



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DEPARTEMENT DE
TECHNOLOGIE

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

CELLULE SOLAIRE TANDEM A COUCHE MINCE

Présenté par :

- Bakir Abdel djalil
- Bougrine Abdelkhaliq
- Chikhi Amin

Soutenu le : ...//2020..... devant le Jury :

<i>M. TOUMI</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Sekkal M. C.</i>	<i>MAA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>
<i>Dr. Ziani Z.</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force et l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Mes remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr Zakarya Ziani Maître de Conférences au Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naâma, qui par ses enseignements et ses conseils m'a été un guide précieux dans l'aboutissement de mes travaux de recherches de mémoire de Master et dans l'élaboration de ce modeste manuscrit, et pour la manière dont il a encadré mes travaux, avec bonne humeur, rigueur scientifique et enthousiasme. J'ai eu beaucoup de chance de travailler avec lui. Je lui suis sincèrement reconnaissante pour son soutien constant et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail. Sa disponibilité, sa modestie et ses compétences m'ont été très précieuses.

Je remercie très chaleureusement Monsieur Toumi Khaled Maître de Conférences au Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naâma pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Mes remerciements les plus élogieux à :

Monsieur Sekkal Mohammed Chakib Maître Assistant au Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naâma, pour avoir bien voulu examiner ce travail.

Je tiens à remercier, par ailleurs tous ceux et celles qui m'ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier tous mes enseignants du primaire à l'Université, en passant par le moyen et le secondaire qui m'ont donné l'éducation et les enseignements adéquats pour aboutir au ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail

Avant tout à mes chers **Parents** qui m'ont soutenu durant toutes ces années d'études et qui ont été toujours présent pour me pousser vers toujours plus loin et qui sans eux je ne serais pas arrivé à ce stade, un grand merci à eux.

Aussi et essentiellement, à mes frères et sœurs. Je remercie également tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin a fin finaliser ce projet.

Amin

Avant tout à mes chers **Parents** qui m'ont soutenu durant toutes ces années d'études et qui ont été toujours présent pour me pousser vers toujours plus loin et qui sans eux je ne serais pas arrivé à ce stade, un grand merci à eux.

Aussi et essentiellement, à mes frères et sœurs. Je remercie également tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin a fin finaliser ce projet.

Abdeldjalil

Avant tout à mes chers **Parents** qui m'ont soutenu durant toutes ces années d'études et qui ont été toujours présent pour me pousser vers toujours plus loin et qui sans eux je ne serais pas arrivé à ce stade, un grand merci à eux.

Aussi et essentiellement, à mes frères et sœurs. Je remercie également tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin a fin finaliser ce projet.

Abdelkhalik

Nomenclatures

Symboles	Notations principales
Fe	Fer
Cu	Cuivre
Au	l'or
Ag	l'argent
Al	l'aluminium
N	densité $n \approx 10^{22}$ à 10^{23} é/cm ³
ρ	La Résistivité $\Omega.cm$
SiO ₂	la silice
δ	La conductivité
Ge	Géranium
Si	Silicium
GaAs	Arséniure de gallium
GaP	Gallium phosphore
GaSb	Gallium Antimonide
InAs	Indium arsenic
InP	Indium phosphore
InSG	Indium seaborgium
Na	Sodium
Cl	Chlore
Sn	Etain
C	Carbon
Li	Lithium
K	Potassium
Hv	Photon
Bc	Bande de conduction
Bv	Bande de valence
$n(\omega)$	Etant l'indice de réfraction réelle.
$ik(\omega)$	Est l'indice d'atténuation appelé aussi coefficient d'extinctio
N_c	La densité effective d'état dans la bande de conduction,
N_v	La densité effective d'état dans la bande de valence
E_c	Le niveau énergétique du bas de la bande de conduction du semi-conducteur,
E_v	Le niveau énergétique du haut de la bande de valence du semi-conducteur,
E_{Fi}	Le niveau de fermi intrinsèque.
système CC	- Système cubique centré
système CFC	Système cubique faces centrées

N_a	concentration d'accepteurs en électron
N_d	concentration donneurs en électron
P	concentration d'accepteurs en trous
P_o	concentration donneurs en trous
Co2	dioxyde de carbone
ZnO	Zinc oxide
CdTE	Tellure de cadmium
CiGS	Copper indium gallium selenide solar
Si	Silicium
CdS	Sulfure de cadmium
CiS	Isc Courant de court-circuit [A]
Mo	Molybdène
Gl	Glucinium
Ec	Energie cinétique
Er	Erbisane
ER	Energie Ronouvlable
RE	Rhénium
PV	Photovoltaïque
SER	Source d'énergie ronouvlable
R&D	Recherche et développement
B	Bore
N	Densité
P	Anode
Hv	Helvétium

Sommaire

CHAPITRE 1 : Généralités sur les Semi-conducteurs

I.1 Introduction.....	6
I.2 Structure de l'état solide	7
I.2.1 Réseaux cristallins	7
I.2.2 Structure cristalline	8
I.3 Propriétés optiques.....	10
I.3.1 Interaction rayonnement matière	10
I.3.1.1 Absorption fondamentale.....	10
I.3.1.2 Emission spontanée.....	11
I.3.1.3 Emission stimulée	11
I.3.2 La réflexion optique.....	11
I.3.3 L'indice de réfraction.....	12
I.4 Bande d'énergie	12
I.5 GAB direct ou indirect :.....	13
I.6 Semi-conducteur dopé et non dopé.....	14
I.6.1 Semi-conducteur intrinsèque	14
I.6.2 Semi-conducteur extrinsèque.....	15
I.6.2.1 Semi-conducteur dopé N.....	16
I.6.2.2 Semi-conducteur dopé P :	16
I.7 La jonction P-N.....	18
I.8 Conclusion	19
Bibliographie.....	20

CHAPITRE 2 : Différent types de Cellules Photovoltaïques

II.1 Introduction	24
II.2 Définition de l'énergie.....	24
II.2.1 Les types d'énergie selon ses sources.....	25
II.2.2 Les différents types d'énergie renouvelable.....	26
II.2.2.1 L'énergie solaire.....	26
II.2.2.2 L'énergie éolienne.....	27
II.2.2.3 L'énergie hydraulique.....	27
II.2.2.4 L'énergie géothermique.....	27
II.2.2.5 L'énergie biomasse.....	27
II.3 Les avantages et inconvénients communs des énergies renouvelables	28
II.4 Les avantages et inconvénients de chaque énergie renouvelable	29
II.5 Histoire de l'énergie photovoltaïque	32
II.6 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	33
II.8 Conclusion	41

CHAPITRE 3 : Simulation d'une cellule tandem par Logiciel Silvaco-Atlas

III.2 Définitions du SILVACO-ATLAS	47
III.3 Présentation du package des programmes SILVACO	47
III.3.2 Les outils interactifs	50
III.4 Présentation d'ATLAS.....	50
III.4.1 Entrées et sorties d'ATLAS	51
III. 5 Caractéristique $I = f(v)$	57

III.6 Détermination du rendement par variation du dopage et l'épaisseurs des couches de la.....	58
Première jonction	58
III. 7 Détermination du rendement par variation du dopage et l'épaisseurs des couches de la deuxième jonction.....	61
III. 8 Détermination du rendement par variation du dopage et l'épaisseurs des couches de la troisième jonction.....	62
III.9 Résultats d'optimisation :	65
III.10 Propriété optique de la structure.....	65
III.11 Conclusion.....	66

Introduction Générale

La technologie des cellules solaires a considérablement évolué depuis sa naissance au milieu du XIXe siècle.

Alors que la société cherche à réduire l'utilisation du carbone, les cellules solaires sont devenues une option de plus en plus rentable et efficace pour fournir de l'énergie verte à la fois dans les domaines de la consommation et dans les domaines liés à la défense. Les consommateurs cherchant à compenser leurs coûts énergétiques avec des installations solaires, ces derniers nécessitant des solutions d'alimentation mobiles fiables. Cette dernière technique utilise des cellules solaires multi-jonctions, qui sont plus chères mais beaucoup plus efficaces et plus denses en énergie que celles utilisées pour les applications terrestres, ce qui représente une option intéressante lors de la conception de systèmes d'alimentation par satellite.

Alors que les cellules multi-jonctions ont généralement surpassé les conceptions à cellule unique, l'efficacité de la puissance de sortie des cellules multi-jonctions continue de s'améliorer. L'efficacité globale des cellules solaires multi-jonctions est une fonction compliquée car elle dépend des matériaux utilisés pour fabriquer les cellules, de l'épaisseur de la couche, de la concentration de dopage de la couche et des aspects parasites secondaires tels que l'efficacité de la jonction tunnel.

Étant donné que la fabrication réelle de cellules solaires multi-jonctions est une opération coûteuse, il est nécessaire d'optimiser les performances des cellules via la simulation avant la fabrication. Les environnements basés sur la simulation de dispositifs à semi-conducteurs est le SILVACO ATLAS fournissent un outil pour explorer l'espace de conception de cellules solaires afin de maximiser l'efficacité des cellules solaires avant la fabrication du dispositif.

Des travaux menés précédemment ont démontré avec succès l'efficacité de SILVACO ATLAS pour l'optimisation des conceptions de cellules solaires. En 2002,

L'objectif de notre travail est d'établir de cellule solaire à quatre jonctions et d'optimiser sa conception via une méthode efficace et facilement disponible. La conception à quatre jonctions choisie était basée sur une cellule solaire à jonctions multiples conçue à l'Institut Fraunhofer pour les systèmes d'énergie solaire (ISE). La cellule à quatre jonctions fabriquée en 2016 utilisait du phosphore d'aluminium-gallium-indium (AlGaInP), du phosphore de

gallium-indium (GaInP), de l'arséniure d'aluminium-gallium-indium (AlGaInAs), de l'arséniure de gallium-indium (GaInAs) et du Ge pour former les jonctions actives. La cellule multi-jonction Fraunhofer ISE a été conçue pour résister aux radiations et a présenté une efficacité expérimentale de 20 à 24 %. Les limites de la conception liées aux pertes dans les jonctions tunnel.

Ce travail, est répartie en trois chapitres.

Le première chapitre, des généralités sur les semi-conducteurs et structure cristalline, et par la suite dans la seconde partie du travail on a parlé sur les différents types des cellules solaires 1ère, 2ème et 3ème Génération ainsi que le domain d'utilisation. La dernière partie du mémoire est les fruits d'une bonne partie de simulation et la récolte des résultats.

Chapitre I

Généralités sur les Semi-conducteurs

I.1 Introduction

Selon leurs propriétés électriques, les matériaux se répartissent en trois catégories : conducteurs, isolants et semi-conducteurs (MATHIEU, 2009).

- a. Conducteurs** : les métaux tels que le fer (Fe), le cuivre (Cu), l'or (Au), l'argent (Ag) et l'aluminium (Al) sont des conducteurs. La présence d'électrons libres dans la couche superficielle (10^{23} e/cm³ et densité $n \approx 10^{22}$) est responsable de la conductivité électrique. A température ambiante, la résistivité ρ du conducteur est très faible ($\rho \leq 10^{-5}$ Ω .cm).
- b. Isolants** : Un matériau dont la résistance spécifique ρ dépasse 10^8 Ω .cm est un isolant (un matériau qui ne conduit pas l'électricité). Dans ces matériaux ; verre, mica, silice (SiO₂), carbone (diamant)... Par conséquent, la conductivité de l'isolant est très faible ($\sigma = 1/\rho$).
- c. semi-conducteur** : Cette classe de matériaux se situe entre les métaux (conducteurs) et les isolants (non conducteurs). La résistivité ρ d'un semi-conducteur varie de 10^{-3} à 10^{+4} Ω .cm. Les électrons libres et les trous sont des porteurs de charge qui provoquent une conductivité électrique. Les semi-conducteurs peuvent contenir des impuretés endogènes (pures) ou extrinsèques (dopées). Semi-conducteurs intrinsèques : La résistivité du silicium pur est de l'ordre de $\rho \approx 10^3$ Ω .cm. Semi-conducteurs extrinsèques : La résistivité du silicium dopé au bore ou au phosphore est de l'ordre de 10^{-2} Ω .cm.

Le tableau (I.1) donne des exemples de matériaux ou de composé semi conducteur fonctionnelles éléments que le constituent et de la position de ces éléments dans le tableau de Mendeleïev(MATHIEU, 2009).

Colonne	Types	Semi-conducteur
IV		Ge, Si
III V	Binaire	GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb
	Ternaire	$Al_xGa_{1-x}As$, $GaAs_yP_{y-1}$
	Quaternaire	$Al_xGa_{1-x}As_yP_{y-1}$
II VI	Binaire	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
	Ternaire	$Cd_xHg_{1-x}Te$

Tableau 1 : exemple de semi-conducteur

I.2 Structure de l'état solide

Les matériaux solides se divisent en deux catégories principales.

- Matériau cristallin dans lequel les atomes sont régulièrement disposés aux nœuds d'un réseau périodique : Les cellules unitaires (ou motifs) se répètent régulièrement.
- Matériau amorphe. La commande est locale uniquement et ne répète pas "longue distance". Il existe quatre grandes familles de solides cristallins.(F.LEVY, 1995)
 - Dans les cristaux ioniques, tels que $\text{Na}^+ \text{Cl}^-$, les ions sont liés par l'attraction de Coulomb. Comme les électrons ne sont pas libres, ces cristaux sont isolants et très durs (les liaisons sont très fortes). Cristaux covalents (colonne IV : C, Si, Ge, Sn). Les quatre électrons périphériques sont partagés avec les quatre électrons adjacents pour former une liaison de valence.
 - Les liaisons sont plus faibles que les liaisons ioniques, et les propriétés du cristal dépendent de la "force" de ces liaisons (C diamant est isolant, Sn est conducteur). (F.LEVY, 1995)
 - Un conducteur métallique (Li, Na, K, Cu, Ag, Au) avec un électron libre par atome. Leurs points de fusion sont inférieurs aux points de fusion des cristaux covalents.
 - Cristal moléculaire(F.LEVY, 1995)

I.2.1 Réseaux cristallins

Il existe sept systèmes cristallins. (Bravais 1848) a montré qu'il existe en réalité 14 systèmes cristallins, et que tous les cristaux appartiennent à ces systèmes (Bolla M, 1997)

- **Système cubique:**

- Système cubique simple : atoms presents uniquement aux points du réseau.
- Système cubique centré (système CC) :il y a un atome supplémentaire au centre du cube.
- Système cubique faces centrées (système CFC) :chaque face comporte un atome au centre de celle-ci.

• **Système hexagonal :**

Le système hexagonal peut être démonté en prismes à base de diamant.

- Orthorhombique : Simple, deux plans centraux, plan central, centre du prisme.
- Clinolone Big System : face simple et centrée
- Système cristallin rhomboédrique : un seul système
- Système secondaire : simple et central
- Système triclinique : un seul système. Ici, nous allons introduire deux de ces systèmes, le système cubique et le système hexagonal. En fait, la plupart des métaux et des solides utilisés en dentisterie cristallisent dans ces deux systèmes.

