- **Le matériau :**

La formule générale de déclaration est :

« MATERIAL <LOCALIZATION><Material_definition>.

Voici l'exemple de la déclaration de quelque matériau de la cellule étudié :

```
material region=3 index.file=c-Si_nk.txt
material region=4 index.file=c-Si_nk.txt
material region=5 index.file=c-Si_nk.txt
material region=6 index.file=ag_nk.txt
material region=7 index.file=al_nk.txt
# bulk life time

Material region=4 taun0=80.71e-6 taup0=80.71e-6
```

Figure 34:définition des paramètres des matériaux.

La section 20.26 : «<ATLAS user's manual>> offre une liste complète de tous les paramètres des matériaux qui sont disponibles.

a- Les modèles : Les modèles physiques des composants semi-conducteurs peuvent être classés en cinq catégories :

La mobilité, la recombinaison, statistique, ionisation par impact et tunneling.

MODELS < model flag > < general parameter > < model dependent / parameters >

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

Les paramètres pour ces modèles apparaissent sur de nombreuses déclarations : MODELS, IMPACT, MOBILITY et MATERIAL.

Tous les modèles sont précisés dans la déclaration MODELES, sauf le modèle d'impact d'ionisation. Impact ionisation est indiqué par la déclaration IMPACT.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

➤ Pour notre programme ; exemple :

```
Models srh conmob fldmob analytic auger
```

Figure 35:déclaration de model physique.

- CONMOB : la mobilité des porteurs dépendant de la concentration des impuretés
 - FLDMOB : la mobilité des porteurs dépendant la composante parallèle du champ électrique E_{\parallel}
 - Auger : La recombinaison d'Auger se produit à travers une transition à trois particules par laquelle un porteur mobile est capturé ou émis.
- **Contact :**

Le contact détermine les caractéristique de l'électrode.la syntaxe est donnée par :

Contact number =<n> / NAME=<ename>/ ALL

Le texte suivant est un exemple de déclaration d'un contact :

```
contact name=anode resistance=1e3  
contact name=cathode resistance=1e3
```

Figure 36:définition des contacte des électrodes.

- **Interface :**

Les frontière des semi-conducteurs ou des isolants sont déterminées par la déclaration INTERFACE.la formule générale de cette déclaration est :

INTERFACE [<paramètres>]

On prend notre programme comme exemple pour montre l'utilisation de la déclaration interface :

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

```
interface optical material=nitride ar.index=2.05 ar.thick=0.08 coating=1 layer=2 x.min=$Ag1x x.max=$Ag6x y.min=$Si1y y.max=0  
interface optical material=oxide ar.index=1.46 ar.thick=0.1 coating=1 layer=2 x.min=$Ag1x x.max=$Ag6x y.min=$sio2y y.max=$Si1y
```

Figure 37:déclaration de la technique numérique.

Les valeurs MIN et MAX déterminent les limites.

I. Analyse :

Une fois la solution sera trouvée pour un problème de dispositif à semi- conducteur, les informations peuvent être affichées graphiquement avec TONYPLOT.

En outre, les différents paramètres peuvent être extrait a partir la déclaration EXTRAIT.

Exemple : on a demandé d'afficher les résultats (Isc, Voc, Vmax, Imax ,Pmax ...)

```
extract name="ISC_[mA/cm^2]" y.val from curve(v."anode",i."cathode"*1e3) where x.val=0.0  
extract name="VOC_[V]" x.val from curve(v."anode",i."cathode"*1e3) where y.val=0.0  
extract name="Vmax_[V]" x.val from curve(v."anode",v."anode"*i."cathode") where y.val=max(v."anode"*i."cathode")  
extract name="Imax_[mA/cm^2]" x.val from curve(i."cathode"*1e3,v."anode"*i."cathode") where y.val=max(v."anode"*i."cathode")  
  
extract name="power" curve(v."anode", (v."anode"*i."cathode")) outfile="powerSi.dat"  
extract name="Pmax" max(curve(v."anode", (v."anode" * i."cathode" )))
```

Figure 38:exemple de la déclaration EXTRAIT.

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

Après la simulation les résultats doivent être affichés dans une fenêtre ;

Les résultats obtenus :

```
EXTRACT> init infile="IV-RCC_.log"
EXTRACT> extract name="IV" curve(v."anode",i."cathode") outfile="IVcurveSi.dat"
EXTRACT> #tonyplot IVcurveSi.dat
EXTRACT> extract name="ISC [mA/cm^2]" y.val from curve(v."anode",i."cathode"*1e3) where x.val=0
ISC [mA/cm^2]=33.8503
EXTRACT> extract name="VOC [V]" x.val from curve(v."anode",i."cathode"*1e3) where y.val=0
VOC [V]=0.663102
EXTRACT> extract name="Vmax [V]" x.val from curve(v."anode",v."anode"*i."cathode") where y.val=max(v."anode"*i."cathode")
Vmax [V]=0.57
EXTRACT> extract name="Imax [mA/cm^2]" x.val from curve(i."cathode"*1e3,v."anode"*i."cathode") where y.val=max(v."anode"*i."cathode")
Imax [mA/cm^2]=32.4723
EXTRACT> extract name="power" curve(v."anode", (v."anode"*i."cathode")) outfile="powerSi.dat"
EXTRACT> extract name="Pmax" max(curve(v."anode", (v."anode" * i."cathode" )))
Pmax=0.0185092
EXTRACT> #tonyplot powerSi.dat
EXTRACT> #tonyplot -overlay IVcurveSi.dat powerSi.dat
EXTRACT> extract name="FF" (0.57*32.4723)/(0.663102*33.8503)
FF=0.824603
EXTRACT> extract name="EFF [%]" 0.57*32.4723
EFF [%]=18.5092
EXTRACT>
```

Figure 39: les résultats obtenus avec silvaco.

II. Organigramme de simulation :

En vue d'intensifier la compréhension, à contribuer à développer davantage de part et d'autre et pour éviter toutes répétitions et confusion inutiles, l'organigramme de la Figure 8 permet de présenter le programme de simulation d'une cellule solaire qui contient des sections principales structurées.⁴⁵

⁴⁵<https://www.google.com/search?q=m%C3%A9moire+Mohammedi+mohamed+&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b-ab>

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

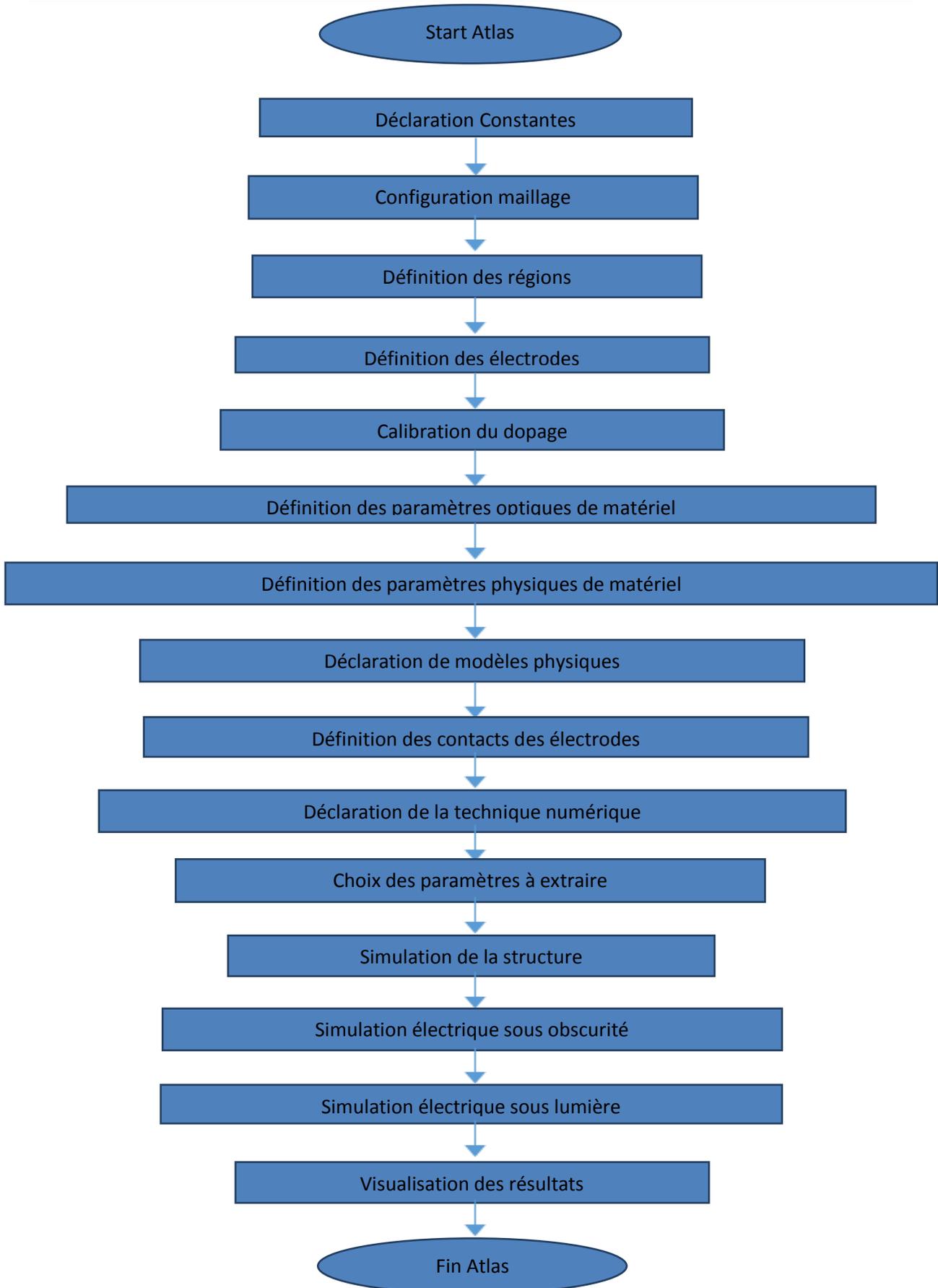


Figure40: Organigramme du programme de simulation

Chapitre2 : Présentation du logiciel SILVACO TCAD

❖ Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons développé la présentation du logiciel de simulation des caractéristiques électriques «Atlas» de la société SILVACO, que nous allons utiliser principalement pour modéliser et optimiser la cellule solaire a contact arriér EWT.

Un organigramme contenant les principales sections structurées du programme de simulation d'une cellule solaire est donné en fin de ce chapitre.

Chapitre3 :

**Présentation de la cellule d'émetteur a contacté
arrière (emitter wrap throught solar cells EWT).**

Chapitre 3 : Présentation de la cellule d'émetteur à contacté arrière (emitter wrap throught solar cells EWT).

I. introduction :

La situation énergétique mondiale est inquiétante aujourd'hui à travers le monde les panneaux solaire photovoltaïque est en train de devenir une solution prometteuse la production d'électricité verte, largement dominée par le silicium (monocristallins, poly cristallins et les films minces).

Cependant, le défi consiste à réduire les coûts industriels et à rendre l'énergie plus compétitive.

Dans ce contexte, certaines solutions sont proposées. Un de ceux-ci est de mettre tous les contacts sur le côté arrière de la cellule, c'est ce qu'on appelle une cellule solaire d'émetteur à contacts arrière (emitter wrap throught solar cells) EWT.

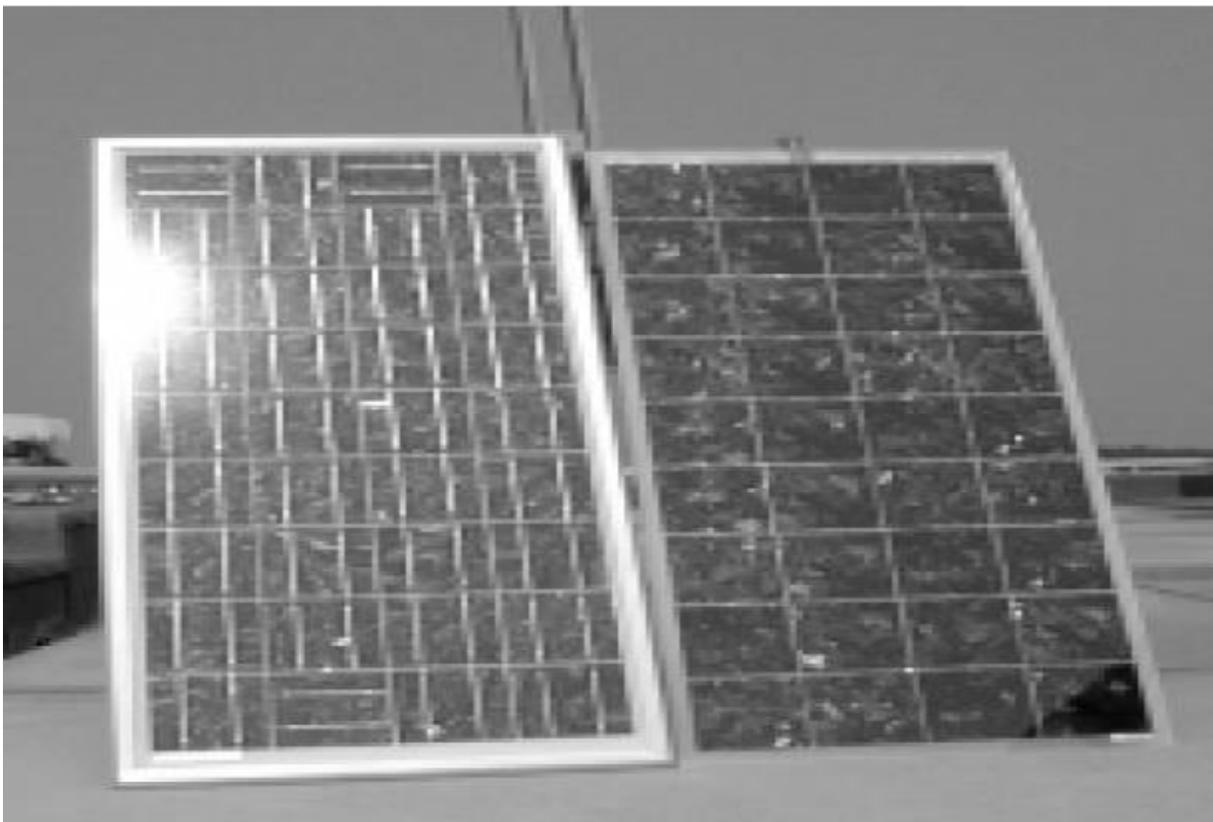


Figure 41 : Comparaison entre un module photovoltaïque de cellule conventionnel et un module photovoltaïque de cellule d'émetteur à contacts arrière EWT.⁴⁶

⁴⁶« attacking limiting factors in 10·10 cm² multicrystalline silicon, emitter wrap-through solar cell design and processing a. schönecker, a. w. weeber, w. c. sinke c. zechner*, a. kress*, p. fath*

Chapitre 3 : Présentation de la cellule d'émetteur a contacté arrière (emitter wrap throught solar cells EWT).

II. Description de la cellule d'émetteur à contact arrière

1. les plus importants paramètres des cellules solaires EWT
Pour toute structure de cellule solaire, l'optimisation des paramètres numériques est nécessaire pour atteindre les meilleures performances. Les paramètres à être optimisés sont les profils et les niveaux de dopage, la géométrie des contacts et les régions diffusées, l'épaisseur de la cellule, etc....

D'autres paramètres peuvent être considérés lors de l'optimisation tels que la qualité du substrat (durée de vie, mobilité), la qualité des contacts ohmiques et de la vitesse de recombinaison de surface (avant et arrière).⁴⁷

Dans ce travail, la simulation numérique est réalisée en utilisant le logiciel Silvaco Atlas pour déterminer les plus importants paramètres des cellules solaires EWT. La principale difficulté réside dans le fait que nous sommes limités par la priorité pour effectuer le plus grand nombre de paramètres.

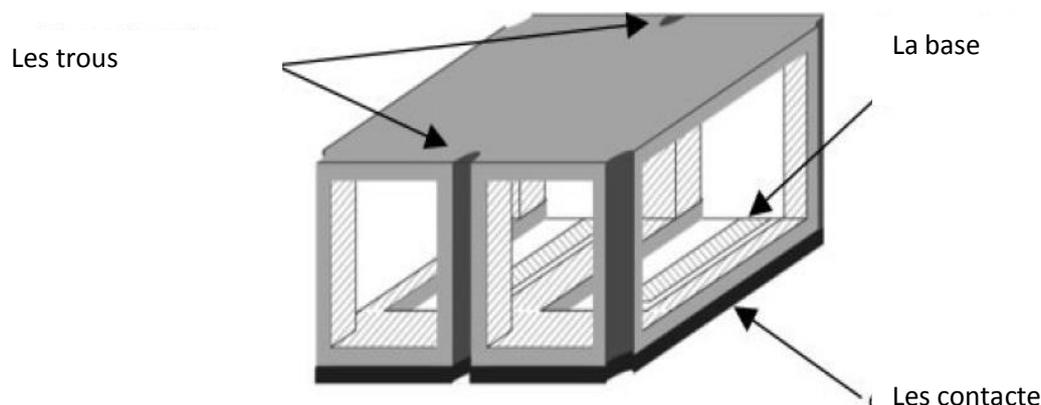


Figure 42 : présente La structure générale d'une cellule d'metteur a contacts arrière.

⁴⁷ « Optimal design of buried emitter of EWT silicon solar cells type by numerical simulation Batoul BENABADJI*and Abdellatif ZERGA.

Chapitre 3 : Présentation de la cellule d'émetteur a contacté arrière (emitter wrap throught solar cells EWT).

En effet, la cellule solaire EWT est décrite par les paramètres clés suivants :

- Les dimensions de la région (largeurs de substrat, d'émetteur et de BSF, espacement entre l'émetteur et le BSF) ;
- Les régions de contact ;
- Les niveaux de dopage (substrat, émetteur et BSF);
- Le substrat

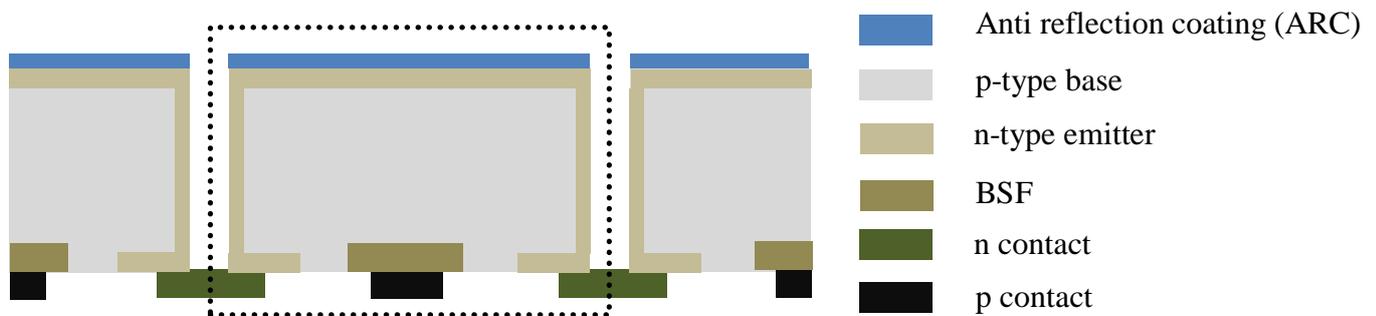


Figure 43 : constituant d'une cellule EWT

III. Structure de la cellule photovoltaïque :

Les cellules solaires sont développées en utilisant un substrat de silicium de type p. La face avant est recouverte d'un revêtement antireflet Si_3N_4 pour réduire les reflets de la lumière.

Une jonction n + p est diffusée sur $0.5\mu\text{m}$ dans un substrat de silicium. Cette diffusion concerne les "trous" des bords avant et latéraux des substrats. Il est à noter que. L'émetteur sur le front est enveloppé par des trous percés au laser à l'arrière de la cellule solaire. la figure 3 représente un trou

Chapitre 3 : Présentation de la cellule d'émetteur a contacté arrière (emitter wrap throught solar cells EWT).