I.2.2 Structure cristalline

Le motif, par opposition au réseau, représente le contenu du matériau cristallin. Il s'agit d'une entité purement mathématique qui représente la forme d'un édifice cristallin. Les composants de base du motif peuvent être de différents types, correspondant à différentes catégories de cristaux. (Baïlon JP, 2000)

1 - Structure cubique centrée (CC)

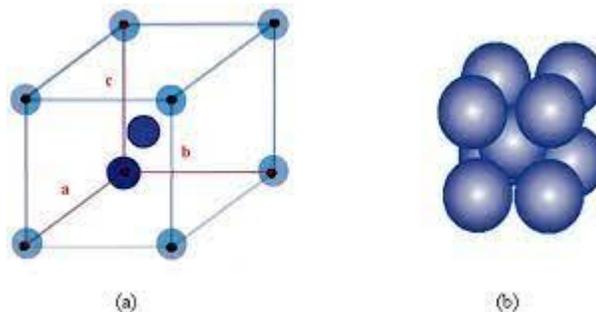


Figure 1: Structure cubique centrée (CC)

- (a) Maille élémentaire - les points noirs entourés d'un cercle bleu représentent les nœuds du réseau. Les ronds bleus foncés représentent le motif de la maille cubique = atomes ($n = 2$) - (b) représentation des atomes. Exemple de métaux : fer α et chrome.

2- Structure cubique à faces centrées (CFC)

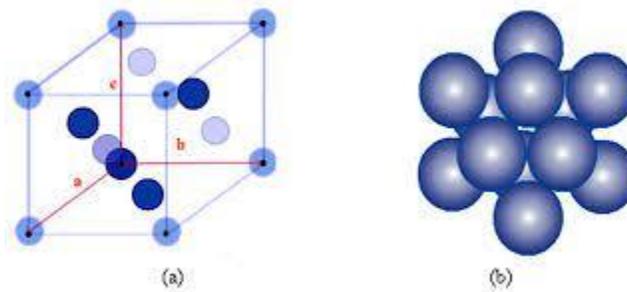


Figure 2: Structure cubique faces centrées (CFC)

- (a) Maille élémentaire - les points noirs entourés d'un cercle bleu représentent les nœuds du réseau. Les ronds bleus foncés représentent le motif de la maille cubique = atomes ($n = 4$) - (b) Représentation des atomes. Exemple de métaux : aluminium, cuivre, nickel, fer γ .

3- Structure hexagonale compacte (HC)

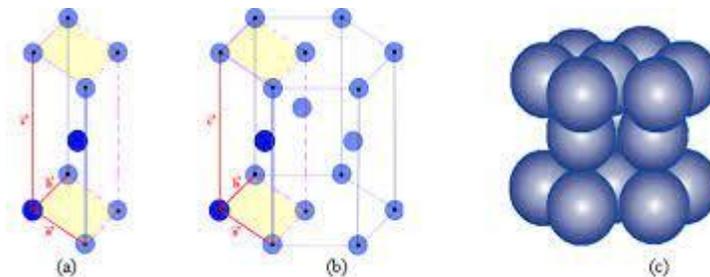


Figure 3: Structure hexagonale compacte (HC)

- (a) Maille élémentaire : prisme à base losangique. Les ronds bleus foncés représentent le motif de la maille hexagonale = atomes ($n = 2$) - (b) maille de la structure hexagonale compacte (HC) - (c) Représentation des atomes. Exemple de métaux : zinc, magnésium, zirconium α et le titane α .

I.3 Propriétés optiques

Les propriétés optiques des semi-conducteurs sont étroitement liées à leur structure électronique dans la mesure où elles impliquent des transitions entre différents états électroniques (Labidi, 2011).

Dans cette partie, la connaissance du comportement des électrons va jusqu'à expliquer comment certains solides réfléchissent la lumière et comment les solides absorbant la lumière et transparents réfléchissent la lumière.

Il existe également une explication selon laquelle certains solides peuvent émettre de la lumière dans certaines conditions. Certaines zones où la lumière réagit avec la matière sont clairement d'intérêt pratique. Les études des propriétés optiques des solides (absorption, réflexion, transmission, etc.) se sont révélées être des outils puissants pour comprendre les structures électroniques et atomiques de ces matériaux (MATHIEU, 2009).

I.3.1 Interaction rayonnement matière

La lumière interagit beaucoup avec la matière et peut être absorbée, réfléchi, déviée ou émise par la matière. Les interactions avec les atomes, notamment avec les électrons semi-conducteurs, peuvent se produire selon trois processus : l'absorption, l'émission instantanée et l'émission stimulée (Mezrag, 2012).

I.3.1.1 Absorption fondamentale

Lorsqu'un photon absorbé provoque un saut d'électron de l'état occupé de la bande de valence à l'état vide de la bande de conduction, on parle d'absorption. Ce phénomène est représenté sur la figure (4)

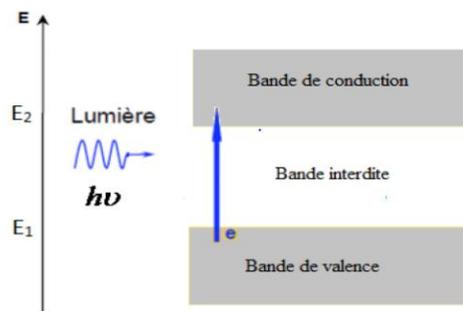


Figure 4: L'absorption fondamentale de la lumière par les porteurs.

I.3.1.2 Emission spontanée

L'émission spontanée se produit lorsque les électrons de la bande de conduction retombent spontanément à l'état vide de la bande de valence. Ce phénomène est représenté sur la figure suivante:

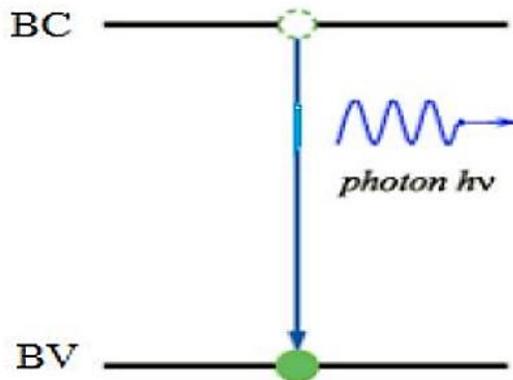


Figure 5: L'émission spontanée

I.3.1.3 Emission stimulée

L'émission est excitée lorsque les photons absorbés induisent la transition de l'électron de la bande de conduction avec l'émission du photon à l'état de bande de valence vide (Brahmi, 2013). Ce phénomène est présent sur la figure ci-contre.

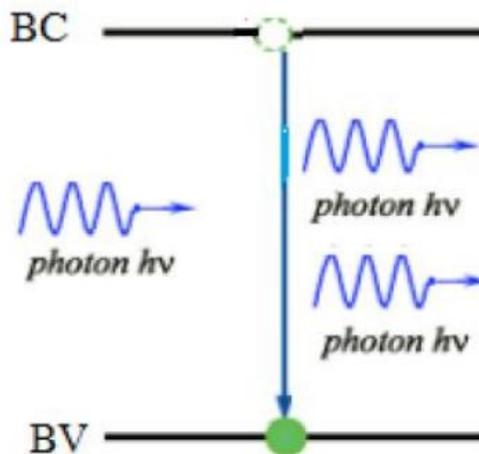


Figure 6: L'émission stimulée. (S.Adachi, 2009)

I.3.2 La réflexion optique

Si une onde plane se propage entre deux milieux avec des constantes diélectriques différents, elle sera divisée en deux, une onde réfléchie et une onde réfractée.

I.3.3 L'indice de réfraction

L'indice de réfraction est un nombre qui caractérise la puissance dont un matériau a besoin pour ralentir et dévier la lumière. Cet indice de réfraction (représenté par n) est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 299,792 \text{ km/s}$) à la vitesse de la lumière dans le matériau, et l'indice de réfraction peut s'exprimer sous une forme complexe comme suit (S.Adachi, 2009) :

$$\text{Équation 1 : } N(\omega) = n(\omega) + ik(\omega)$$

$n(\omega)$: Est l'indice de réfraction réelle.

$ik(\omega)$: Est l'indice d'atténuation appelé aussi coefficient d'extinction

I.4 Bande d'énergie

Rappelez-vous que la couche de valence d'un atome représente une bande d'un niveau d'énergie particulier et que les électrons de valence sont limités à cette bande. Lorsqu'un électron reçoit suffisamment d'énergie supplémentaire d'une source externe, il quitte la bande de valence et devient un électron libre, qui peut exister dans la bande dite de conduction. (Brahmi, 2013)

En ce qui concerne l'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction s'appelle la bande interdite. C'est en fait l'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction. Lorsqu'un électron entre dans la bande de conduction, il se déplace librement dans le matériau et ne se lie plus à l'atome de la particule.

La figure 7. : montre les diagrammes d'énergie pour un isolant, un semi-conducteur et un conducteur. Notez à la partie a) le vaste écart énergétique entre les bandes. Les électrons de valence ne peuvent sauter vers la bande de conduction sauf lors d'une détérioration provoquée par des tensions extrêmement élevées appliquées au matériau. À la partie b), on remarque qu'un

semi-conducteur possède un écart énergétique plus restreint, permettant à quelques électrons de sauter vers la bande de conduction et de devenir des électrons libres. Par contraste, la partie c) illustre les bandes énergétiques se chevauchant dans un conducteur. Dans un matériau conducteur, il existe toujours un grand nombre d'électrons libres.

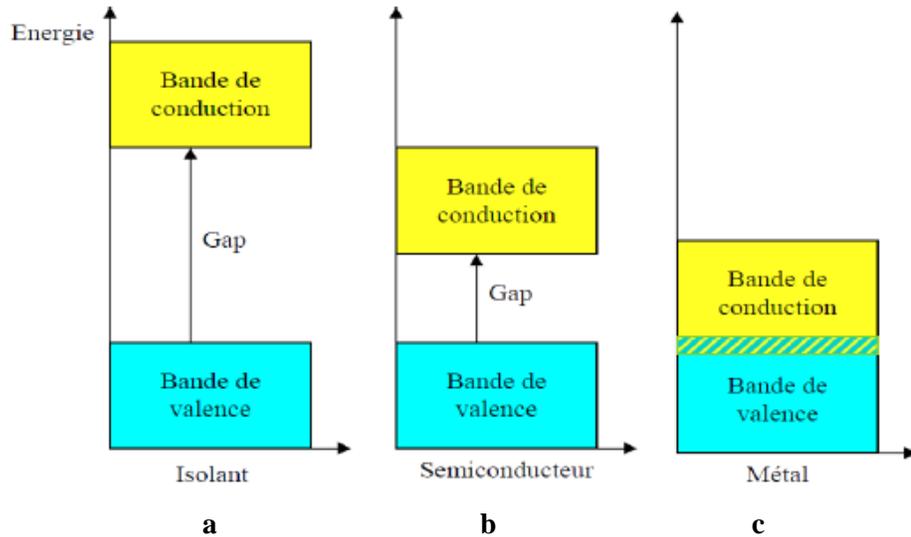


Figure 7:Représentation Des Bandes D'énergie

I.5GAB direct ou indirect :

Les semi-conducteurs sont caractérisés par la différence d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence et sont appelés bande interdite ou gap. L'écart est la largeur de la bande interdite, c'est-à-dire la différence d'énergie entre le minimum absolu de la bande de conduction et le maximum absolu de la bande de valence. Plus cette bande interdite est grande, meilleure est l'isolation du matériau. Cet écart correspond à l'énergie nécessaire au système pour déplacer les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction.

La structure de bande représentée sur la Figure (I.8) montre deux types de base de semi-conducteurs. Les semi-conducteurs à gap direct sont des semi-conducteurs dans lesquels la valeur minimale absolue de la bande de conduction et la valeur maximale absolue de la bande de valence sont proches du vecteur d'onde k , et les semi-conducteurs dont les valeurs extrêmes sont à des valeurs différentes du vecteur d'onde k . Représente une lacune indirecte (Kittel, 2013).

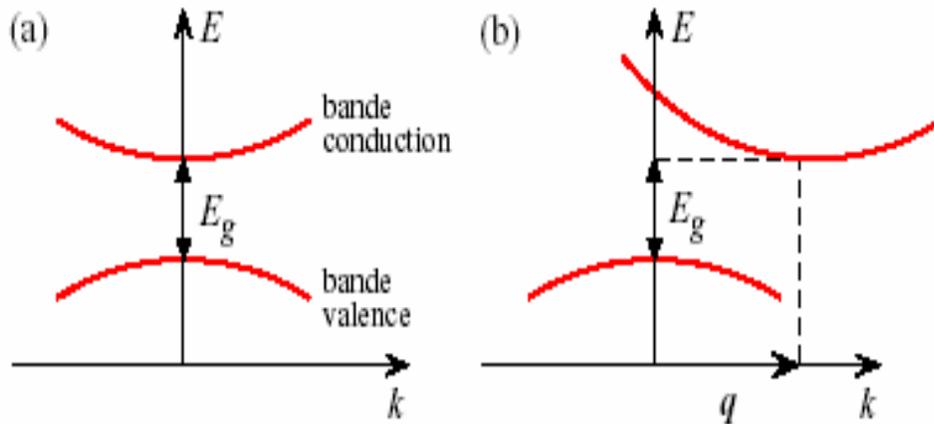


Figure 8: Structure De Bande Schematique D'un Semi-Conducteur(A) GAP DIRECT, (B) GAP INDIRECT.(Kittel, 1972).

I.6 Semi-conducteur dopé et non dopé

I.6.1 Semi-conducteur intrinsèque

Les semi-conducteurs intrinsèques sont des semi-conducteurs sans impuretés qui peuvent modifier la densité des porteurs de charge (purs). Les électrons dans la bande de conduction ne peuvent être générés que par excitation thermique des électrons liés dans la bande de valence. Par conséquent, le nombre de trous et d'électrons est le même.(Kittel, 1972).

$$\text{Équation 2 : } n = p = n_i$$

n_i : densité de porteurs de charge unique. C'est une caractéristique des semi-conducteurs à des températures spécifiques (MATHIEU, 2009).

Cette densité de porteurs intrinsèques est une fonction exponentielle du gap du matériau et de la température. A la température ambiante on obtient :

Matériaux	Si	Ge	GaAs	InP	GaP
$n_i (cm^{-3})$	10^{10}	2.10^{13}	3.10^6	3.10^7	1

Tableau 2: La densité de porteurs Intrinsèque de quelques Semi-Conducteurs.

Avec :

$$\text{Équation 3 : } N = N_c \exp \frac{[E_c - E_{fi}]}{KT}$$

$$\text{Équation 4 : } P = N_v \exp \frac{[E_v - E_{fi}]}{KT}$$

Et

$$\text{Équation 5 : } N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n * KT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$\text{Équation 6 : } N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p * KT}{h^2} \right)^{3/2}$$

Où :

N_c : La densité effective d'état dans la bande de conduction,

N_v : La densité effective d'état dans la bande de valence,

E_c : Le niveau énergétique du bas de la bande de conduction du semi-conducteur,

E_v : Le niveau énergétique du haut de la bande de valence du semi-conducteur,

E_{Fi} : Le niveau de fermi intrinsèque.

Le niveau de fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est toujours très voisin du gap à la température ambiante.

$$\text{Équation 7 : } E_{Fi} = (E_c + E_v)/2$$

I.6.2 Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé avec des impuretés spécifiques, et en contrôlant des atomes spécifiques pour introduire des impuretés, les propriétés électriques du semi-conducteur changent considérablement. Ce processus étant appelé « dopage », il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques, le type N et le type P (MATHIEU, 2009).