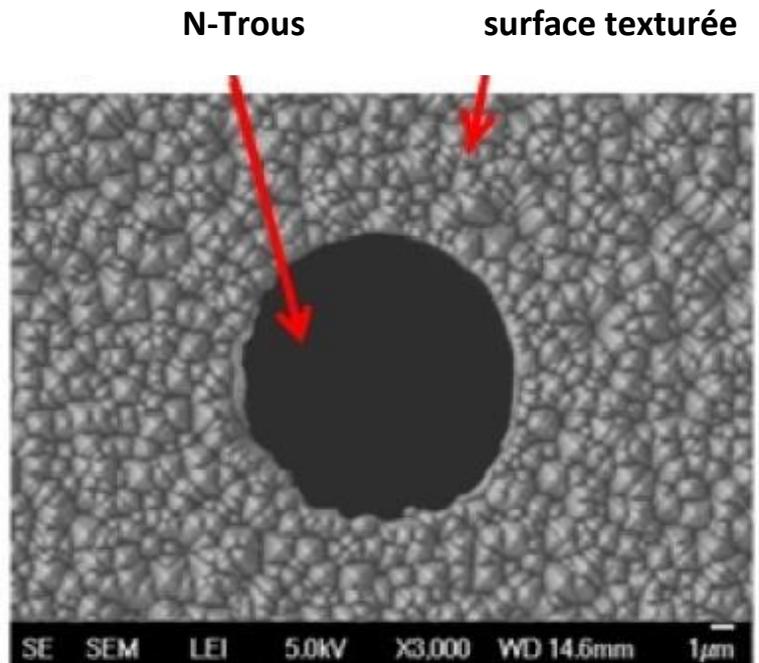


Figure 44 : MEB⁴⁸ d'un bord de trou sur la surface avant texturisée.

Le champ de surface arrière (BSF) consiste à créer une barrière de potentiel à l'arrière de la cellule pour assurer la réflexion des porteurs minoritaires. Les contacts métalliques sont sérigraphiés sur le côté arrière de la structure. L'aluminium et l'argent sont utilisés pour les régions p + et n +, respectivement. La figure ci-dessous illustre la vue en coupe de l'enveloppe d'émetteur considérée à travers les cellules solaires au silicium.

⁴⁸MEB : microscopie électronique à balayage.

Chapitre 3 : Présentation de la cellule d'émetteur a contacté arrière (emitter wrap throught solar cells EWT).

IV. Différence entre la cellule conventionnelle et la cellule a contacts arrière :

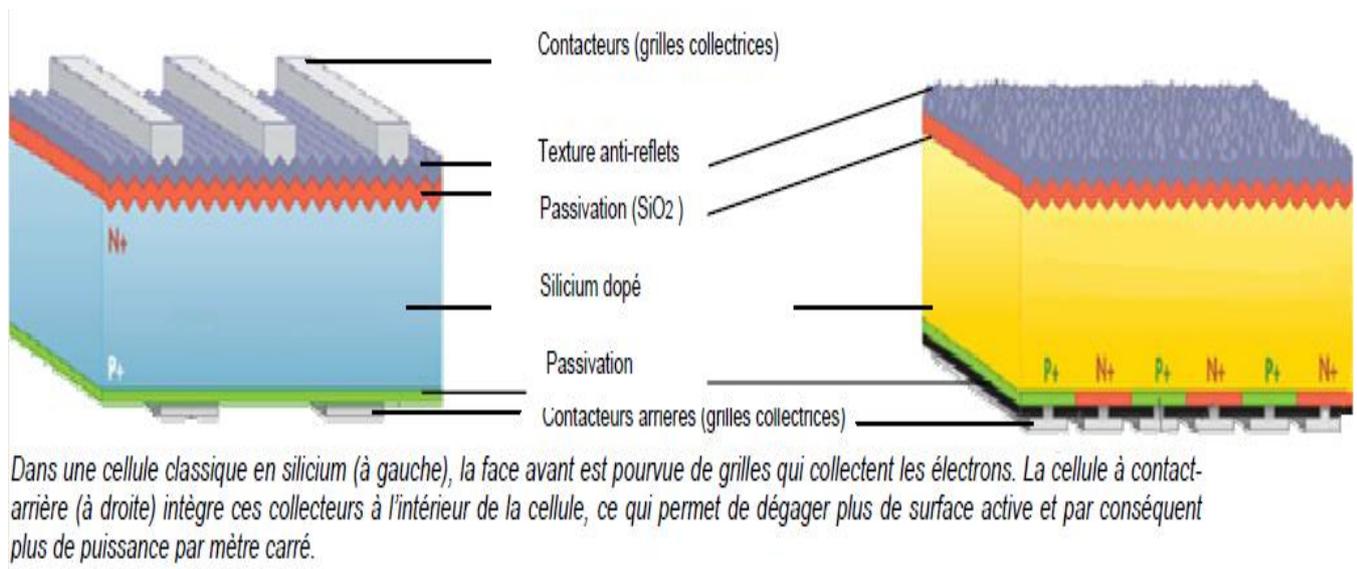


Figure 45 : comparaison entre la cellule a contact arrière et la cellule conventionnelle.

A l'heure actuelle, la technologie la plus fiable de la filière photovoltaïque est le silicium cristallin. En effet, c'est la technologie la plus mature du marché, pour laquelle nous bénéficions aujourd'hui d'un long retour d'expérience, et qui bénéficie d'une durée de vie de 25 à 30 ans. De plus, c'est le meilleur rendement de toutes les technologies photovoltaïques standards : le silicium est très abondant, stable, et non toxique ; enfin, son prix diminue grâce aux progrès réalisés lors de sa purification, en termes de capacité et d'efficacité des procédés. Les cellules produites peuvent être de type poly cristallin ou monocristallin. Le contact électrique est posé en grille sur la face avant (pôle négatif) ou arrière (pôle positif) de la cellule.

Notre cellule (la EWT) se différencie que : l'émetteur dopé n est ramené en face arrière. Au vu de tous les avantages qu'on va lui apporter, les cellules ont, de fait, un gros potentiel Commercial et d'innovation. La technologie n'est certes pas encore complètement mature, mais l'ensemble des acteurs du photovoltaïque y travaillent.

Ainsi, on prévoit une forte croissance commerciale pour ce type de cellules, avec une part sur le marché du photovoltaïque qui atteindrait 10% en 2013, puis 50% en 2020.⁴⁹

⁴⁹Massimo Nicolai et al., « Numerical Simulation and Experimental Characterization of Emitter Wrap through Solar Cells with Deep Grooved Base Contact (EWT-DGB) », *Energy Procedia*, Proceedings of the 6th

Chapitre 3 : Présentation de la cellule d'émetteur a contacté arrière (emitter wrap throught solar cells EWT).

V. Les cellules à contacts arrières

Depuis les premières publications de R.J. Schwartz en 1975, recherche en back-contact cellules comme une alternative aux cellules avec un contact avant et arrière est restée un sujet de recherche.

Au cours de la dernière décennie, l'intérêt pour ces cellules de contact a augmenté et une introduction aux applications industrielles est en train d'émerger.

Les cellules a contact arrière sont divisées en trois classes principales: la jonction arrière (BJ), le emitter wrap through (EWT) et le wrap-through métallisé (MWT), chacun étant présenté comme descendant logique des cellules solaires conventionnelles. On va parler sur la différence essentielle de chaque une de ces classes.

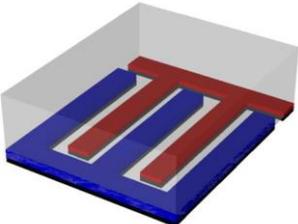
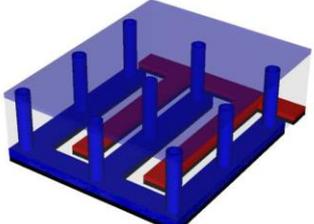
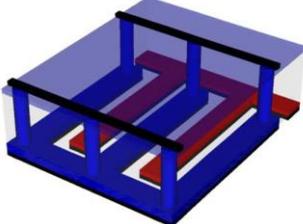
BJ (Back Junction)	EWT (emitter Wrap through)	MWT(Metallisé Wrap-through)
		

Figure 46: Les cellules a contacte arrière.

1) La cellule de Jonction arrière (Back-Junction) :

Cette technologie est maîtrisée et présente l'avantage de n'avoir ni contacts métalliques ni émetteurs sur la face avant du module. De plus, elle possède un haut niveau de rendement.

Elle est actuellement produite et déjà commercialisée comme Cellule IBC (Interdigitated Back Contact), basée sur du wafer monocristallin de haute qualité. Cependant le procédé de production est complexe et couteux.⁵⁰

International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (SiliconPV 2016), 92 (1 août 2016): 160- 69, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.015>.

⁵⁰« Les cellules « Back-contact » en silicium cristallin par GDF-SUEZ - بحث Google », <https://www.google.com/>.

Chapitre 3 : Présentation de la cellule d'émetteur a contacté arrière (emitter wrap throught solar cells EWT).

2) La cellule d'émetteur a contact arrière (Emitter Wrap Through) :

Sur cette cellule, l'émetteur reste présent sur la face avant, mais les contacts sont bien sur la face arrière. Cette disposition permet une meilleure collection des porteurs de charge, et représente un avantage pour les matériaux ayant une faible longueur de diffusion de porteurs.

Il existe plusieurs associée ont mis ce type de cellule en développement.

Cependant, ces modules ne présentent pas encore une résistance au temps satisfaisante.

La cellule RISE-EWT (de StiebelEltron) présente elle un rendement record atteignant 21,4%.²⁵¹

3) La cellule Metal Wrap Through (MWT) :

Cette cellule est très proche du modèle EWT, mais comprend la présence d'une fine grille sur la face avant, qui communique avec l'arrière par des trous percés au laser. On peut percevoir visuellement les contacts, qui restent légers

VI. Les avantages et les inconvénient de la cellule d'émetteur a contacts arrière :

a. Les avantages :

Cette technologie est maîtrisée et présente l'avantage de n'avoir ni contacts métalliques ni émetteurs sur la face avant du module. De plus, elle possède un haut niveau de rendement.

Elle est actuellement produite et déjà commercialisée, on peut distinguer les raison logique pour les quelle cette cellule a un rendement plus élevé l :

- grande surface avant pour l'absorption de la lumière (en raison de l'absence de contact)
- toutes les contacts sont formés à l'arrière et servent de réflecteurs arrière
- jonction latérale supplémentaire qui améliore la collection de porteurs minoritaires
- la non-existence de contact sur la face avant des cellules solaires donne une couleur uniforme des modules.
- Moins de pertes résistives dans le module ;
- Une optimisation plus aisée de la face avant de la cellule.
- Un procédé moins complexe d'assemblage des cellules dans le module, ce qui induit

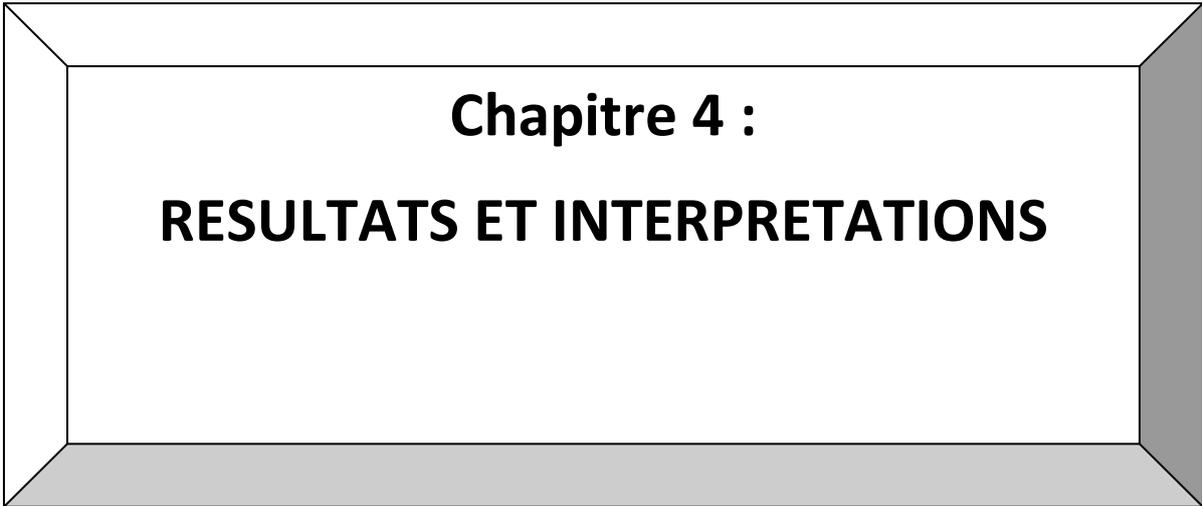
⁵¹Benabadji, B. & Zerga, A. Optimal Design of Buried Emitter of EWT Silicon Solar Cells Type by Numerical Simulation. *Energy Procedia* 44, 126–131 (2014).

Chapitre 3 : Présentation de la cellule d'émetteur a contacté arrière (emitter wrap throught solar cells EWT).

- une baisse d'un coût de main d'œuvre, et une vitesse de production plus élevés.
- Un aspect esthétique amélioré.
- Un espace potentiellement plus petit entre les cellules.

b. Les inconvénients de ce type de cellule ?

- En premier lieu, la présence des contacts sur la face avant engendre des pertes, car cela crée de l'ombrage et n'exploite pas entièrement toute la surface exposée.
- Le procédé d'assemblage des cellules dans le module est complexe.
- L'aspect esthétique est moins bon que pour les modules monolithiques en couches minces.
- Pertes résistives lors d'un assemblage dans le module.



Chapitre 4 :
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I. Introduction :

A partir de la cellule de référence décrite dans le chapitre précédent, nous avons tout d'abord fait varier le dopage de l'émetteur puis le dopage du bsf et le dopage du substrat, la longueur de diffusion, dopage du substrat et finalement on va faire une étude comparatif entre les cellules EWT en la cellule conventionnelle.

La simulation a été réalisée pour la cellule de référence définie au chapitre précédent (Substrat de type (p) et LD=200 μ m).

L'ensemble des variations est résume dans le tableau suivant :

Tableau I-1 : Paramètres variables pendant la simulation

<i>Parametre</i>	<i>Valeur minimale</i>	<i>Valeur maximale</i>
<i>dopage du substrat</i>	$5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
<i>dopage de l'emetteur</i>	$5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$
<i>dopage du BSF</i>	$5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$
<i>longueur de diffusion</i>	50 μ m	500 μ m

Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

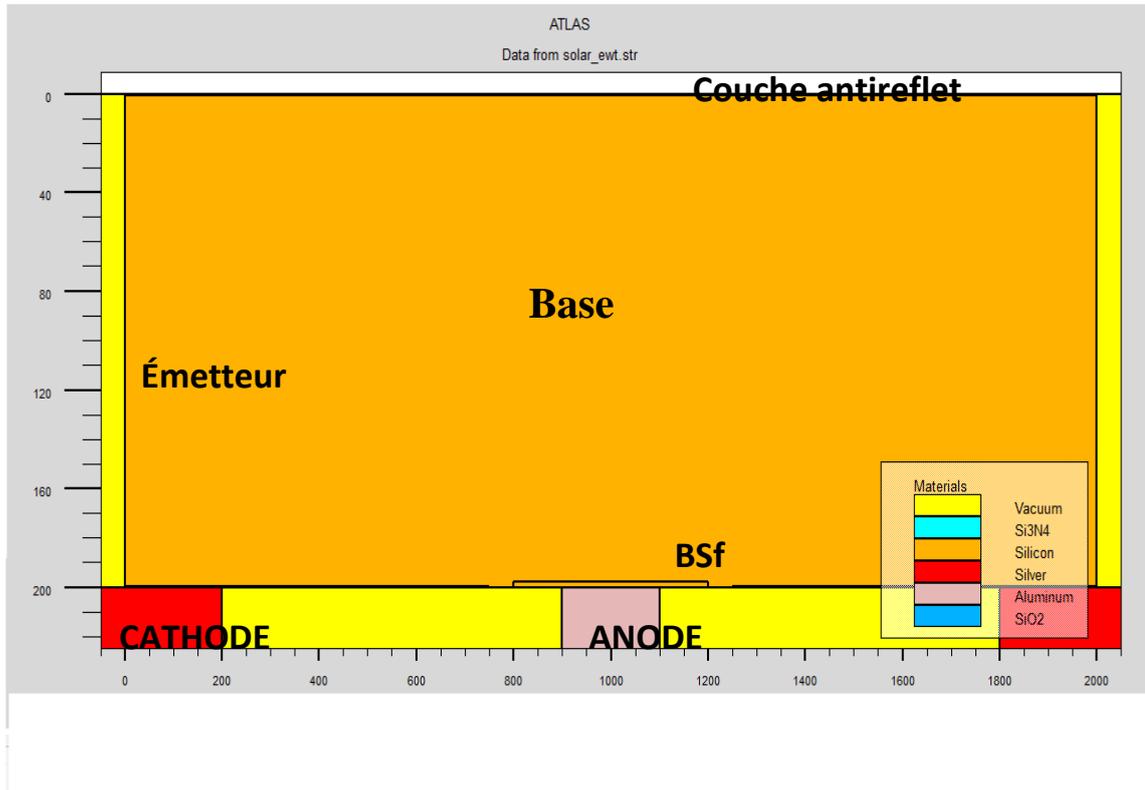


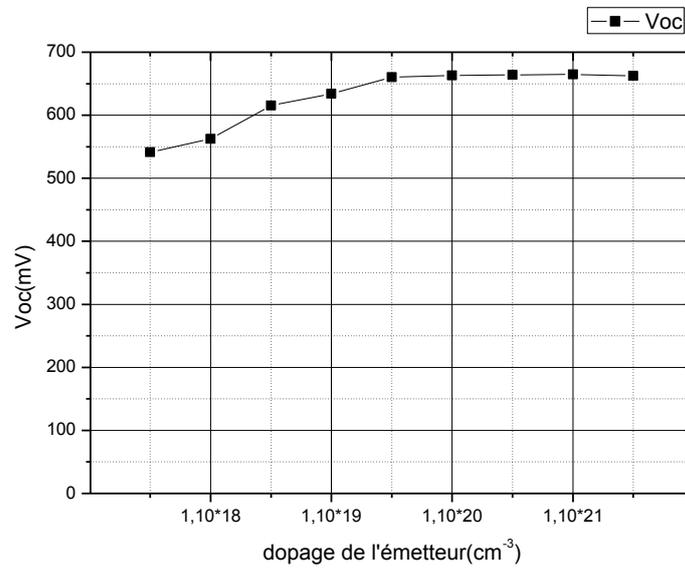
Figure 47 : Structure simulée sous SILVACO-Atlas

La figure 2 représente la structure de la cellule d'émetteur à contact arrière simulée par Silvaco- Atlas. Elle est composée d'une couche antireflet à base de nitrure de silicium (Si_3N_4) d'épaisseur $75\mu\text{m}$, d'un substrat de type p avec une épaisseur égale à $200\mu\text{m}$. Elle est dope à $5.10e16\text{cm}^{-3}$, d'un BSF (Back Surface Field) épais de $2\mu\text{m}$ et dope à $1.10e19\text{cm}^{-3}$, et enfin d'un émetteur en face arrière épais de $0.5\mu\text{m}$ et dope a $10e20\text{cm}^{-3}$.

Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

II. Exploitation des résultats :

- Dopage de l'émetteur :



Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

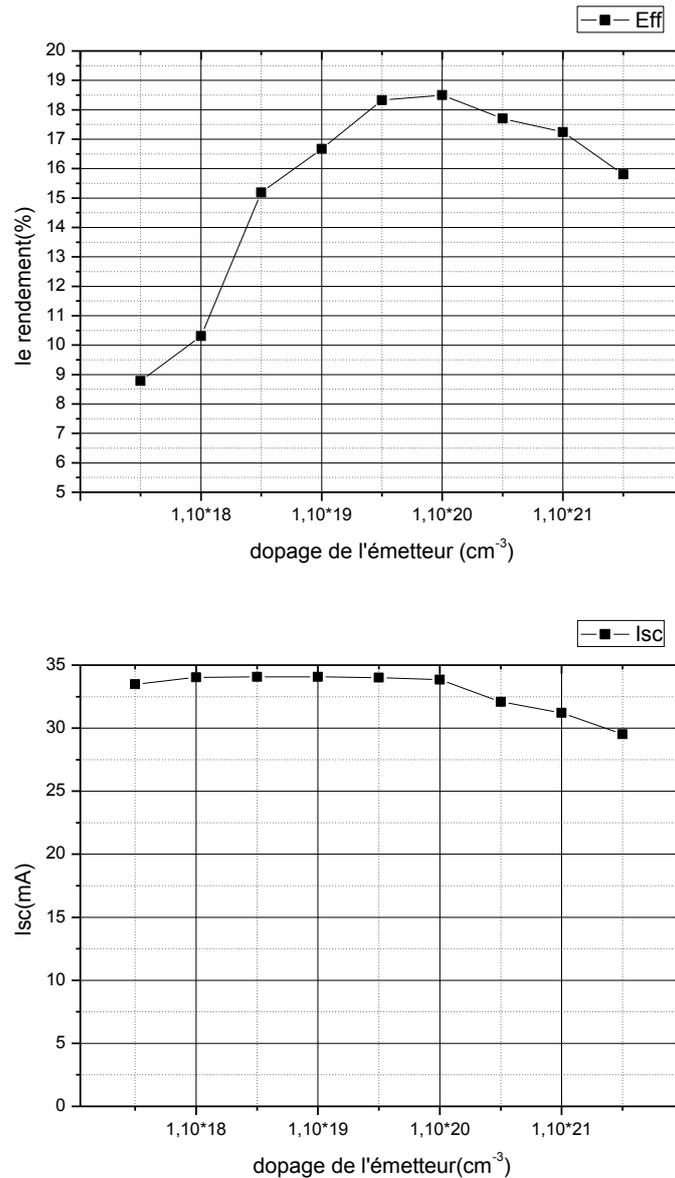


Figure 48 : Evolution de court-circuit, de la tension de circuit ouvert et du rendement de la cellule en fonction du dopage.