I.6.2.1 Semi-conducteur dopé N

Le matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est très supérieure à la concentration en trous.

Par conséquent, la concentration du donneur est supérieure à la concentration de l'accepteur ($N_d - N_a > 0$). Cela correspond à la définition de semi-conducteur dopé n.

À la température ambiante pratiquement, tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_d , la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera:

$$\text{Équation 8 : } n = n_0 + N_d$$

Où est la densité (Kittel, 2013) d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous

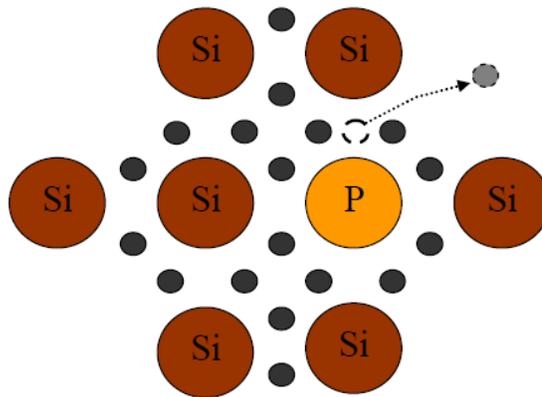


Figure 9: Dopage D'un Monocristal De Silicium Par Un Atome De Phosphore, Dopage Donneur De Type-N (Khalil, 2018)

I.6.2.2 Semi-conducteur dopé P :

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons.(Kittel, 2013)

La concentration d'accepteurs sera donc supérieure à la concentration donneurs :

$$\text{Équation 9 : } (N_a - N_d >) 0$$

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé p, la concentration en trous du semi-conducteur sera :

$$\text{Équation 10 : } P = P_0 + N_a$$

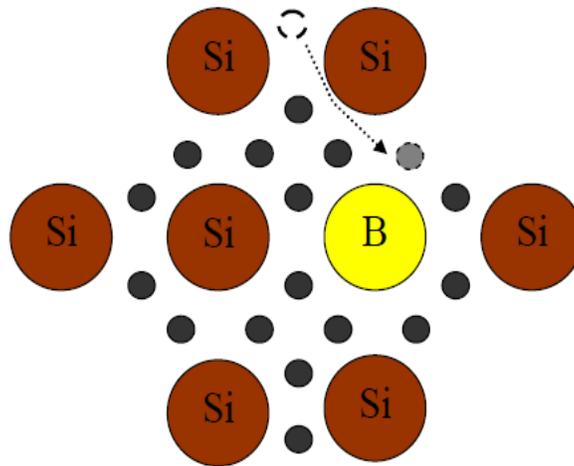


Figure 10: Dopage D'un Monocristal De Silicium Par Un Atome De Bore, Dopage Accepteur De Type- (Khalil, 2018)

Remarque :

Le dopage affecte les bandes de valence et de conduction en rendant leurs extrémités plus grandes ou plus petites. Le dopage de type N abaisse la bande de conduction et le dopage de type P élève la bande de valence. Dans les deux cas, les bandes interdites sont réduites et le confinement électronique est plus facile (Kittel, 2013).

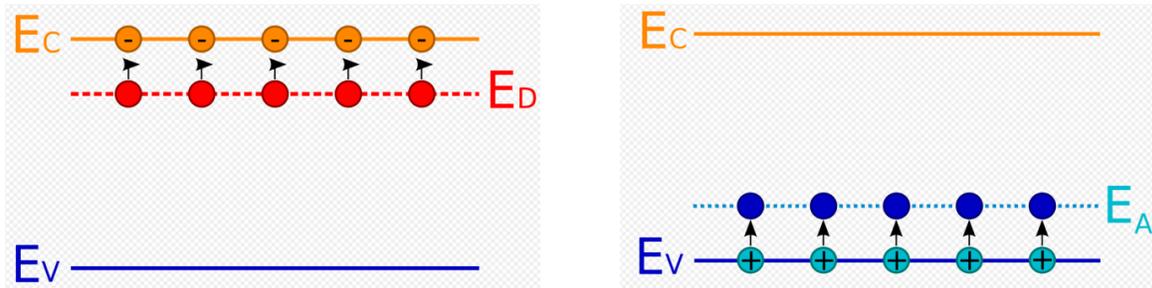


Figure 11: Effet du dopage de type n et p sur les bandes de conduction et de valence. (.kittel, 1972 - 2022)

I.7 La jonction P-N

De tous les dispositifs à semi-conducteurs, les jonctions PN sont un composant essentiel pour les deux, car elles peuvent comprendre leur application directe et de nombreux autres dispositifs en comprenant leur physique. La jonction P-N est composée de cristaux semi-conducteurs dans lesquels la concentration en impuretés profondes change avec x et passe de la région de type P à la région de type N (MATHIEU, 2009).

Lorsque le premier entre en contact avec le second, les électrons en excès dans le matériau de type N (Espace_réservé2) diffusent dans le matériau de type P, la première région dopée N est chargée positivement et la première région dopée P. est chargée négativement. Par conséquent, un champ électrique est créé entre eux, repoussant les électrons dans la zone N et repoussant les trous dans la zone P. Une jonction (appelée P-N) s'est formée.(Amel, 2016)

La région de charge non nulle est appelée région de charge d'espace (ZCE) (Fig.12). Les diodes sont obtenues en ajoutant des contacts métalliques dans les régions n et p.

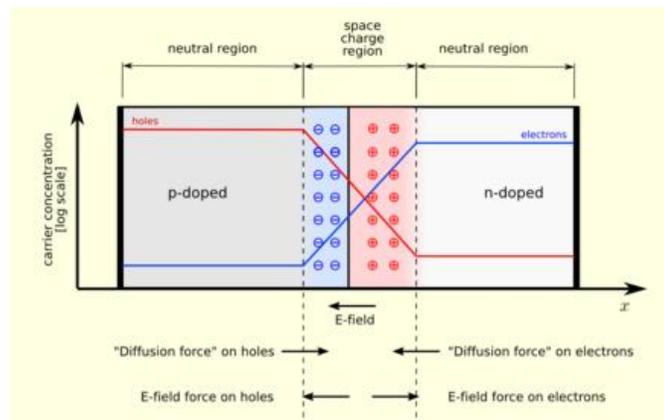


Figure 12: Jonction P-N

À structure de la jonction P-N peut être :(Amel, 2016)

- Jonction abrupt

Une jonction P-N est de type abrupt si la quantité $N_d - N_a$ est constante et positive dans la zone P et elle constante et négative dans la zone N.

- Jonction graduelle

Une jonction est dite progressive linéaire si la quantité $N_d - N_a$ suit la loi linéaire suivante

$$\text{Équation 11: } N_d - N_a = C_x$$

Où : C est une constante positive.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous rappelons quelques termes usuels pour les semi-conducteurs (en particulier les semi-conducteurs III-V). Ce chapitre a également décrit certaines propriétés optiques.

La technologie des semi-conducteurs a connue les avancées industrielles les plus puissantes de ces deux dernières décennies, car elle possède de multiples caractéristiques qui peuvent être utilisées pour de multiples applications, notamment dans le domaine de l'optoélectronique, compte tenu de la large gamme de technologies. Elle continuera d'être un outil indispensable pour le développement de l'économie moderne. Connaître les propriétés de ces matériaux est important pour évaluer leurs domaines d'application.

Bibliographie

- Kittel, C. 1972 - 2022.** Introduction à la physique de l'état solide . Paris : Dunod , 1972 - 2022.
- Amel, BENYAGOUB. 2016.** Simulation des propriétés électriques et optiques de la cellule . MOSTAGANEME : s.n., 2016.
- Baïlon JP, Dorlot JM. 2000.** Des matériaux. 3e éd. Montréal. Ed. Presses Internationales Polytechnique, 2000. . s.l. : 3e éd, 2000.
- Bolla M, Leforestier E., Muller M, Puysefur V. 1997.** Structure des biomatériaux. Encyclopédie Médico-Chirurgicale (Elsevier : Paris), Odontologie, 23-063-A-10, 1997. Elsevier : Paris : s.n., 1997.
- Brahmi, B.N. 2013.** Thèse doctorat, Univ Abou Bakr Belkaid Tlemcen (2013). TLEMEN : s.n., 2013.
- F.LEVY.** Physique et technologie des semi-conducteurs, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (1995) .
- Haudin JM. 2002.** Notions fondamentales sur les matériaux dentaires. Structure des métaux et alliages. SNPMD Editeur, 1984. 2002.
- Khalil, Le Khouimes Ahmed. 2018.** Simulation d'une cellule photovoltaïque. Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued : s.n., 2018.
- Kittel, C. 7eme édition.** physique de l'état solide. 2013 : Dunod, 7eme édition.
- Labidi, [8] M. 2011.** Thèse Doctorat, Univ Badji Mokhtar Annaba (2011). ANNABA : s.n., 2011.
- MATHIEU, H. 2009.** Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques. Paris : Dunod, 2009.
- Mezrag, F. 2012.** Thèse de doctorat, Univ Mohamed Khider Biskra (2012). BISKRA : s.n., 2012.
- S.Adachi. 2009.** « Properties of Group IV, III-V and II-VI Semi-conducteur », Wiley, . 2009.

Liste des figures

FIGURE 1: STRUCTURE CUBIQUECENTREE (CC).....	8
FIGURE 2: STRUCTURE CUBIQUE FACES CENTREES (CFC).....	9
FIGURE 3: STRUCTURE HEXAGONALECOMPACTE (HC)	9
FIGURE 4: L' ABSORPTION FONDAMENTALE DE LA LUMIERE PAR LES PORTEURS.	10
FIGURE 5: L'EMISSION SPONTANEE	11
FIGURE 6: L'EMISSION STIMULEE. (S.ADACHI, 2009).....	12
FIGURE 7: REPRESENTATION DES BANDES D'ENERGIE.....	13
FIGURE 8: STRUCTURE DE BANDE SCHEMATIQUE D'UN SEMI-CONDUCTEUR (A) GAP DIRECT, (B) GAP INDIRECT (.KITTEL, 1972 - 2022).....	14
FIGURE 9 : DOPAGE D'UN MONOCRISTAL DE SILICIUM PAR UN ATOME DE PHOSPHORE, DOPAGE DONNEUR DE TYPE-N (KHALIL, 2018).....	16
FIGURE 10 : DOPAGE D'UN MONOCRISTAL DE SILICIUM PAR UN ATOME DE BORE, DOPAGE ACCEPTEUR DE TYPE- (KHALIL, 2018).....	17
FIGURE 11 : EFFET DU DOPAGE DE TYPE N ET P SUR LES BANDES DE CONDUCTION ET DEVALENCE. (.KITTEL, 1972 - 2022)	18
FIGURE 12: JONCTION P-N	18

Liste des Equations

ÉQUATION 1 : $N\omega = n\omega + ik\omega$	12
ÉQUATION 2 : $n = p = ni$	14
ÉQUATION 3 : $N = N_{C} \exp \left(\frac{E_C - E_F}{kT} \right)$	15
ÉQUATION 4 : $P = N_{V} \exp \left(\frac{E_V - E_F}{kT} \right)$	15
ÉQUATION 5 : $N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$	15
ÉQUATION 6 : $N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$	15
ÉQUATION 7 : $E_F = E_C + E_V/2$	15
ÉQUATION 8 : $n = n_0 + N_D$	16
ÉQUATION 9 : $N_A - N_D > 0$	17
ÉQUATION 10 : $p = p_0 + N_A$	17
ÉQUATION 11: $N_D - N_A = C_x$	19

Liste des Tableaux

TABLEAU 1 : EXEMPLE DE SEMI-CONDUCTEUR.....	6
--	---

TABLEAU 2: LA DENSITE DE PORTEURS INTRINSEQUE DE QUELQUES SEMI-CONDUCTEURS. 14

Chapitre II

Différent types de Cellules Photovoltaïques

II.1 Introduction

Le terme énergie renouvelable est employé pour désigner des énergies qui, à l'échelle humaine au moins, sont inépuisables et disponibles en grande quantité. Ainsi il existe cinq grands types d'énergies renouvelables : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leur caractéristique commune est de ne pas produire, en phase d'exploitation, d'émissions polluantes (ou peu), et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique

Les énergies renouvelables ont des avantages et des inconvénients, mais les avantages l'emportent sur les inconvénients

II.2 Définition de l'énergie

Tout d'abord, étymologiquement, le terme énergie vient du mot latin grec ancien « énergeia ».

« Énergeia » qui signifie « action de force ». En conséquence, nous pouvons donner quelques définitions à l'énergie. Prenons ce qui a été exprimé par la proposition suivante.

"L'énergie désigne simplement et généralement tout ce qui permet de faire un travail, de générer de la chaleur, de la lumière et du mouvement." (Randrianarisoa, 2013)

L'énergie est la capacité du corps ou du système à effectuer des tâches qui peuvent générer du mouvement, de la chaleur ou des ondes électromagnétiques (y compris la lumière)." (Alcen, 2014)

L'intérêt de ces définitions réside dans le fait que l'on peut distinguer l'existence de plusieurs formes d'énergie. Les six principales catégories sont l'énergie mécanique, chimique, électrique, thermique, nucléaire et rayonnante.

II.2.1 Les types d'énergies selon leurs sources

Il existe deux types d'énergie : les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables. Cette classification est due à la source d'énergie.

- L'énergie non renouvelable est l'énergie provenant de sources d'énergie qui ne sont utilisées qu'une seule fois et ne peuvent pas être régénérées par l'homme. Ces sources sont principalement des combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, et l'uranium. L'énergie renouvelable, quant à elle, provient de sources

d'énergie à régénération rapide. Normalement, ce sont des phénomènes naturels, ces sources d'énergie sont donc considérées comme inépuisables. Plus précisément, considérez les définitions suivantes :

1. Les énergies renouvelables sont des énergies primaires inépuisables à très long terme, car issues directement de phénomènes naturels, réguliers ou constants associés aux énergies solaires, terrestres ou gravitationnelles.(Ene)
2. L'énergie est dite "renouvelable" tant qu'elle dépend du système.
3. Écologie de la terre, rayonnement solaire et énergie géothermique.
(Hrubesch, 2011)

En plus de ces deux types d'énergie, il existe quatre types d'énergie pour la déclinaison :

- L'énergie primaire, c'est-à-dire l'ensemble des produits énergétiques bruts directement ou importés.
- L'énergie secondaire libérée et acquise par la conversion de l'énergie primaire.
- Énergie finale convertie en énergie utile sur le lieu d'utilisation,
- Et l'énergie utile, qui est le service énergétique recherché.

Pour mieux comprendre ces formes de perte d'énergie, regardons l'exemple suivant. L'énergie primaire est le débit d'eau de la rivière qui fait tourner les pales de la turbine, et le mouvement est l'énergie secondaire. Ce mouvement fait tourner un générateur, produit de l'électricité, qui est l'énergie finale, et utilise cette électricité à la maison pour produire quelque chose d'utile : l'énergie qui allume une lampe.

II.2.2 Les différents types d'énergie renouvelable

La famille des énergies renouvelables comprend l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, Ceux-ci sont présentés successivement.