La figure 3 représente l'évolution des paramètres principaux des cellules EWT sous éclairage en fonction du dopage de l'émetteur. On remarque que les performances de la cellule dépend du dopage de l'émetteur.

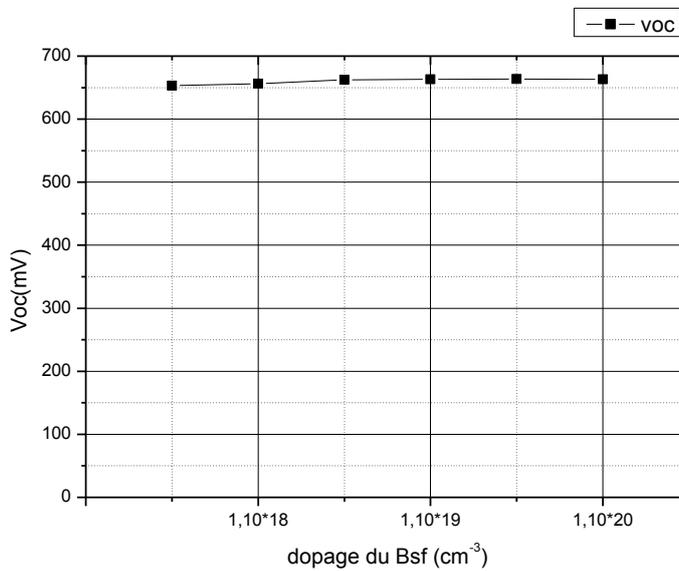
En effet si l'émetteur est fortement dopé (entre 1^{19} et 1^{20}) la hauteur de la barrière de potentiel de la jonction p-n augmente et la tension de circuit ouvert augmente aussi, ainsi que

Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

le rendement de conversion .si l'émetteur est faiblement dopé ($< 5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$), la hauteur de la barrière de potentiel de la jonction p-n est réduite .ainsi, l'optimisation de dopage de l'émetteur ne peut être faite afin d'avoir un rendement maximale.

En conclure, il est préférable d'utiliser un émetteur bien dopé pour assurer une bonne séparation des porteur.

- Dopage du bsf



Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

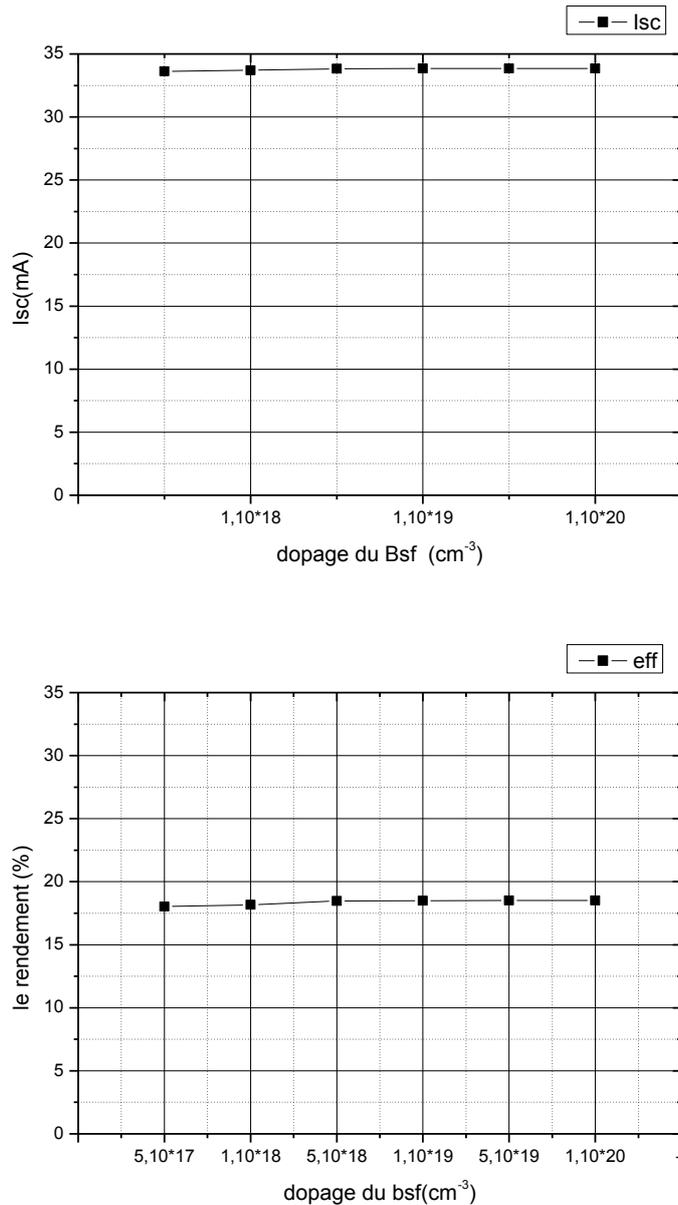


Figure 49 : évolution des paramètres principaux de la cellule EWT sous éclairage en fonction du dopage du BSF

La figure 11 représenté l'évolution des paramètres principaux de la cellule EWT sous éclairage en fonction du dopage du BSF pou la cellule de référence.

Dans cette simulation nous remarquons que les performances de la cellule EWT ne varient pas en fonction du dopage de l'émetteur.

Comme le Bsf est placé sur la face arrière de la cellule, la recombinaison est pratiquement négligeable.

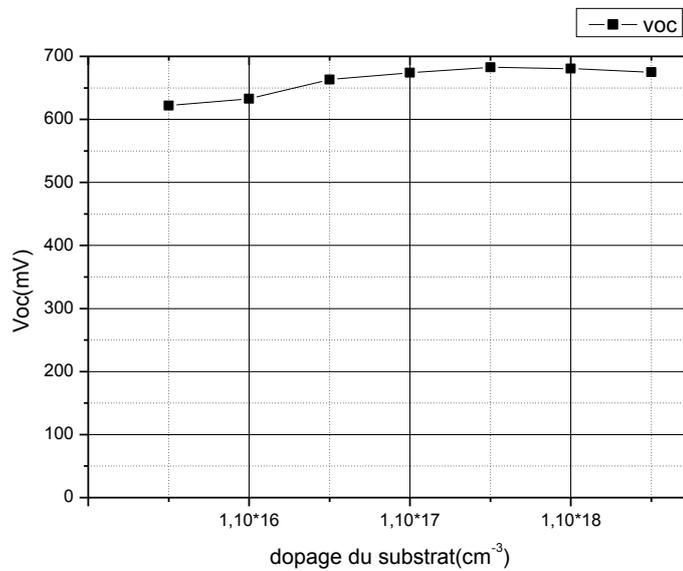
Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Un niveau de dopage obtenu à partir d'un recuit d'aluminium déposé par sérigraphie sera suffisant.

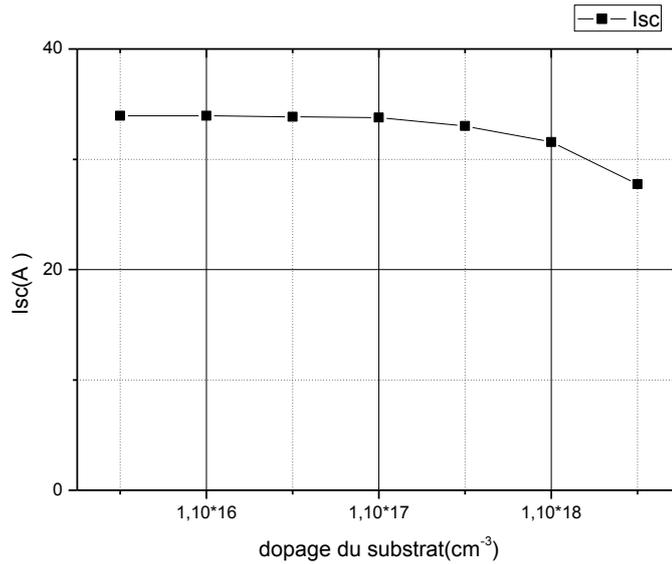
Il ne devrait pas donc être nécessaire d'utiliser des diffusions haute température à base de bore pour la formation du plot BSF [1].

EN conclusion, le dopage du bsf n'a pas une grande influence sur le rendement de conversion de la cellule.

- **Dopage du substrat :**



Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS



●

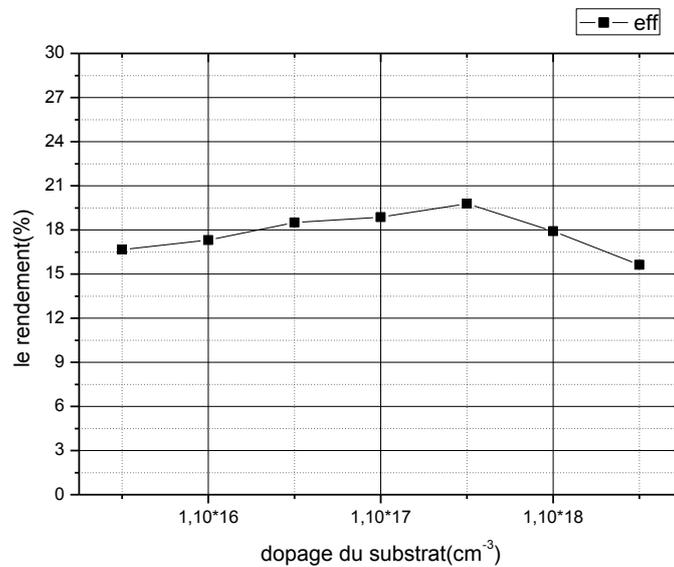


Figure 50 : l'évolution des paramètres principaux de la cellule ewt sous éclairnement en fonction du dopage du substrat

La figure 5 représente l'évolution des paramètres principaux de la cellule ewt sous éclairnement en fonction du dopage du substrat .dans cette simulation nous remarquons que les performances de la cellule EWT varie en fonction du dopage du substrat.