II.2.2.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire provient du rayonnement du soleil et la chaleur du soleil dans les photons(lep, 1995) est utilisée pour générer de l'électricité, qui est de l'énergie solaire photovoltaïque et la chaleur est de l'énergie solaire thermique.

Il existe deux types de techniques qui utilisent le rayonnement solaire. Il existe des technologies actives et passives. Le premier consiste à convertir l'énergie solaire sous une

forme électrique ou thermique directement utilisable. La seconde, en revanche, consiste à pratiquer l'orientation correcte du bâtiment par rapport au soleil, en utilisant des matériaux spécifiques et des modèles architecturaux de la maison ou du bâtiment pouvant utiliser l'énergie solaire.

II.2.2.1.1 Lesolairephotovoltaïque

C'est Edmond Becquerel qui découvre la cellule solaire en 1839. Les cellules solaires étant des panneaux qui captent le rayonnement solaire, les photons contenus dans le rayonnement sont convertis directement en électricité par ces cellules solaires dans ces panneaux. L'électricité générée peut être utilisée directement ou stockée dans une batterie pour une utilisation ultérieure. L'électricité produite par l'énergie solaire peut être autonome ou connectée à un réseau.

II.2.2.1.2 Lesolairethermique

L'énergiesolairethermiqueest principalement utilisée pour l'eau et le chauffage. Le principe est similaire à la production d'énergie photovoltaïque, où un capteur absorbe les photons et les convertit en chaleur. Par conséquent, les matériaux qui composent le capteur doivent être très absorbants. La chaleur piégée est transportée vers le réservoir de stockage via un liquide, généralement de l'eau ou un gaz. Il existe différents systèmes de captage et de stockage de la chaleur, tels que les chauffe-eaux solaires à accumulation et les chauffe-eaux à siphon thermique. L'énergie solaire thermique peut également générer de l'électricité à partir d'un système d'eau très chaude via un système thermodynamique.

II.2.2.2 L'énergieéolienne

L'énergie éolienne est connue depuis des milliers d'années et est utilisée, par exemple, dans les éoliennes et les transports. Aujourd'hui, nous pouvons utiliser cette énergie grâce à des hélices spéciales qui stockent le vent et à des machines qui la convertissent en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer où le vent atteint des vitesses élevées et constantes.(Frouhat, 2012)

II.2.2.3 L'énergiehydraulique

L'eau est également une ressource renouvelable car elle se régénère à travers un cycle d'évaporation et de précipitations. Sa puissance est connue depuis des milliers d'années et est utilisée par les barrages, les moulins à eau et les systèmes d'irrigation. Certaines techniques

permettent d'utiliser l'énergie générée par la chute et le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la convertir directement en énergie mécanique (moulins à eau), tandis que les turbines et les générateurs la convertissent en électricité.(Frouhat, 2012)

II.2.2.4L'énergiegéothermique

La géothermie est une science qui étudie les phénomènes thermiques de la terre. Le principe de la géothermie est d'extraire la chaleur du sous-sol pour générer de l'énergie. Il existe trois types d'énergie géothermique En fonction de la température ultime et de son utilisation. Il y a d'abord les énergies géothermiques de haute énergie au-dessus de 180°C et les énergies moyennes entre 100°C et 180°C dont l'utilisation principale est la production d'électricité. De plus, il existe une énergie géothermique basse énergie entre 30°C et 100°C, qui est utilisée de diverses manières, notamment pour le chauffage des bâtiments, les serres et l'hydrothérapie. Enfin, il existe la géothermie très basse énergie entre 10°C et 30°C, qui est couramment utilisée pour le chauffage et la climatisation des habitations.

II.2.2.5L'énergiebiomasse

L'Agence bruxelloise pour l'environnement définit la biomasse comme : La biomasse est un carburant polyvalent. Au sens large, il comprend « tous les êtres vivants, animaux et végétaux, et leurs produits, sous-produits, déchets (excréments, etc.) ». De cette définition, on peut déduire que l'énergie issue de la biomasse provient de diverses sources organiques. Par conséquent, il existe différents types de biomasse, d'énergie produite et d'utilisations possibles. On distingue le bois énergie, le biogaz et les biocarburants qui permettent de produire de la chaleur, de l'électricité ou de l'énergie chimique. L'énergie de la biomasse est discutée en détail dans le dernier chapitre de la partie 2.(Maitrise, 2014)

II.3 Lesavantagesetinconvénientscommunsdesénergiesrenouvelables

Analysons enpremierles avantagespuislesinconvénients.

3.1. Lesavantages

Le premier avantage des ER est bien sûr le fait qu'elles sont renouvelables et respectueuses de l'environnement. En effet, contrairement aux énergies d'origine fossile, elles peuvent être considérées comme inépuisables. Actuellement, dans le phénomène du changement

climatique, en particulier dans le réchauffement climatique causé par la pollution causée par les émissions de CO₂ provenant de sources d'énergie non renouvelables. Les alternatives Energie renouvelable aidera à lutter contre ce réchauffement en réduisant ces émissions. Ainsi, RE contribue à protéger les droits des générations futures à l'environnement et aux ressources de la planète.

Deuxièmement, le secteur des énergies renouvelables à la possibilité de créer de nombreux emplois directs et indirects dans le secteur primaire, secondaire ou tertiaire. "D'autre part, la conservation de l'énergie, les énergies renouvelables et le recyclage créent de nouveaux emplois dans les pays développés. (Meunier, 2011) Et cette création d'emplois se produit non seulement dans les pays développés mais aussi dans les pays en développement. La possibilité de transférer la production d'énergie à petite échelle est également avantageuse.

Un autre avantage des énergies renouvelables est la possibilité de compléter une variété de sources d'énergie. En fait, différentes sources peuvent être utilisées de manière complémentaire. Par exemple, l'énergie solaire peut être utilisée pour fournir de l'électricité et de la chaleur, et l'énergie éolienne peut être utilisée pour pomper l'eau à la maison. Il est logique d'utiliser une combinaison d'énergies renouvelables. "L'originalité des énergies renouvelables réside dans leur dilution et leur variété. Il serait ridicule de vouloir répondre à la demande d'une de ces sources." (Meunier, 2011)

Les appareils ER ont généralement une longue durée de vie et peuvent être considérés comme l'un des avantages.

3.2. Les inconvénients

L'inconvénient des ER est principalement économique. En plus de cela, il y a toujours un coût élevé pour acheter un système d'énergie renouvelable. B. Prix des panneaux solaires ou des éoliennes. Le problème du stockage de l'énergie continue également d'être un inconvénient qui fait l'objet de la recherche d'innovation d'aujourd'hui.

II.4 Les avantages et inconvénients de chaque énergie renouvelable

Chaque ER présente bien des avantages propres, mais aussi des inconvénients.

- **L'énergie solaire**

Il y a beaucoup de choses sur les avantages de l'énergie solaire :

- Le premier avantage est bien sûr qu'il s'agit d'une énergie d'écosystème qui ne produit pas de gaz à effet de serre.
- La durée de vie du panneau PV ou du chauffe-eau solaire est d'environ 20 ans, ce qui est suffisant pour amortir le coût. Si la centrale est raccordée au réseau, elle peut être vendue en cas de surproduction d'électricité.
- C'est aussi une source d'énergie électrique totalement silencieuse, mais ce n'est pas le cas des éoliennes par exemple.

Après tout, tant que le soleil brille, il peut être considéré comme une source d'énergie inépuisable. Certains des inconvénients sont :

- Premièrement, l'énergie ne peut pas être générée la nuit ou par temps nuageux.
- L'autosuffisance en électricité coûte encore cher, surtout dans les pays en développement, car le prix des appareils reste élevé.
- D'après cela, la fabrication des modules PV est hautement technique et nécessite des coûts d'investissement élevés.

-En raison de la faible production de modules PV, l'énergie PV convient aux projets à faible demande. B. Le rendement des maisons unifamiliales et des cellules solaires diminue avec le temps.

- **L'énergie éolienne**

Les éoliennes, contrairement aux panneaux solaires, l'avantage de générer de l'électricité de manière aléatoire en fonction de la vitesse du vent. Les éoliennes peuvent produire de l'électricité les jours nuageux et la nuit.

Il y a quelques inconvénients :

- Les éoliennes ont été critiquées pour la pollution sonore. Mais aujourd'hui, les nouveaux modèles d'éoliennes fabriqués avec une technologie innovante sont peu bruyants, et il existe également des normes concernant l'emplacement des centrales éoliennes, comme ne pas construire de centrales éoliennes à moins de 500 mètres. Aires résidentielles ;
- Les éoliennes ont également été accusées de polluer le paysage, mais c'est une question de goût.

- Des mesures ont été prises pour protéger l'impact des éoliennes sur les animaux, en particulier les oiseaux.

- **L'énergie hydraulique**

Pour l'énergie hydraulique, il y a deux avantages principaux.

- ✓ D'un point de vue environnemental, l'énergie produite est certainement très propre. De plus, il peut aussi être très fréquent, notamment dans les zones aux réseaux d'eau denses.
- ✓ Les coûts et les prix de l'énergie sont également très bas par rapport aux autres énergies. Cependant,

Il présente également les inconvénients suivants :

- ✓ Les problèmes se posent d'un point de vue environnemental. En effet, les barrages peuvent bouleverser l'équilibre écologique entre l'amont et l'aval de ce dernier. Cela signifie la nécessité de recherches sérieuses. Cela comprend également la mise en œuvre des mesures trouvées.
- ✓ La construction de grands barrages peut également impliquer des migrations de population en amont ou en aval du barrage. Par conséquent, il faut leur donner de nouveaux logements et de nouveaux emplois en échange de ce qu'ils ont abandonné pour être évacués.

- **L'énergie géothermique**

La plupart des avantages de l'énergie géothermique sont partagés avec d'autres sources ER. Cependant, la production d'électricité à partir de ressources géothermiques doit être effectuée dans des endroits spécifiques. Cela limite sa capacité à se déplacer. L'installation nécessite également beaucoup d'espace libre, empêchant la possibilité de planter des plantes dans et autour du site d'installation.

- **L'énergie biomasse**

Les bénéfices de l'énergie issue de la biomasse ne sont pas minces :

- ✓ Contrairement aux idées reçues, la bioénergie, lorsqu'elle est utilisée de manière

durable et renouvelable, ne contribue pas au réchauffement climatique en raison du cycle neutre du carbone. « Le bois est un bel exemple de filière de développement durable. Si le bois produit du CO₂ lorsqu'il brûle, il ne contribue pas à l'effet de serre car le CO₂ généré lors de la combustion est évacué de l'atmosphère au fur et à mesure que l'arbre grandit. (Meunier, 2011)est possible et ne se produit que si les normes de gestion forestière sont respectées. "Cet idéal suppose que le développement forestier respecte la régénération forestière.(J. Kerbrat, 1993).

- ✓ La biomasse est biodégradable, ce qui réduit le risque de pollution. En plus de cela, il peut être utilisé dans les centrales électriques à biomasse, réduisant ainsi l'accumulation de déchets et de déchets dans les décharges.
- ✓ Contrairement aux combustibles fossiles, la production de biomasse est locale, ce qui réduit les coûts de transport et la pollution. En outre, ce changement réduira la dépendance du pays vis-à-vis des producteurs de pétrole et améliorera la sécurité de l'approvisionnement.

En cas d'inconvénients :

- L'énergie de la biomasse consiste à utiliser du bois non encore traité, c'est-à-dire non recouvert de peinture ou de vernis, pour éviter de dégager des produits chimiques nocifs pour le corps humain. Le principal inconvénient de l'utilisation de la biomasse est que le bois est principalement utilisé. Cela signifie que les forêts peuvent être surexploitées et que l'environnement peut être détruit. Cependant, bien que les combustibles et les matériaux utilisés soient principalement d'origine végétale, il peut en résulter une négligence des cultures vivrières, ce qui se traduira par des pénuries alimentaires et une détérioration de la vie personnelle.(Maitrise, 2014)

II.5 Histoire de l'énergie photovoltaïque

1954-2000 : La conquête du photovoltaïque

- En 1954, les Bell Labs ont introduit les premières cellules solaires pour alimenter les appareils électroménagers.
- En 1958, Vanguard 1 est le premier satellite à embarquer un module photovoltaïque.

- Dans les années 1960, l'utilisation de l'énergie solaire pour les satellites se généralise. Embarqués sur des fusées et déployés en orbite terrestre, les modules PV prouvent leur robustesse et leur fiabilité.
- Depuis les années 1970, des modules PV ont été développés pour des applications terrestres et maritimes. Ils permettent d'alimenter des zones reculées non alimentées par le réseau électrique, comme des balises de haute mer et des relais de communication en plein désert. Les modules PV sont utilisés dans les conditions les plus difficiles. En mer, il est exposé aux tempêtes et aux dégâts du sel. Dans le désert, ils sont exposés à des températures extrêmes et à des cycles de chaleur très sévères, avec une chaleur intense pendant la journée succédant à des nuits très froides.
- Le premier bâtiment entièrement alimenté à l'énergie solaire a été construit en 1974 à Albuquerque, au Nouveau-Mexique. Ce qui était impensable est devenu réalité. L'énergie solaire peut couvrir la totalité des besoins énergétiques d'un bâtiment. (htt)

2000-2012 : L'industrialisation du photovoltaïque

- Après la signature du protocole de Kyoto en 1997, des réflexions ont été engagées dans les grands pays développés pour trouver des solutions concrètes au problème des émissions de gaz à effet de serre. Cela comprend la réduction de l'utilisation des combustibles fossiles. L'énergie solaire est considérée comme l'une des technologies les plus prometteuses. Pour compenser des coûts encore élevés, des mécanismes d'incitation financière ont été mis en place au Japon et en Allemagne en 2000, puis progressivement dans la plupart des grands pays développés.
- Ces incitations incluent souvent le principe des "frais d'achat". L'électricité produite par les panneaux PV est achetée à un prix fixe supérieur au prix du marché pendant une durée suffisante pour assurer la rentabilité de l'investissement. C'est le début du développement de l'énergie solaire connectée au réseau. En France, après des incitations initialement insuffisantes, le « tarif d'achat » a été relevé en 2006 à un niveau permettant au marché de décoller.
- Les mécanismes incitatifs ont accéléré la croissance de l'industrie photovoltaïque. Le nombre de modules solaires produits dans le monde a été multiplié par 2500 entre 1996 et 2016. Cette croissance exponentielle du marché mondial a favorisé l'émergence de nouveaux fabricants et a conduit à d'énormes investissements en R&D. Ces efforts ont amélioré les

performances des panneaux et rationalisé le processus de fabrication. Dans le même temps, la taille moyenne de l'unité de production de modules PV a augmenté.

- Parallèle, la taille moyenne des unités de fabrication de panneaux photovoltaïques à Cvieillissementdelacellule(Cid, 2006).

II.6 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule solaire est un dispositif qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation repose sur trois mécanismes :

- ✓ Absorption des photons (énergie supérieure à l'entrefer) par les matériaux qui composent le dispositif.
- ✓ Conversion de l'énergie photonique en énergie électrique. Cela correspond à la formation de paires électron/trou dans les matériaux semi-conducteurs.
- ✓ Une collection de particules générées par l'appareil.

Par conséquent, les matériaux qui composent une cellule solaire doivent avoir deux niveaux d'énergie et être suffisamment conducteurs pour que le courant circule. Par conséquent, l'intérêt des semi-conducteurs est croissant pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique est nécessaire pour dissocier les paires électron/trou générées. La connexion P est la plus couramment utilisée pour cela. N. D'autres structures telles que les hétérojonctions et Schottky peuvent également être utilisées.

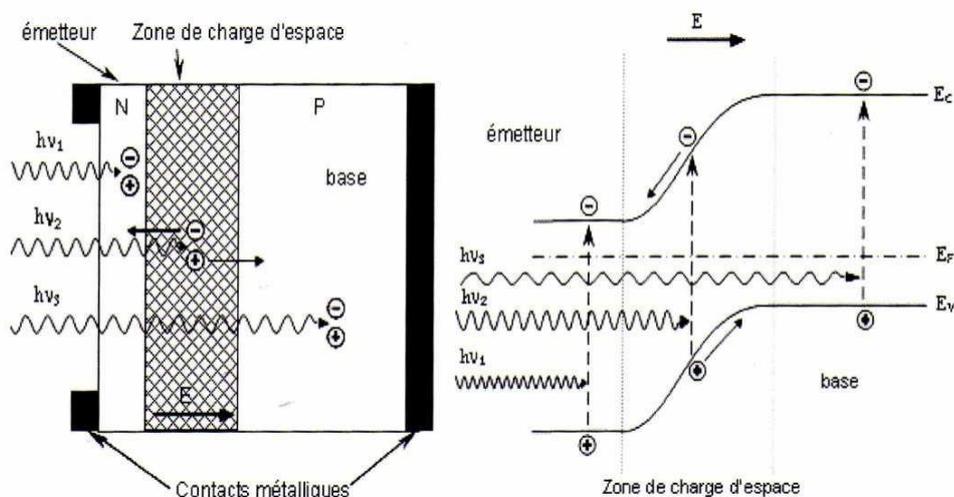


Figure 1: Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque (KAMELIA, 2012).

Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées

Les photons incidents génèrent des porteurs de charge dans les régions N et P, ainsi que dans la région de charge d'espace. Les supports photo se comportent différemment selon la région.

1. Dans la zone N ou P, les porteurs de charge minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "transmis" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou N (pour les électrons), où ils forment un grand nombre. Un photo courant diffus est généré
2. Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou générées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons se déplacent vers la région N, les trous se déplacent vers la région P et des photo courants sont générés (Oleksiy, 2005).

II.7 Les différents types de cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques et vous pouvez choisir parmi plusieurs types de cellules solaires, telles que le silicium monocristallin, le silicium polycristallin, le silicium amorphe et même le CdTe. Ensuite, il y a le domaine des cellules solaires organiques.

De plus, le choix de la cellule dépend de la durabilité et du prix de la cellule. Figure 2. Affiche l'évaluation du marché de diverses cellules solaires jusqu'en 2012.

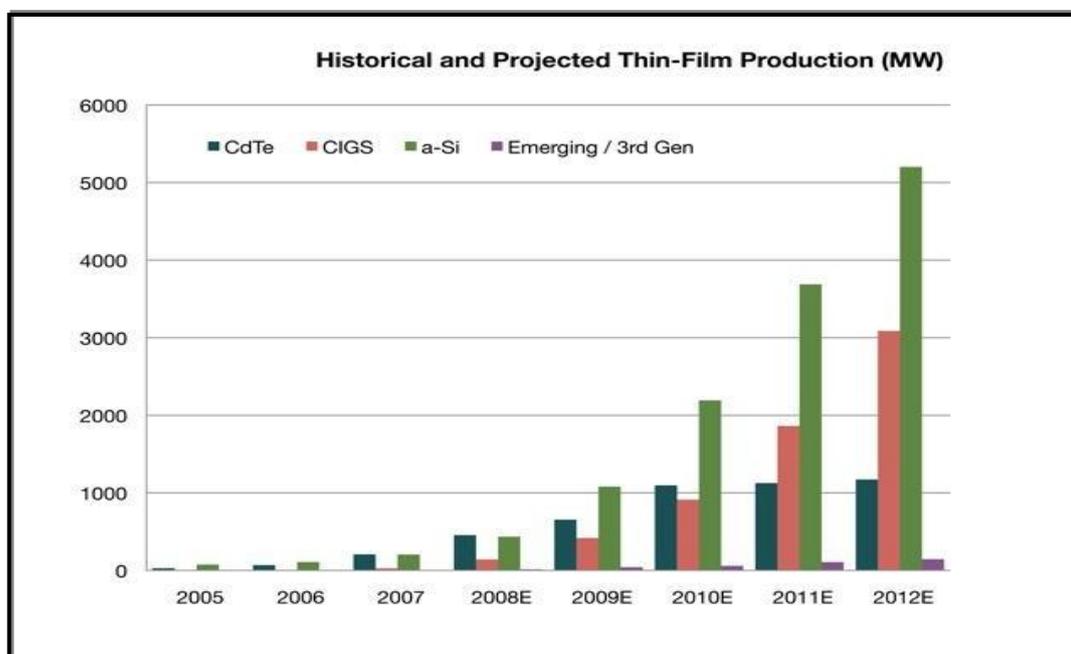


Figure 2: Part du marché des différentes technologies solaires(*Kho, 2003*).

II.7.1 Générations des cellules photovoltaïques

II.7.1.1 Première génération

a) Les solaire photovoltaïque à base de silicium

La technologie à base de silicium représente plus de 90 % du marché mondial du PV (Fraunhofer, 2016). Les premières cellules solaires au silicium ont été fabriquées dans les laboratoires Nokia Bell aux États-Unis en 1954 avec une efficacité de 6 %. (D.M.Chapin, 1954) Cette puce à base de silicium cristallin comprend des monocristaux et des poly cristaux



Figure 3: Cellules à silicium polycristallin et monocristallin(*KRARROUBI, 2018*).

Cette matrice présente plusieurs avantages, notamment : Avec une longue durée de vie et un rendement de 12 à 20 % (imp), les inconvénients sont :

- (a) Il n'absorbe presque pas de lumière.
- (b) L'épaisseur est nécessaire pour augmenter la pureté de la cristallinité.
- (c) Coût élevé.

b) Cellule monocristalline

Il s'agit d'une industrie photovoltaïque historique. Les cellules monocristallines sont des cellules solaires de première génération. Ils sont constitués de blocs de silicium cristallisé en un seul composant. Ils ont de bons rendements, mais le processus de fabrication est fastidieux et coûteux. Il s'agit d'une calculatrice de poche et d'une cellule dite « horloge solaire ».

c) Cellule polycristalline

Les cellules polycristallines sont constituées de blocs de silicium constitués de plusieurs cristaux. Ils sont moins efficaces que les cellules monocristallines, mais ils sont moins chers à fabriquer. Les progrès technologiques ont permis de fabriquer des cellules à couches minces polycristallines pour économiser le silicium. L'épaisseur de ces cellules est de l'ordre de quelques microns. Au cours de la dernière décennie, le rendement moyen des modules solaires à base de silicium polycristallin est passé de 12 % à 17 % (Pierre Pétrequin).

II.7.1.2 Deuxième génération

a) Cellule à couches minces

Les cellules solaires de deuxième génération sont littéralement plus minces. Ils ne font que quelques micromètres d'épaisseur, ils sont donc légers et particulièrement souples. Les cellules solaires cristallines telles que la durabilité établie de longue date (Si amorphe, sulfure de cadmium (CdS), tellure de cadmium (CdTe), alliages de cuivre, d'indium et de sélénium CIGS et CdTe) ont dominé le marché mondial grâce à elles. Surtout pour leurs bonnes performances.

b) Cellule photovoltaïque à silicium amorphe

Ce sont des cellules en silicone souples et robustes qui peuvent être installées sur des surfaces courbes ou en toiture. Cette option offre une couverture à 100 %. Leurs rendements de conversion sont de l'ordre de 10 %. Elle est certainement beaucoup plus faible que les cristaux. Cependant, ils doivent être utilisés lorsque les besoins en énergie sont minimes. Plus de surface est nécessaire pour obtenir la même puissance émise par le cristal. Cependant, les

avantages sont une résistance aux hautes températures et un fonctionnement à faible luminosité. Leur poids relativement léger ne nécessite pas de test de stabilité. Les cellules solaires amorphes sont constituées de gaz de silicium. Ce gaz peut être injecté tout au long du processus dans une variété de substrats tels que des plaques de verre, des plastiques souples et même des métaux.

Évaporation sous vide. La couleur de la cellule est gris foncé. Les cellules solaires de cette catégorie sont des types de cellules à faible coût. Les fabricants de petits appareils électroménagers utilisent l'énergie solaire au quotidien. Il s'agit par exemple d'une calculatrice de poche ou d'une montre solaire. Il est pratique car il ne nécessite pas beaucoup de soleil. Par contre, il faut noter que cette cellule est peu performante. C'est environ 7-8%. La durée de vie de ces plaques est également très limitée. Les utilisateurs peuvent utiliser le produit de manière optimale jusqu'à 10 ans. Figure : Cellule en silicium amorphe.



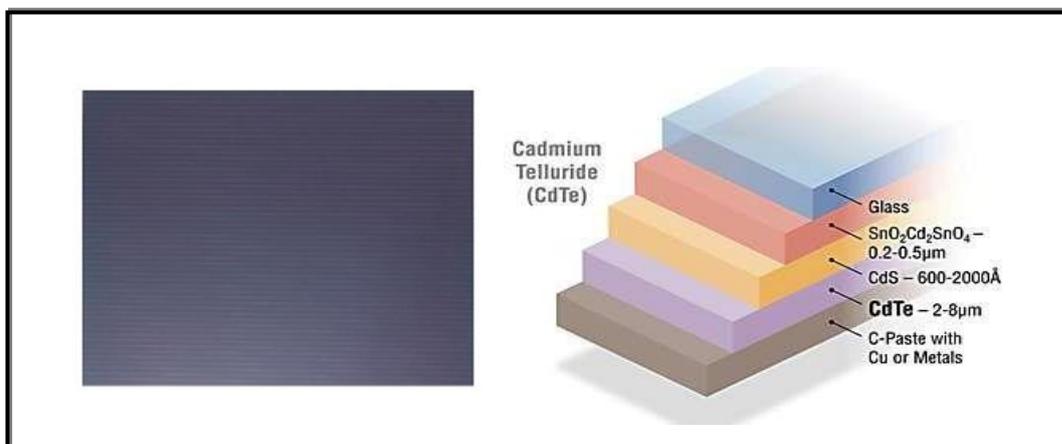
Figure 4: Cellule à silicium amorphe(KRARROUBI, 2018).

c) Cellule photovoltaïque encouchemince de CdTe

Ce type de cellule solaire n'est pas en silicium. Son ingrédient de base est le tellurure de cadmium. La couche absorbante résultante est placée sur un substrat en verre puis recouverte d'une autre plaque de verre pour sceller le vitrage. CdTe est une technologie qui augmente l'efficacité des panneaux solaires tout en réduisant les coûts en raison de leur meilleure capacité d'absorption de la lumière et de leur coefficient thermique plus faible. Le principal inconvénient est la toxicité des produits entrant dans la fabrication de ce type de panneau

solaire. Il est important de noter que les cellules à couches minces CIS sans silicium représentent l'avenir des cellules solaires (Lep, 2010). Le cuivre indium sélénium, la matière première utilisée pour fabriquer ces cellules, est plus facilement disponible que le silicium. Leur production reste également plus écologique que ces dernières (ElJouad.Z, 2016).

De plus, leur efficacité est supérieure important. Pour cette raison, il est probable que la majorité des futurs modules PV seront constitués de cellules à couches minces sans silicium. De plus, de nombreuses entreprises de ce secteur recherchent déjà des modèles expérimentaux très sophistiqués qui pourraient entrer en production continue dans les années ou les mois à venir. Dans tous les cas, les cellules solaires, qu'elles soient monocristallines ou polycristallines, offrent un rendement important . Ce qui suit s'applique : plus la cellule solaire



est puissante, plus le coût d'installation est élevé. Cependant, plus la cellule solaire est puissante, plus elle produira de l'électricité rapidement. Par conséquent, choisir la bonne performan(Lep, 2010)ce nécessite de se concentrer sur le besoin réel de l'énergie requise, du moins jusqu'à ce qu'un véritable équilibre soit trouvé en termes de coût et de performance.

Figure 5: Cellules CdTe en couches minces(KRARROUBI, 2018).

d) Cellule photovoltaïque en couche mince de CIGS

Matériau Le cuivre indium gallium sélénium est utilisé comme semi-conducteur

La cellule CIGS résultante est une hétérojonction polycristalline.

Ces cellules peuvent être créées par impression (pulvérisation) ou dépôt sous vide, qui est une méthode relativement économique.

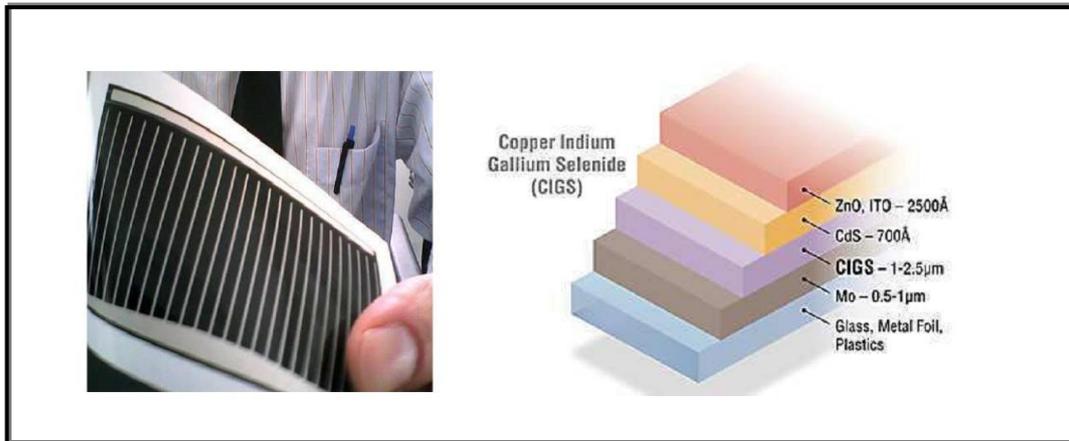


Figure 6: Cellules CIGS en couches minces(KRARROUBI, 2018).

II.7.1.3 Troisième génération:

(a) Cellule photovoltaïque organique

Les cellules solaires organiques sont des cellules solaires dont la couche active est composée d'au moins des molécules organiques. Leur développement est probablement une tentative de réduire le coût de l'énergie solaire, qui est probablement le principal obstacle à cette technologie, mais elle devrait également être élastique, mais plus fine, plus flexible, plus facile et moins chère à fabriquer. En fait, les cellules solaires organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des nombreuses simplifications possibles dans le processus de fabrication (SAIDANE, 2004). Les premières cellules solaires organiques sont apparues en 1985 (officiellement annoncées dans *Applied Physics Letters* en 1986) et avaient une efficacité d'environ 1 %. (H. Spanggaard, 2004) Cependant, la première percée dans cette technique a été réalisée par Sariciftci et al., en 1992. (N.S. Sariciftci, 1992) Fabrication de dispositifs constitués d'hétérojonctions entre polymères donneurs d'électrons et fullerènes accepteurs d'électrons (Mercier, J.P).