En effet, si le substrat est faiblement dopé ($>5^{16} \text{cm}^{-3}$), la hauteur de la barrière de potentiel de la jonction p-n est réduite. Cela entraine la décroissance de la tension de circuit ouvert ainsi que le rendement de conversion de la cellule.

Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

On constate aussi avec l'augmentation du niveau du dopage du substrat ($>5^{19}\text{cm}^{-3}$) la durée de vie des porteurs se dégradent ainsi le taux de recombinaison augmente.

Cela entraîne une décroissance du courant de court-circuit de la tension de circuit ouvert et du rendement de conversion de la cellule EWT et du rendement de conversion de la cellule EWT.

En conclusion, l'optimisation du dopage du substrat ne peut être faite simultanément afin d'avoir un rendement de conversion de la cellule Ewt.

- **La longueur de diffusion :**

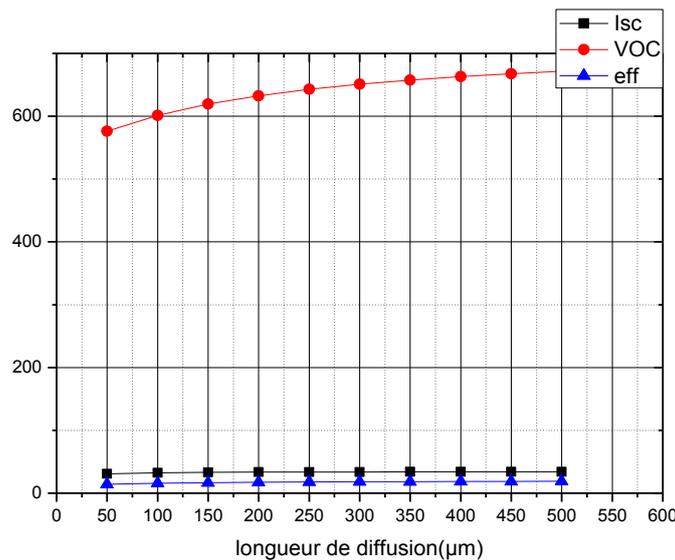


Figure 51 : l'influence de la longueur de diffusion sur le rendement.

Dans cette simulation nous présentons l'évolution des paramètres principaux de la cellule ewt en fonction de la longueur de diffusion. Nous remarquons que les trois paramètres de la cellule EWT :

- Le courant de court-circuit
- La tension de circuit ouvert
- Le rendement de conversion on dépend de la longueur de diffusion.

On remarque aussi que l'augmentation de cette longueur de diffusion permet une amélioration remarquable des trois paramètres de la cellule EWT.

En effet, si la longueur de diffusion augmente la durée de vie des porteurs minoritaire augmente aussi.

Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

En conclusion, l'utilisation de silicium de haute qualité pour la fabrication des cellules EWT reste nécessaire.

- **Comparaison entre la cellule conventionnelle et la cellule EWT :**

Nous avons simulé une cellule conventionnelle sur un substrat de 200µm d'épaisseur pour servir de référence à l'étude.

Les paramètres fixés sont :

	Epaisseur	Dopage	
Substrat	200µm	$5.10^{15} \text{ cm}^{-3}$	
Emetteur	0.5µm	$1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$	Profil erfc
BSF	2µm	$1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$	
Couche anti reflet	75nm		Indice de réflexion=2.05

Tableau 3 : Grandeurs physiques simulées de la cellule référence.

Paramètre principaux	ICC (mA/cm ²)	VOC (mV)	η (%)
Cellule EWT	33.850	663.102	16.50
Cellule conventionnelle	29.09	671.25	15.82

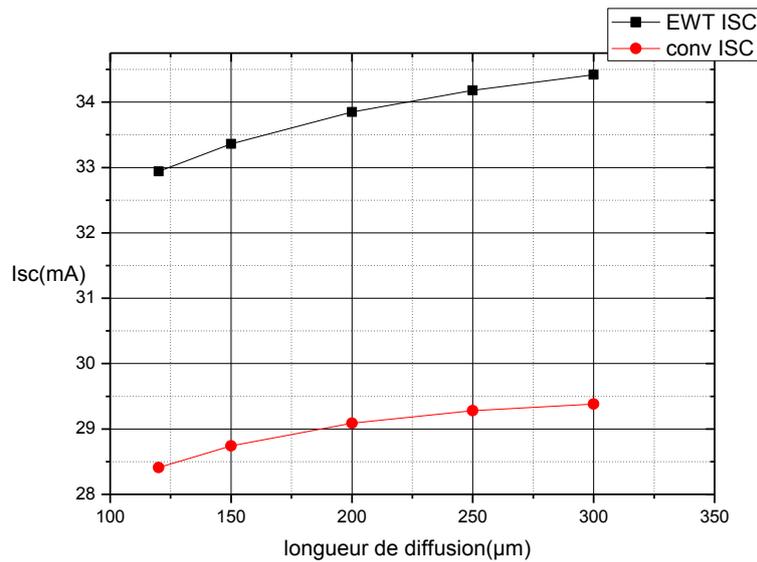
Tableau 4 : performances des cellules photovoltaïque (cellule EWT et cellule conventionnelle) obtenue par la simulation sous Atlas Silvio.

Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

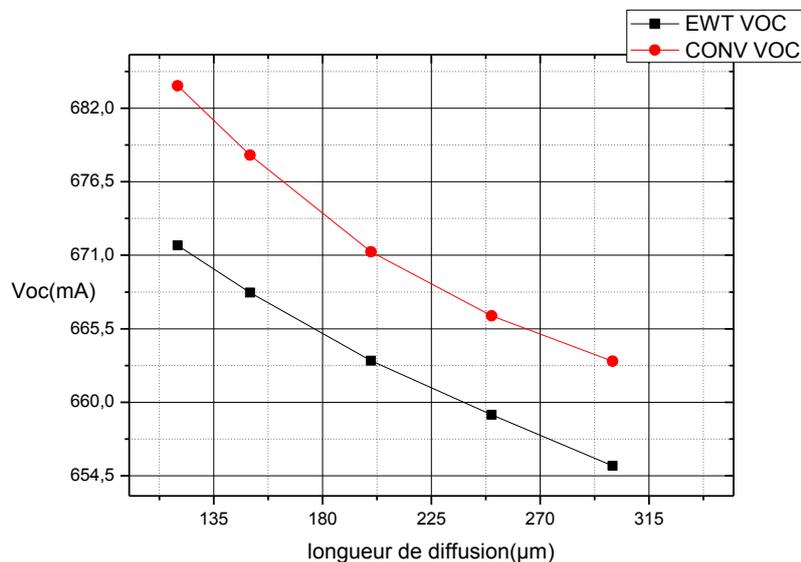
Pour expliquer des paramètres principaux de la cellule EWT ; nous avons réalisé des simulations avec la cellule conventionnelle .nous remarquons sur cette figure que la longueur de diffusion est un paramètre influent sur les cellules photovoltaïques.

Ces résultats montrent aussi que les performances de la cellule EWT sont supérieures à celle de la structure conventionnelle.

- **L'épaisseur du substrat :**

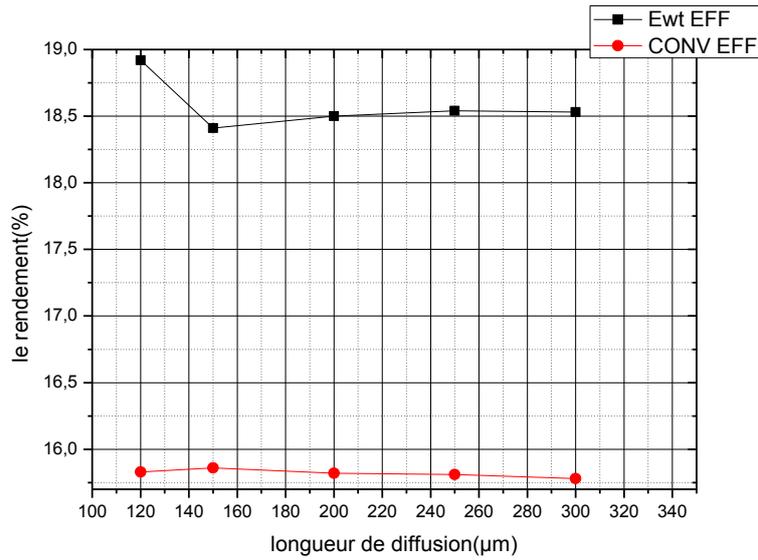


La figure 52 : représenté les résultats de simulation de l'ISC



Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

La figure 53 : représenté les résultats de simulation du VOC



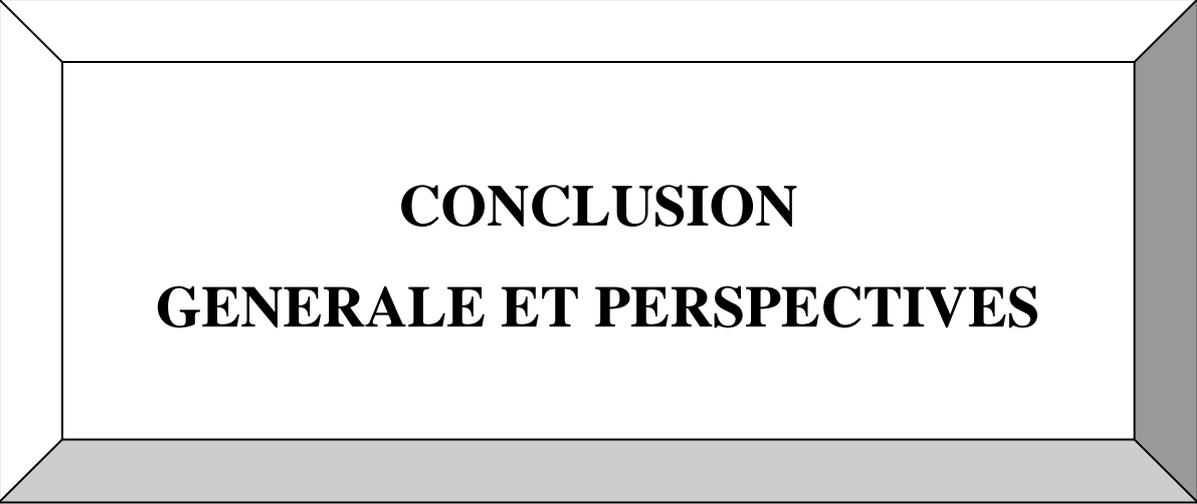
La figure 54 : représenté les résultats de simulation de l'EFF

La figure 7, 8,9 représente une étude comparative entre les paramètres principaux (Isc, VOC, Eff) d'une cellule EWT et une cellule conventionnelle en fonction de l'épaisseur du substrat.