Cette technologie a été introduite par Scharber et al. en 2006. (M.C. Scharber) ont créé un modèle empirique démontrant que les cellules solaires organiques peuvent atteindre une efficacité énergétique de 10 %. H Deux fois plus efficace que les appareils de l'époque (enerzine, 2018).

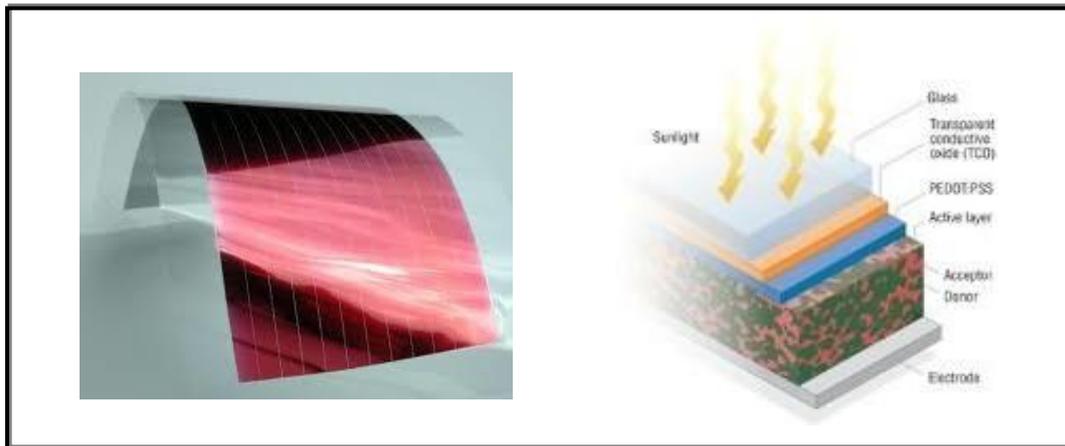


Figure 7: Cellule solaire organique en couches minces(KRARROUBI, 2018).

Le tableau ci-dessous donne le comparatif des rendements des différents types de cellules.

Type	cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)	Niveau développement
1ère génération				
Silicium monocristallin	24.70%	22.70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20.30%	16.20%	11-15%	Production industrielle
2e génération				
Silicium amorphe	13.40%	10.40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9.40%	7%	Production industrielle
CIS	19.30%	13.50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16.70%		6-9%	Prêt pour la production
3e génération				
Cellule organique	5.70%			Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8.40%		Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production exclusivement applications spatiales

Tableau 1:: Comparatif des rendements des différents types de cellules(José Miguel Navarro, 2008).

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé, les types et les sources d'énergies renouvelables, ainsi que les avantages et les inconvénients de chacune. Par la suite on à donner l'histoire des systèmes photovoltaïques, les différents types de cellules photovoltaïques et leurs fonctionnements, enfin on à citer les différents génération des cellules photovoltaïques : (première génération :le solaire photovoltaïque à base de silicium ; Deuxième génération :cellule en couche minces ; troisième génération :cellule photovoltaïque organique).

Bibliographie

[Livre].

«Le photon est la particule élémentaire qui constitue le rayonnement électromagnétique [Livre].

cder [En ligne]. - www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_005_04.pdf.

D.M.Chapin Journal Applied Physics, 25, 676-677 (1954). [Livre].

ElJouad.Z Elaboration et caractérisation des cellules solaires organiques [Livre]. - Maroc : [s.n.], 2016.

Energies-renouvelables [En ligne] // <http://www.developpement-durable.gouv.f>.

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Energies-renouvelables,3733-.html>.

enerzine www.enerzine.com. [En ligne]. - www.enerzine.com.

Fondation Alcen Etude sur l'énergie à Madagascar, CREAM, Antananarivo. [Revue]. - 2014. - p. 11.

Fraunhofer ISE Photovoltaics Reports [Livre]. - 2016..

H.Spanggaard, A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics [Livre]. - 2004.

HELALIKAMELIA Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative »

Mémoire de MAGISTER [Livre]. - 2012.

Hrubesch C Les énergies renouvelables, Les bases, la technologie et le potentiel au [Livre]. -

Sénégal. PERACOD. Sénégal : [s.n.], 2011.

<https://terresolaire.com/comprendre-le-solaire/photovoltaique/histoire-du-photovoltaique/>

[Livre]. - [s.l.] : <https://terresolaire.com/comprendre-le-solaire/photovoltaique/histoire-du-photovoltaique/>.

IBID [Livre].

ifp.fr [En ligne]. - www.ifp.fr.

impression-photovoltaïque. [En ligne] // impression-photovoltaïque. - <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2010/impression-photovoltaique.htm>.

J Kho [Photovoltaïque.info Thin-film solar set to take market share from crystalline solar PV [Livre].

José Miguel Navarro Cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible [Livre]. - 2008.

TABLEAU 1: COMPARATIF DES RENDEMENTS DES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES [29]. 40

Chapitre III :

Simulation d'une cellule tandem par Logiciel Silvaco-Atlas

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une description relativement détaillée sur SILVACO-ATLAS. Notre étude est réalisée par l'application du logiciel de simulation numérique sophistiqué SILVACO-ATLAS. Le logiciel SILVACO comprend une gamme large d'étude intégrale dans l'élaboration et la caractérisation des cellules solaires. Nous, nous allons appliquer la partie SILVACO-ATLAS pour générer les résultats des caractéristiques électriques de la cellule solaire étudiée (Michalopoulos, 2002).

III.2 Définitions du SILVACO-ATLAS

SILVACO Internationale est une société de logiciels qui offre des programmes pour la modélisation et tous les domaines de l'électronique, y compris les circuits analogiques et numériques. Cette société dispose de logiciel allant de la simple modélisation Spice jusqu'aux schémas des circuits intégrés de pointe et des outils d'extraction. (P, D. Bradley, 2004).

Le logiciel SILVACO-ATLAS est un simulateur de dispositifs semi-conducteurs basé sur les principes physiques à deux et trois dimensions, ce qui signifie qu'il peut prédire les caractéristiques électriques qui sont associées aux structures physiques bien spécifiées et des conditions de polarisation. Ceci est obtenu en rapprochant le fonctionnement d'un dispositif sur une grille à deux ou trois dimensions, comprenant un certain nombre de points de grille appelés nœuds. En appliquant un ensemble d'équations différentielles, dérivées des lois de Maxwell, sur cette grille, vous pouvez simuler le transport des porteurs à travers une structure. Cela signifie que le rendement électrique d'un dispositif peut maintenant être modélisé en courant continu, alternatif ou en modes de fonctionnement transitoires (2011).

III.3 Présentation du package des programmes SILVACO

SILVACO est une société internationale Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont employés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs.

SILVACO présente un ensemble des outils de simulation interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs à semi-conducteurs VWF (Virtual Wafer Fab) .(Vieira, 2022)(Z., 2012)Les composants de base de VWF (Figure 1) sont :

1. Les outils de simulation (VWF CORE TOOLS). Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication ou soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont ATHENA, ATLAS et SDUPEM3.
2. Les outils interactifs (VWF INTERACTIVE TOOLS). Ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI). Ainsi le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficace. Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnement des outils d'automatisation.
3. Les outils d'automatisation (VWF AUTOMATION TOOLS). Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales afin de créer des résultats pour l'analyse statistique suivante. Les outils automatiques se servent de la technologie de base de données réparties et des méthodes de logiciels de développement d'interprocessus(Z., 2012).

III.3.1 Les outils de simulation ATLAS :

Simulateur physique de dispositifs à semi-conducteurs 2D ou 3D qui permet de simuler le comportement électrique de structures spécifiées des dispositifs à semi-conducteurs.

ATHENA : simulateur 2D de procédés technologiques qui permet de développer et optimiser des processus de fabrication de semi-conducteurs (les différentes étapes effectuées en Salle Blanche). Il fournit une plate-forme pour simuler l'implantation ionique, la diffusion, gravure à l'eau-forte, le dépôt, la lithographie, l'oxydation, et la silicidation des matériaux semiconducteurs. Il remplace des expériences coûteuses par des simulations.

SSUPEMS3 : simulateur de procédé 1D avec prolongements simples de simulations des dispositifs.

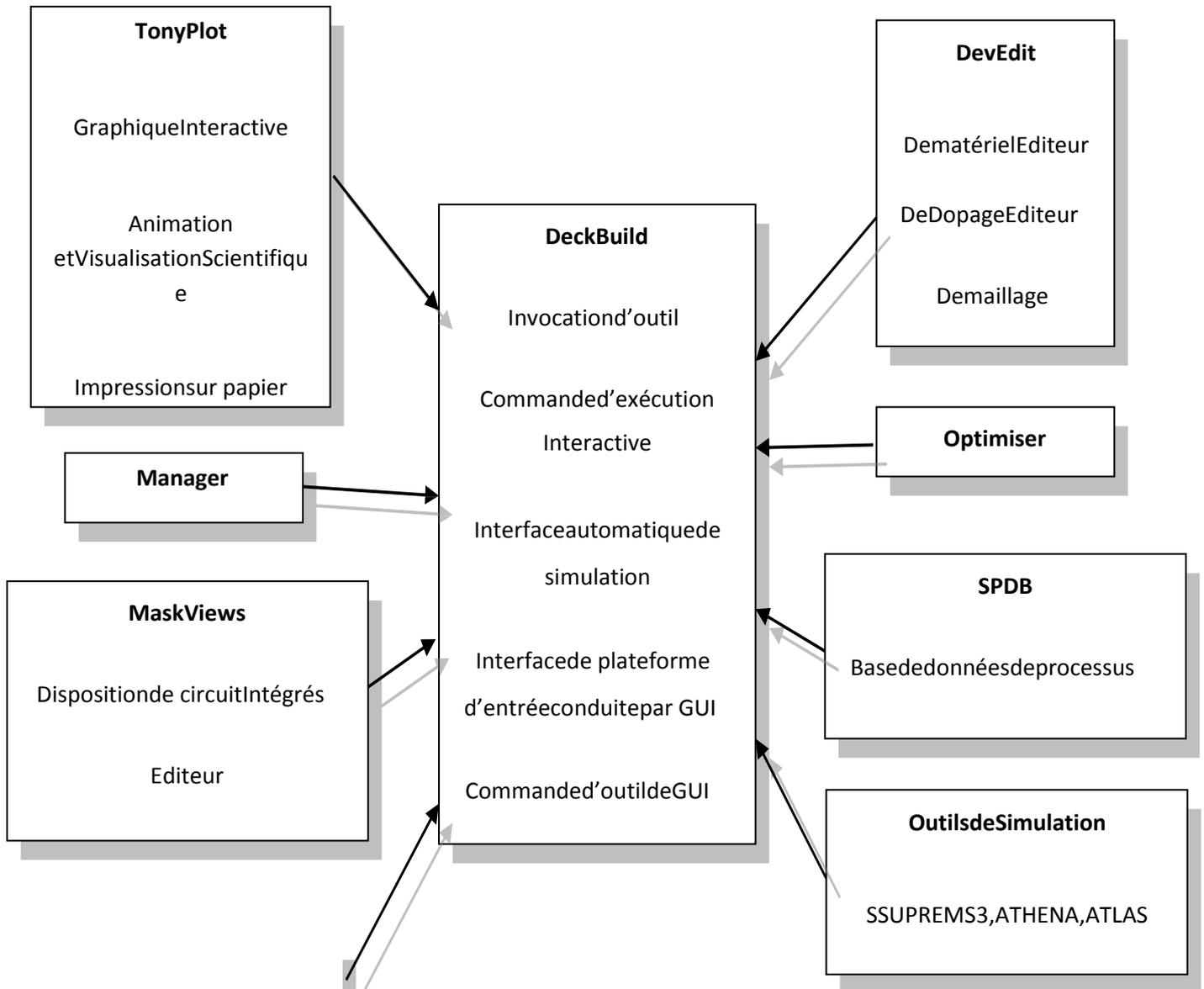


Figure 1 : Organigramme de la structure

III.3.2 Les outils interactifs

DECKBUILD :

C'est l'environnement où est défini le programme de simulation. 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 des programmes et des sauvegardes systématiques des étapes intermédiaires d'exécution.

TONYPLOT : environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, distribution de grandeurs divers dans celui-ci, caractéristiques électriques...)(D.K. Schroder, 1991).

DEVEDIT : environnement où est destinée la structure. On peut créer des nouvelles structures ou même modifier des structures existantes. On peut aussi définir des maillages ou raffiner les maillages existants.

MASKVIEWS : outil de dessin des masques (éditeur de layout).

OPTIMIZER : optimise les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons définie au préalable.

MANAGER : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.

SPDB : (Semiconductor Process Data Base), c'est un produit séparé, il n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions des expériences. Le projet réalisé dans le cadre de ce travail, a été basé principalement sur l'outil de simulation « Atlas » et sur l'environnement où est défini le programme de simulation « DeckBuild ». Une fois la simulation effectuée, la visualisation des résultats se fait via le logiciel « TonyPlot ». Par la suite nous allons développer la présentation de l'outil de simulation « ATLAS » que nous avons utilisé principalement pour effectuer la simulation de notre structure.

III.4 Présentation d'ATLAS

ATLAS est un simulateur physique 2D ou 3D des dispositifs basés sur la physique de semi-conducteur. Il prédit le comportement électrique des structures semi-conductrices spécifiées et fournit des aperçus de mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des

dispositifs. Atlas peut être utilisé autonome ou comme un outil noyau dans le milieu de simulation VWF de SILVACO. Ce simulateur est composé de deux parties : - une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...) - une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs (modèles de recombinaisons, de mobilités, ...).

III.4.1 Entrées et sorties d'ATLAS

La figure 3 montre les entrées et sorties d'atlas. La plupart des simulations réalisées par ATLAS utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier est représenté par « Fichier de commande », c'est un fichier script contenant les commandes pour qu'ATLAS s'exécute. Le second fichier est un « Fichier de structure » qui définit la structure à simuler. A la sortie d'Atlas, nous avons trois types de fichier. Le premier, est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième est le « fichier log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé. Le troisième est le « fichier de solution », ce il stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné. Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation « TonyPlot »

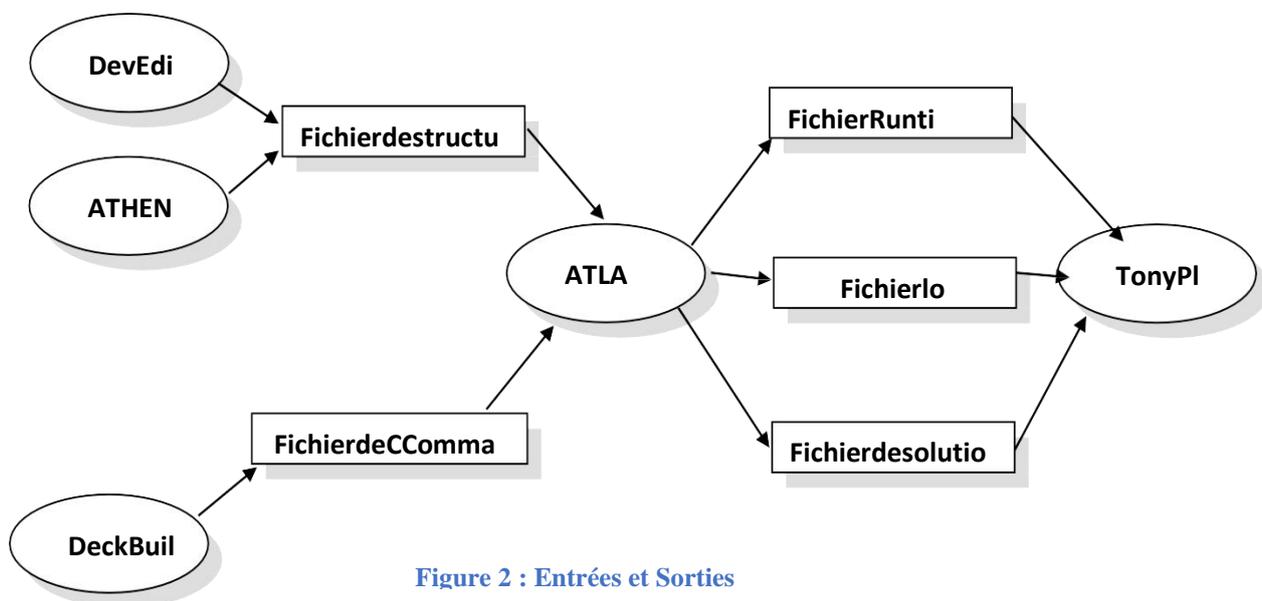


Figure 2 : Entrées et Sorties

1 .Spécification 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.