Chapitre 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III. CONCLUSION

- Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence des paramètres des cellules solaires d'émetteur à contacts arrière sur leur rendement à l'aide de la simulation numérique en 2D on utilisant le logiciel de simulation Silvaco-Atlas.
- Le but de cette étude est de chercher les paramètres principaux des cellules d'émetteur à contacts arrière et les dopages qui donnent un rendement maximal.
- Nous avons trouvé que pour certains paramètres comme, le dopage du substrat, le dopage de l'émetteur, et la longueur de diffusion, les valeurs optimales existent.
- Il a été démontré que les cellules solaires d'émetteur a contacts arrière sont beaucoup plus sensibles à la recombinaison en face avant et à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires que les cellules solaires conventionnelles Ceci en raison de l'emplacement des contacts ohmiques sur la face arrière de la cellule solaire EWT. La plupart des porteurs photo-génères doivent traverser tout le substrat pour être collectés.
- La recombinaison en surface et la longueur de diffusion sont donc les paramètres clés pour le fonctionnement de la cellule photovoltaïque à contacts arrière. Par conséquent, une bonne passivation de la surface et un substrat de bonne qualité sont nécessaires pour avoir un bon rendement.



**CONCLUSION
GENERALE ET PERSPECTIVES**

Conclusion générale et perspectives

A travers cette étude, nous avons décrit les cellules photovoltaïques d'émetteur a contacts arrière (EWT) en procédant à une simulation bidimensionnelle.

Notre travail a été mené de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre on a exposé des généralités concernant les cellules photovoltaïques conventionnelles, leurs principe de fonctionnement, structure et constituant de base d'une cellule photovoltaïque, les grandeurs caractéristique principales les différents types et technologies et les facteurs limitant leurs rendements, ce dernier dégrade progressivement avec les Pertes optiques.
- Le second chapitre a été consacré à la présentation du logiciel Silvaco et son utilité pour la simulation de la cellule EWT et pour la structure de référence, qui nous a permis d'avoir des valeurs réels concernant les grandeurs physiques qu'elles caractérisent notre système et de caler notre simulateur par des modèles physiques concrets et mettre des affinements exacte sur notre structure.
- Le troisième chapitre dédiait aux cellules photovoltaïques d'émetteur an contact arrière, caractérisant par leur forme esthétique, leurs avantages marquant dans l'absence de jonction et contact à la face avant, l'absence d'ombre des contacts qui sont déplacé sa la face arrière, ce qui favorise une augmentation remarquable au niveau de la rentabilité électrique. Nous avons expliqué aussi les différents types de cellules à contacts arrières.

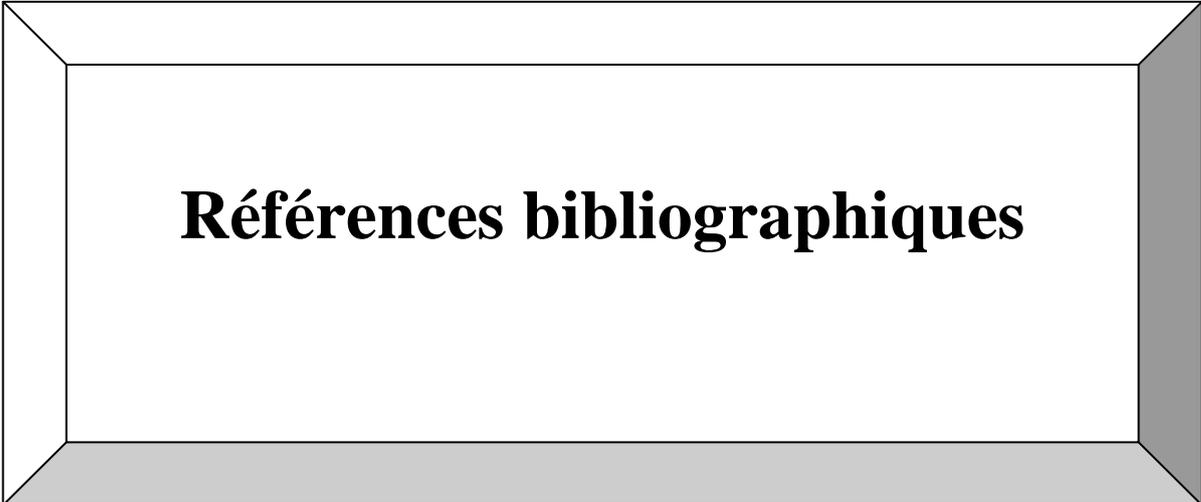
(La cellule a contacts arrière ' BJ back-jonction ', cellule photovoltaïque ayant une enveloppe métallique traversant 'métal wrap throught MWT' et enfin la cellule d'émetteur a contacts arrière' EWT emitter wrap throught' puis leur avantages et inconvénients.

- Dans le quatrième chapitre nous avons exposé et commenté les résultats obtenus, commençant par l'exposition des résultats de la simulation de la cellule EWT afin d'avoir le rendement optimal en les comparants a ceux de la cellule référence, puis on a fait une comparaison afin de démontrer que la cellule EWT est plus performante que la cellule conventionnelle.

Nos résultats sont probants et notre code de calcul du simulateur est enfin prêt à la prédiction des paramétrés physique et géométrique des structures de la cellule d'émetteur à contacts arrière a deux dimensions.

Conclusion générale et perspectives

Concernant ses perspectives, nous espérons approfondir dans ce domaine prometteur en effectuant une simulation tridimensionnelle en faisant varier d'autres paramètres telle que la vitesse de recombinaison la réflectivité, les dimensions et les résistances des contacts.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

Bibliographie :

1. cdtpv. « CdTe Solar Cells ». Science, 08:10:09 UTC. <https://www.slideshare.net/cdtpv/cdte-solar-cells>.
2. « Cellule au silicium amorphe — Solarpedia ». Consulté le 9 juin 2018. http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Cellule_au_silicium_amorphe.
3. « Cellule Solaire Cristalline ». Consulté le 9 juin 2018. <http://www.bipv.ch/index.php/fr/materiel/glossaires/item/711-cellulesolairecristalline>.
4. « Cellules Photovoltaïques Organiques : de la molécule aux composants ». IRAMIS. Consulté le 9 juin 2018. http://iramis.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=1684.
5. Chen, Rongrong, Jiandong Fan, Hongliang Li, Chong Liu, et Yaohua Mai. « Efficiency Enhancement of Cu₂ZnSnS₄ Solar Cells via Surface Treatment Engineering ». *Royal Society Open Science* 5, n° 1 (1 janvier 2018): 171163. <https://doi.org/10.1098/rsos.171163>.
6. « CIGS Solar Cells, Simplified ». Consulté le 9 juin 2018. <https://www.solarpowerworldonline.com/2014/01/cigs-solar-cells-simplified/>.
7. « CIGS : une cellule photovoltaïque sans élément toxique | Dossier ». Consulté le 9 juin 2018. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/11/>.
8. « CZTS Thin Film Solar Cells ». Consulté le 9 juin 2018. <http://www.ucl.ac.uk/institute-for-materials-discovery/research/clean-energy/czts-thin-film-solar-cells>.
9. « DE L'ÉLECTRICITÉ À PARTIR DU SOLEIL ». Consulté le 6 mai 2018. <http://sulfate.ch/Energie/A%20PARTIR%20DU%20SOLEIL.htm>.
10. « Définition de Silicium monocristallin ». Actu-Environnement. Consulté le 9 juin 2018. https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/silicium_monocristallin.php4.
11. « Epaisseur des couches minces - HORIBA ». Consulté le 9 juin 2018. <http://www.horiba.com/fr/scientific/products/ellipsometers/ellipsometry-academy/ellipsometry-tutorial/thin-film-properties/thin-film-thickness/>.
12. « Fichier:Solar land area.png — Solarpedia ». Consulté le 6 mai 2018. http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Fichier:Solar_land_area.png.
13. Futura. « Cellules solaires organiques : bientôt un développement industriel ? » Futura. Consulté le 9 juin 2018. <https://www.futurasciences.com/planete/actualites/developpement-durable-cellules-solaires-organiques-bientot-developpement-industriel-53177/>.
14. « Heliotrop - Systèmes solaires à concentration innovants ». Consulté le 9 juin 2018. <http://www.heliotrop.fr/>.
15. « Histoire du Photovoltaïque ». *Technics* (blog). Consulté le 9 juin 2018. <http://www.prime-energy-technics.ch/media/histoire-du-photovoltaïque/>.
16. « Historique de la cellule photovoltaïque ». Consulté le 6 mai 2018. <http://tpeenergiephotovoltaïque.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaïque/historique-de-la-cellule-photovoltaïque.html>.
17. « Introduction ». Consulté le 6 mai 2018. <http://tpeenergiephotovoltaïque.e-monsite.com/pages/introduction/introduction.html>.
18. « La cellule photovoltaïque ». Consulté le 6 mai 2018. <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23e/RM23e03.html>.
19. « Le «Nobel suisse» pour Michael Grätzel de l'EPFL ». *Le Temps*, 30 août 2013. <https://www.letemps.ch/sciences/nobel-suisse-michael-gratzel-lepfl>.
20. « Le photovoltaïque pour satellite — Solarpedia ». Consulté le 6 mai 2018. http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_photovolta%C3%AFque_pour_satellite.

Références bibliographiques

21. « Le solaire s'impose comme l'énergie du futur ». Réseau Sortir du nucléaire. Consulté le 9 juin 2018. <http://www.sortirdunucleaire.org/Le-solaire-s-impose-comme-l>.
22. « Les boîtes quantiques et l'amélioration de l'efficacité des panneaux solaires - Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France aux Etats-Unis ». Consulté le 9 juin 2018. <https://www.france-science.org/Les-boites-quantiques-et-l.html>.
23. « Les différents types de cellules photovoltaïques - Ecosources ». Consulté le 9 juin 2018. https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques.
24. « L'invention des panneaux photovoltaïques ». Consulté le 9 juin 2018. <http://tpe-panneauxphotovoltaïques.e-monsite.com/pages/panneaux-photovoltaïques/l-histoire-du-panneaux-photovoltaïques/l-invention-des-panneaux-photovoltaïques.html>.
25. « Memoire Online - Etude des paramètres influençant les performances des cellules solaires sensibilisées par colorant - Hichem et Moussaab MAMMAR et BELARBI ». Consulté le 9 juin 2018. https://www.memoireonline.com/05/12/5856/m_Etude-des-parametres-influenant-les-performances-des-cellules-solaires-sensibilisees-par-coloran6.html.
26. min, Thevenot 3 août 2013 à 20 h 26. « La centrale solaire photovoltaïque à concentration ». *Electricité et énergie* (blog), 7 mars 2013. <http://www.electricite-et-energie.com/la-centrale-solaire-photovoltaïque-a-concentration-a-concentration/>.
27. « NASA - NSSDCA - Spacecraft - Details ». Consulté le 6 mai 2018. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1958-002B>.
28. « Photovoltaïques Concentrés - Zytech Solar ». *Zytech Solar - Energía Solar FV* (blog). Consulté le 9 juin 2018. <http://fr.zytechsolar.com/photovoltaïques-concentres/>.
29. « Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ». Consulté le 28 mars 2018. <http://tpeenergiephotovoltaïque.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaïque/principe-de-fonctionnement-de-la-cellule-photovoltaïque.html>.
30. « Principes de base pour l'orientation de panneaux photovoltaïques ». Consulté le 6 mai 2018. <http://www.lepanneausolaire.net/principes-base-l-orientation-panneaux-photovoltaïques.php>.
31. « Prof. Michael Graetzel | LPI ». Consulté le 9 juin 2018. <https://lpi.epfl.ch/graetzel>.
32. « Quelle est la différence entre polycristallin monocristallin et amorphe cellule solaire à couche mince? - Solar Water Heater ». Consulté le 8 mai 2018. http://www.sunflower-solar.com/index_fr.php?act=content&scheduler_id=3629.
33. Rama Goudiaby. « les cellules photovoltaïques type CIGS ». 04:03:30 UTC. <https://fr.slideshare.net/ramagoudiaby39/expose-cigs>.
34. sdn72master. « Edmond Becquerel... découvre l'effet photovoltaïque en 1839 – Sortir du Nucléaire 72 ». Consulté le 6 mai 2018. <http://www.sdn72.org/2014/03/27/1839-edmond-becquerel-france-1839-france/>.
35. « SIGMA TEC Photovoltaïque - Les principes - ». Consulté le 9 juin 2018. http://www.sigma-tec.fr/textes/texte_principes.html.
36. « Silicium monocristallin, une technologie photovoltaïque Le silicium monocristallin entre dans la composition de certains modules photovoltaïques. Le silicium monocristallin a ouvert la voie à de nouveaux matériaux | Solareo ». Consulté le 8 mai 2018. <http://www.solareo.fr/silicium-monocristallin-technologie-photovoltaïque/>.
37. « Une cellule solaire en silicium amorphe et souple : a-Si | Dossier ». Consulté le 8 mai 2018. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/9/>.
38. Universalis, Encyclopædia. « ABSORPTION, physique ». Encyclopædia Universalis. Consulté le 6 mai 2018. <http://www.universalis.fr/encyclopedie/absorption-physique/>.
39. Yameogo, Zakaria. « Les Photopiles Organiques: Photopile de Grätzel ». Consulté le 9 juin 2018. http://www.academia.edu/31819271/Les_photopiles_organiques_Photopile_de_Gr%C3%A4tzel.

Références bibliographiques

40. Zribi, Jihene. « Croissance et caractérisation des boîtes quantiques InAs/GaAs pour des applications photovoltaïques », 2014. <http://hdl.handle.net/11143/5927>.
41. « Les boîtes quantiques et l'amélioration de l'efficacité des panneaux solaires - Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France aux Etats-Unis », consulté le 9 juin 2018, <https://www.france-science.org/Les-boites-quantiques-et-l.html>.
42. Jihene Zribi, « Croissance et caractérisation des boîtes quantiques InAs/GaAs pour des applications photovoltaïques », 2014, <http://hdl.handle.net/11143/5927>.
43. « Silicium monocristallin, une technologie photovoltaïque Le silicium monocristallin entre dans la composition de certains modules photovoltaïques. Le silicium monocristallin a ouvert la voie à de nouveaux matériaux | Solareo », consulté le 8 mai 2018, <http://www.solareo.fr/silicium-monocristallin-technologie-photovoltaïque/>.
44. « Quelle est la différence entre polycristallin monocristallin et amorphe cellule solaire à couche mince? - Solar Water Heater ».
45. « Une cellule solaire en silicium amorphe et souple : a-Si | Dossier », consulté le 8 mai 2018, <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/9/>.
46. Gee, J.M., et al., "Emitter Wrap-Through Silicon Solar Cell," 23rd IEEE Photo. Spec. Conf., pp. 265-270 (1993).
47. Gee, J.M., et al., "Progress on the Emitter Wrap-Through Solar Cell," 12th Eur. PV Solar Energy Conf., pp. 743-746 (1994).
48. <https://www.google.com/search?q=m%C3%A9moire+Mohammedi+mohamed+&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b-ab>
49. ATLAS User's Manual « DEVICE SIMULATION SOFTWARE ».
50. S. Hermann, P. Engelhart, A. Merkle, T. Neubert, T. Brendemühl, R. Meyer, N.-P. Harder, R. Brendel, 21,4%-Efficient Emitter Wrap-Through RISE Solar Cell on Large Area and Picosecond Laser Processing of Local Contact Openings, Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy (2007), 970-973.
51. Desrues T. B-Doped a-Si:H contact improvement on silicon heterojunctions solar cells and interdigitated back contact structure. 23rd International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors, Utrecht, Pays-Bas, 2009.
52. V. D. Mihailetchi, G. Coletti, Y. Komatsu, L.J. Geerligs, R. Kvande, L. Arnberg, K. Wambach, C. Knopf, R. Kopecek, and A. W. Weeber, "Large area and screen printed n-

Références bibliographiques

type silicon solar cells with efficiency exceeding 18%,” presented at the 23rd EUPVSEC, Valencia, Spain, 2008.

53. Kiefer, F, “High efficiency n-type emitter-wrap-through silicon solar cells” Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), July 2011, 37th IEEE.

54. Schmiga C, Nagel H, Schmidt J. “19% Efficient N-Type Czochralski Silicon Solar Cells with Screen-Printed Aluminum-Alloyed Rear Emitter”. Progress in Photovoltaics: Research & Applications, volume 14, number 6, pages 533-539, 2006

Résumé :

Ces dernières années un engouement particulier a été donné au remplacement des énergies fossiles et fissiles, épuisables, dangereuses et polluantes, par les énergies renouvelables et en particulier le solaire, propres et inépuisables.

Grace à l'effet photovoltaïque la conversion de l'énergie solaire en électricité est possible.

Depuis les années cinquante plusieurs travaux et élaborations des dispositifs photovoltaïques ont été élaborés. Les premiers travaux étaient destinés surtout à l'aérospatial. Aujourd'hui les applications du Photovoltaïque sont multiples. Parmi ces dispositifs celui qui nous intéresse dans ce travail est la cellule photovoltaïque d'émetteur à contact arrière.

ce travail est consacré à l'état de l'art des cellules photovoltaïques, puis à l'étude théorique des cellules d'émetteur a contact arrière et la simulation de certains de ses paramètres physiques (dopage du substrat, de l'émetteur et du BSF), par le logiciel Silvaco-Atlas.

Mots clés : Cellule, photovoltaïque, Emetteur, simulation, Silvaco-Atlas.

Abstract :

In recent years a particular interest was given to the replacement of fossil fuels (exhaustible and polluting) and fissile material (more dangerous) by the clean and inexhaustible solar energy.

Thanks to the photovoltaic effect to convert solar energy into electricity is possible. Since the fifties several studies and development of photovoltaic devices have been developed. The first works were intended primarily to aerospace. Today's photovoltaic applications are numerous. Among the devices that we are interested in this work is the photovoltaic Emitter wrap throught solar cell.

This work is devoted to the state of the art solar cells, then the theoretical study of EWT cells and simulation of some of its physical parameters (thickness of the substrate, the emitter and the BSF and that doping), the software Silvaco-Atlas.

Clef word: photovoltaic cell, emitter, simulation, Silvaco-Atlas.

ملخص:

في السنوات الأخيرة ظهر اهتمام خاص باستبدال الطاقة الأحفورية ذات المخزون المحدود والمسببة للتلوث، والطاقة النووية الخطيرة بالطاقات البديلة، المتجددة، لاسيما الشمسية منها والتي تتميز بالوفرة والنظافة. بعد اكتشاف الفعل الكهروضوئي أصبح من الممكن تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء، فظهرت عدة أبحاث في هذا المجال في مطلع الخمسينات وطورت عدة أجهزة عرفت بالخلايا الشمسية، خصصت الأوائل منها لأبحاث الفضاء ثم عممت لاستخدامات أخرى.

من بين هذه الخلايا نذكر على سبيل المثال الخلية الشمسية لخلايا الارسال مع الاتصال الخلفي والتي هي محل بحثنا هذا الذي نظمناه على النحو الآتي:

1. دراسة نظرية وصفية للخلايا الشمسية بصفة عامة.
2. دراسة وصفية و محاكاة لخلايا الارسال مع الاتصال الخلفي باستعمال برنامج المحاكاة سيلفاكو (أبعاد الخلية و نسبة الشوائب المضافة لإثراء رقائق السليكون).

مفاتيح الكلمات: الخلايا الكهروضوئية ، المحاكاة، سيلفاكو أطلس، خلية ارسال مع الاتصال الخلفي