MESH (définition du maillage) : Le maillage divise la structure simulée en petites cellules pour pouvoir résoudre les équations fondamentales numériquement. L'élément de maille utilisé est le triangle. Pour assurer une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible. Par contre si le maillage est très fin, le temps de calcul est très élevé, car il y a plus d'éléments à calculer. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le temps et la précision de calcul.

REGION (définition des régions) : Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions. Dans cette partie nous définissons des régions rectangulaires, par exemple la région n°1 est définie comme un matériau de type silicium et la région n° 2 comme de l'oxyde (SiO₂), etc.. . Ainsi que les différentes dimensions sont définies en micromètre.

ELECTRODE (définition des électrodes) : La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode.

DOPING (définition des dopages) : Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc...

2. Spécification des modèles physiques

Après la construction de la structure, il est nécessaire de préciser les modèles physiques et de définir les matériaux. La spécification de modèles et matériaux comporte quatre étapes :

MATERIAL : associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. Le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semiconducteurs standard.

MODELS : Ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques (recombinaison, mobilité, etc...). Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

CONTACT : indique les attributs physiques d'une électrode (résistivité, travail de sortie,).

INTERFACE : indique les paramètres d'interface aux frontières des semiconducteurs ou des isolants. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés la où ils sont déjà indiqués.

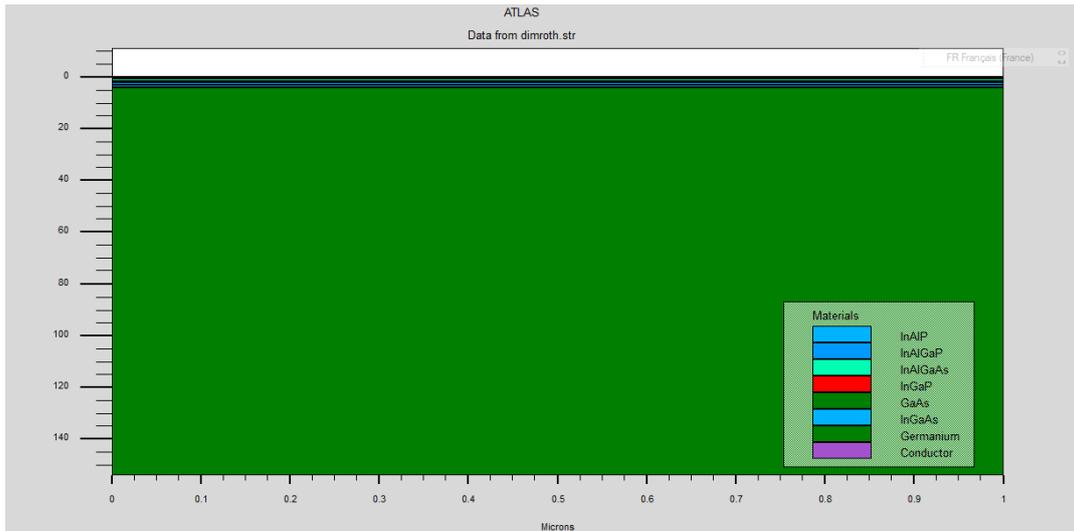


Figure 3: Structure simulée par SILVACO

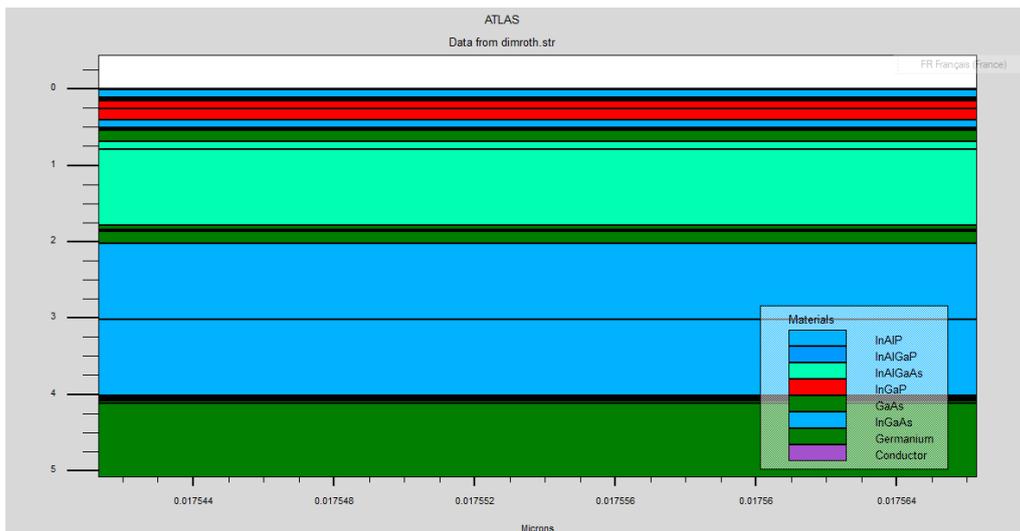


Figure 4: Structure réalisée par SILVACO

Résultat obtenue après programmation de la structure multi jonction à quatre jonctions de gap différents réalisée par SILVACO atlas, les figures ci-dessus montre la zone d'effet tunnel pour chaque jonction, à noter que le substrat c'est le germanium.

La figure 5 : représente la méthode de MESHING utilisées, la dimension de MESHING pour le calcul varie entre les régions, il est important dans minimisé l'écart de calcul dans les zones le plus important tél qu'entre jonctions ainsi qu'entre le tunnel, le MESHING n'est pas important dans la partie substrat d'où l'écart MISHING

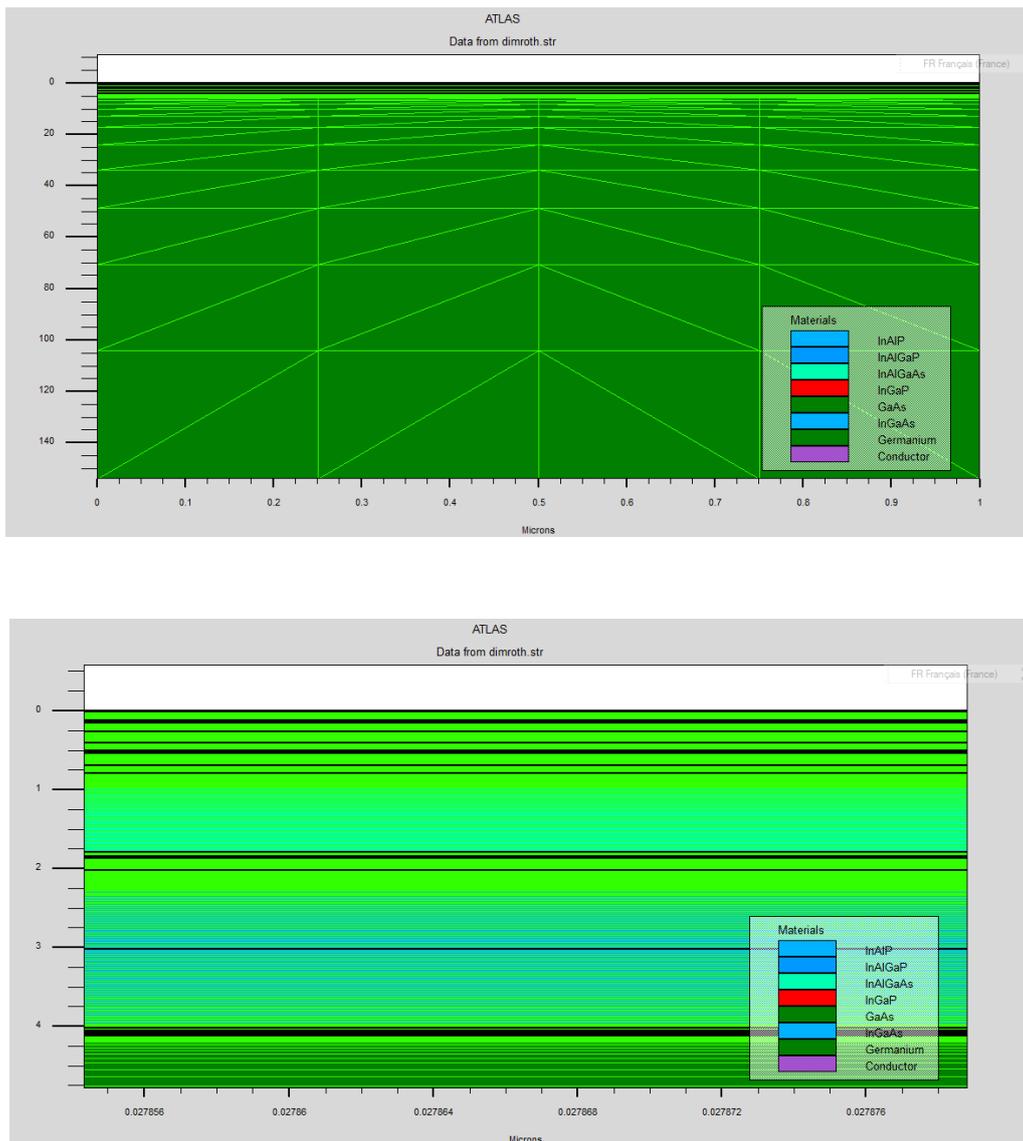


Figure 5: Meshing de la structure réalisée par SILVACO

Les figures 6, 7 représente le taux de dopage ainsi que les jonctions proposées dans la simulation, le dopage des les régions formant la jonction est le même, dans une première partie, la variation du dopage et son influence fait partie de notre simulation, et modélisation.

Le nombre de jonction varie en fonction de l'étude, notre problématique consiste a déterminé l'influence des épaisseurs des différentes couches constituant la jonction et aussi le taux de dopage idéal dans cette dernière, à noter des limites de divergence son prévue dans le calcul, par ailleurs le nombre de jonctions proposées fait partie de notre étude est son influence sur le rendement quantique fait partie de la dernière étape de simulation.

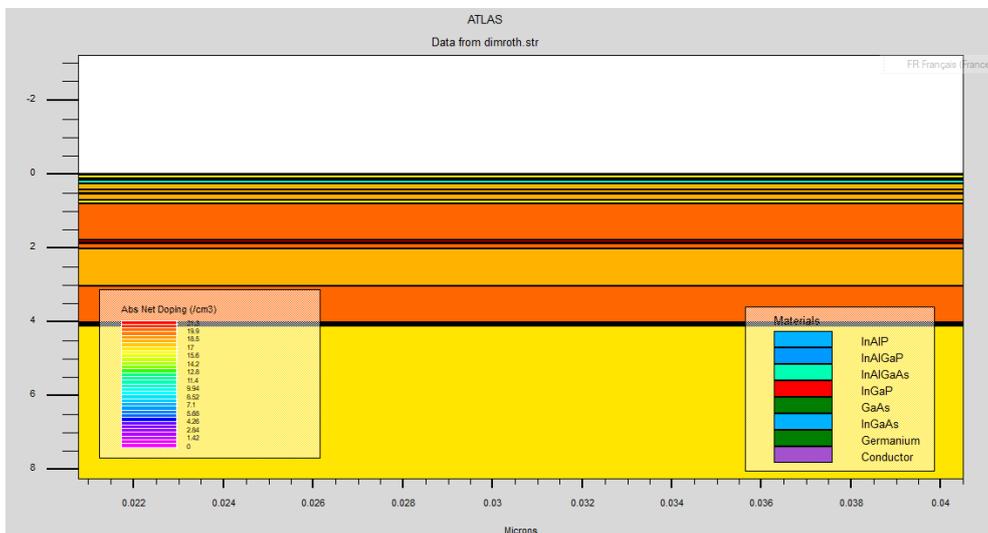
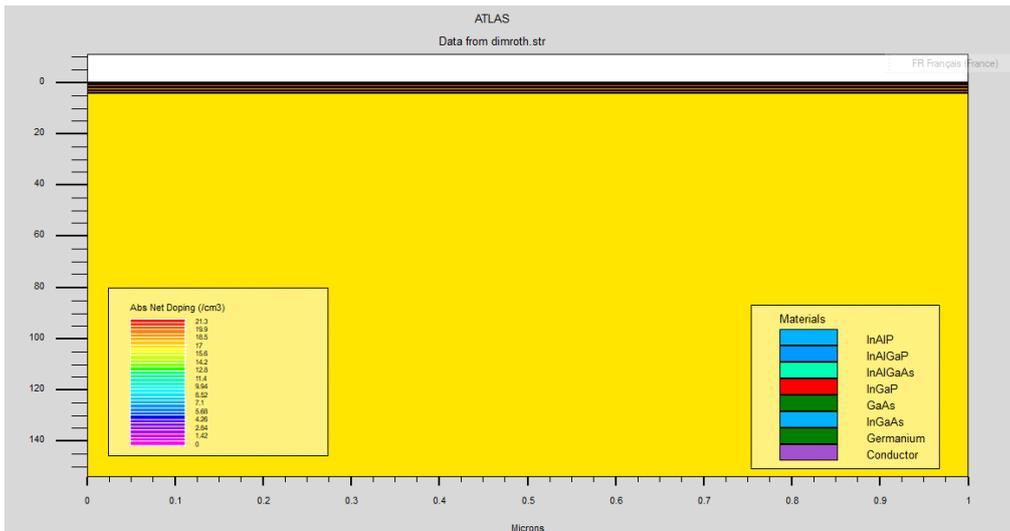


Figure 6: La quantité du dopage par régions en cm³

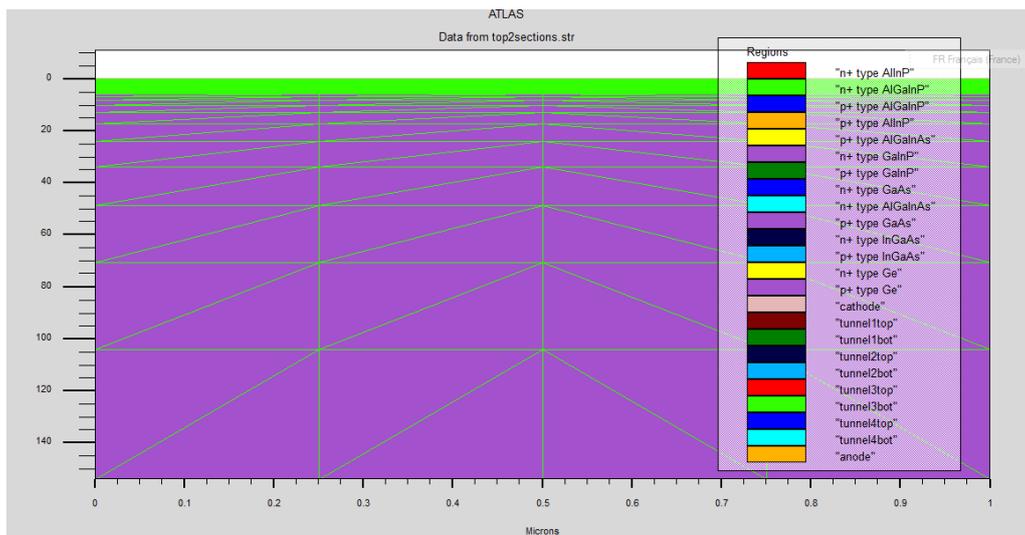


Figure 7: Jonction PN par régions réalisé par SILVACO

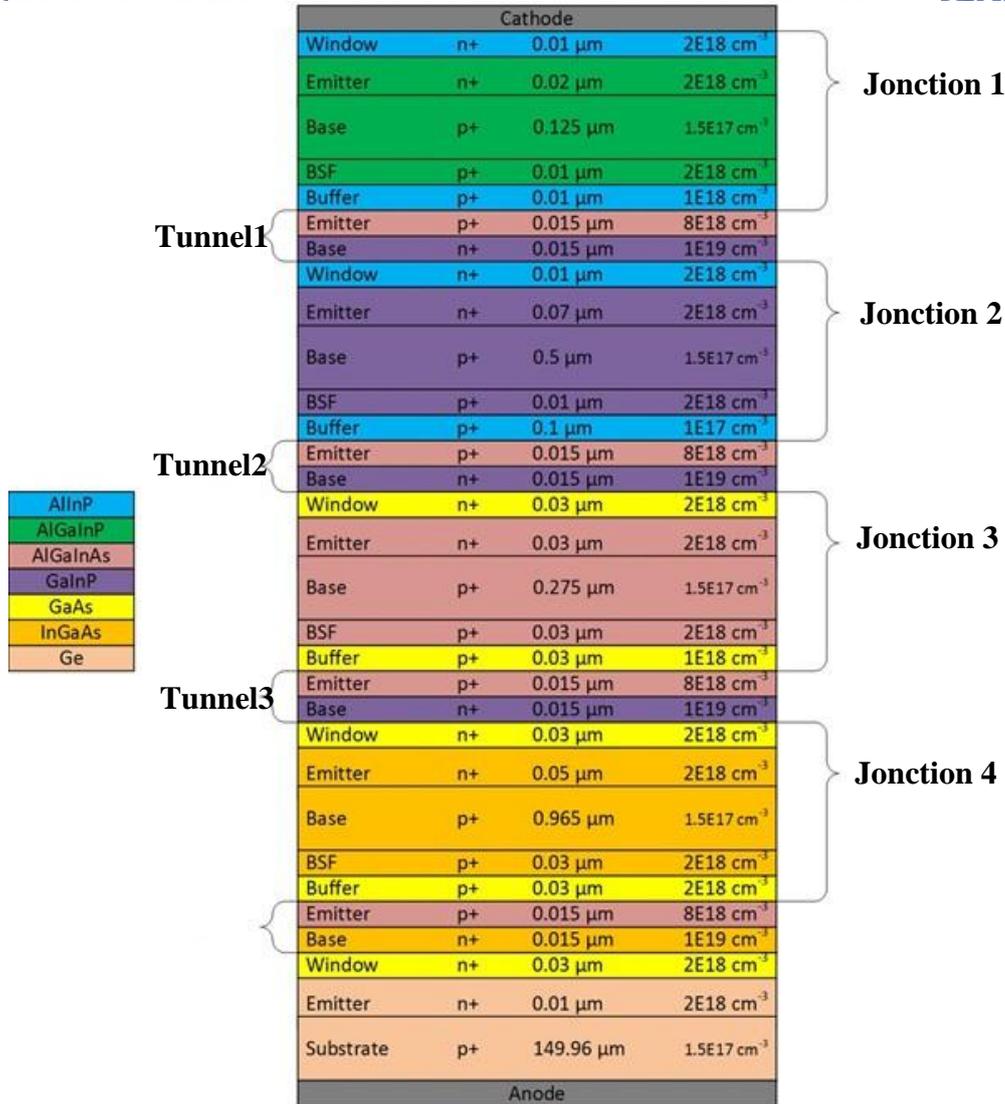


Figure 8: Structure de référence dans la simulation SILVACO(Z., 2012)

la configuration illustrée à la figure ci-dessus a été utilisée, des hypothèses ont été faites pour aider à l'optimisation tout en représentant au mieux la cellule conçue. Les concentrations et les épaisseurs de dopage ont été choisies pour correspondre (dans des limites raisonnables) à la densité de courant et à la tension en circuit ouvert obtenues. Les différentes parties (fenêtre, émetteur, base, BSF et tampon) et les concentrations de dopage initiales ont d'abord été modélisées, puis ajustées pour garantir l'obtention d'un J_{sc} et V_{oc} suffisants. Des matériaux avec des affinités et des bandes interdites similaires au maquillage majoritaire ont été sélectionnés. De plus, il était nécessaire de restreindre la fraction molaire des alliages utilisés pour s'assurer que les paramètres et les valeurs d'indice de réfraction étaient disponibles. L'épaisseur globale de la cellule multi-jonction de base, à l'exclusion du substrat Ge actif en bas, était de $2,525\mu\text{m}$, similaire à l'épaisseur de la cellule fabriquée par l'industrie.

III. 5 Caractéristique $I = f(v)$

La courbe caractéristique IV dérivée pour la cellule solaire simulée sont illustrées a la figure ci-dessous. Un faible facteur de remplissage de 69,3852 % est indiqué par le point de puissance maximum déprimé de la courbe caractéristique IV. La tension en circuit ouvert de 5,26026 V se compare favorablement à la plage de 5,2 V observée dans la littérature.

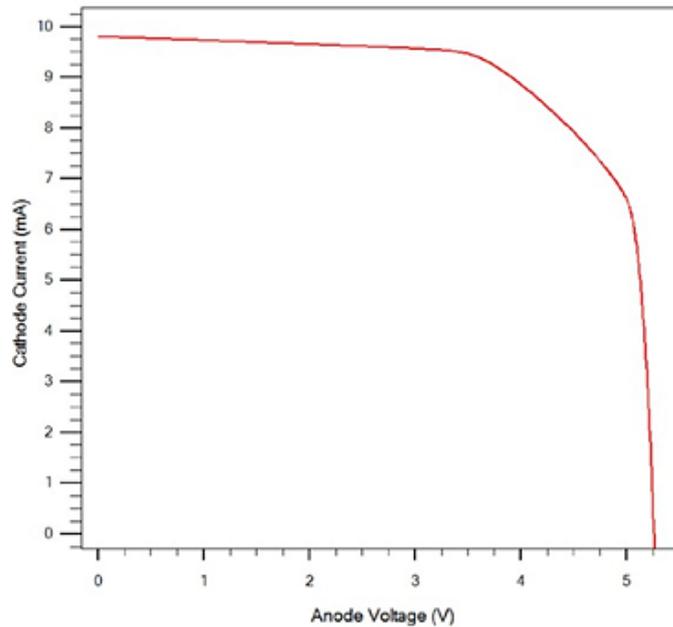


Figure 9: caractéristique IV

III.6 Détermination du rendement par variation du dopage et l'épaisseurs des couches de la Première jonction

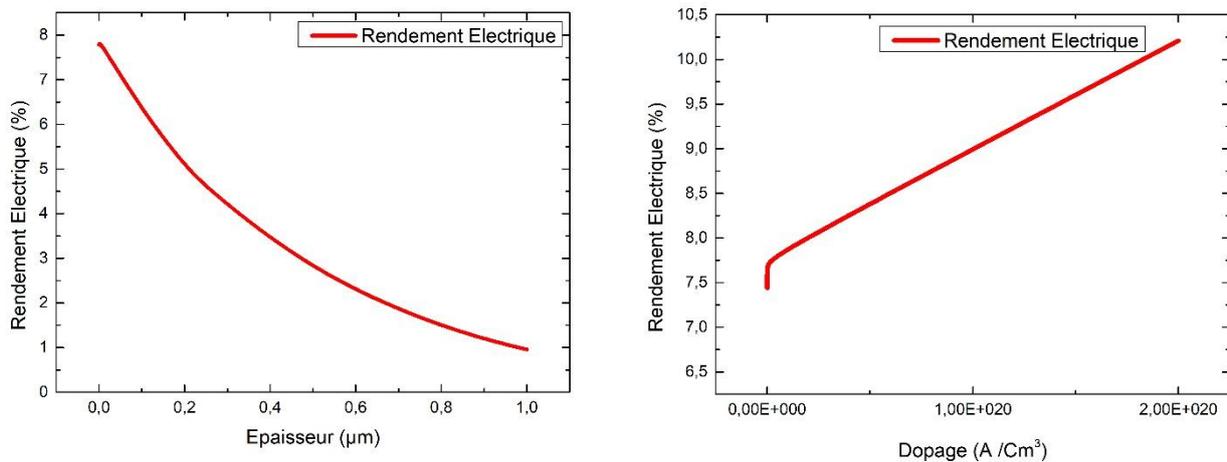


Figure 10: Couche Fenêtre Première Jonction

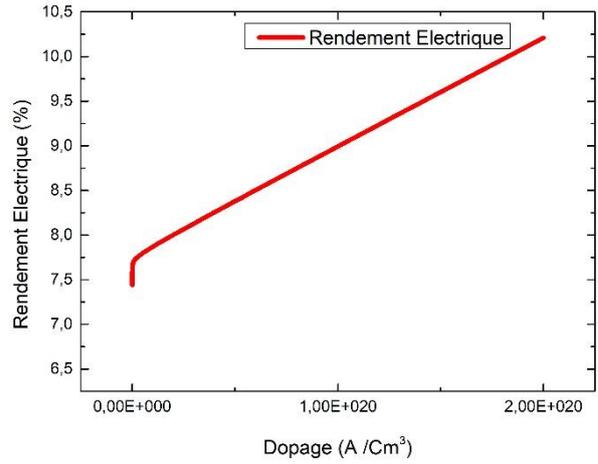
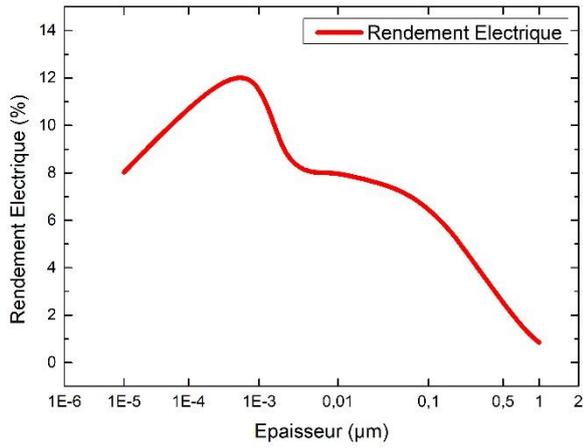


Figure 11 : Couche Émettrice Première Jonction

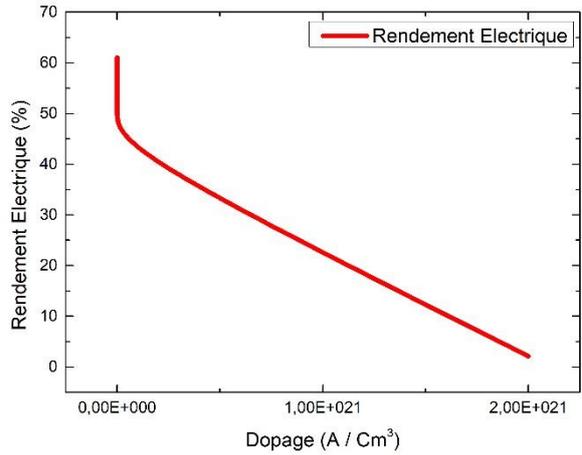
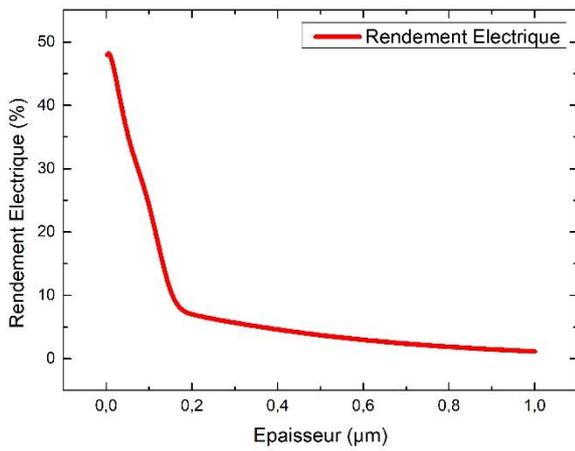


Figure 12: Couche Base Première Jonction

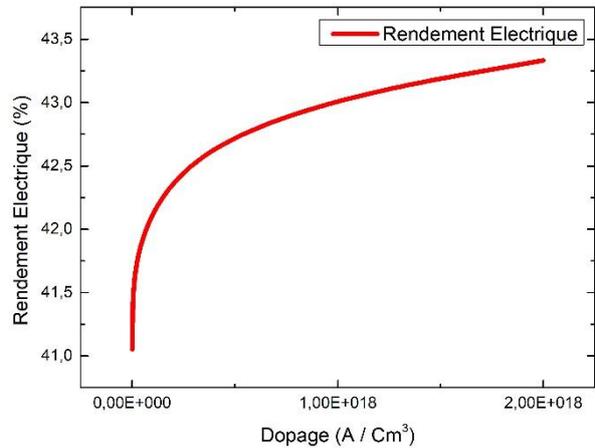
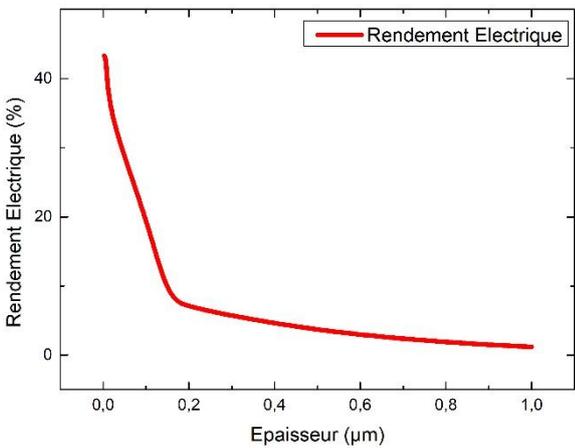


Figure 13: Couche BSF Première Jonction

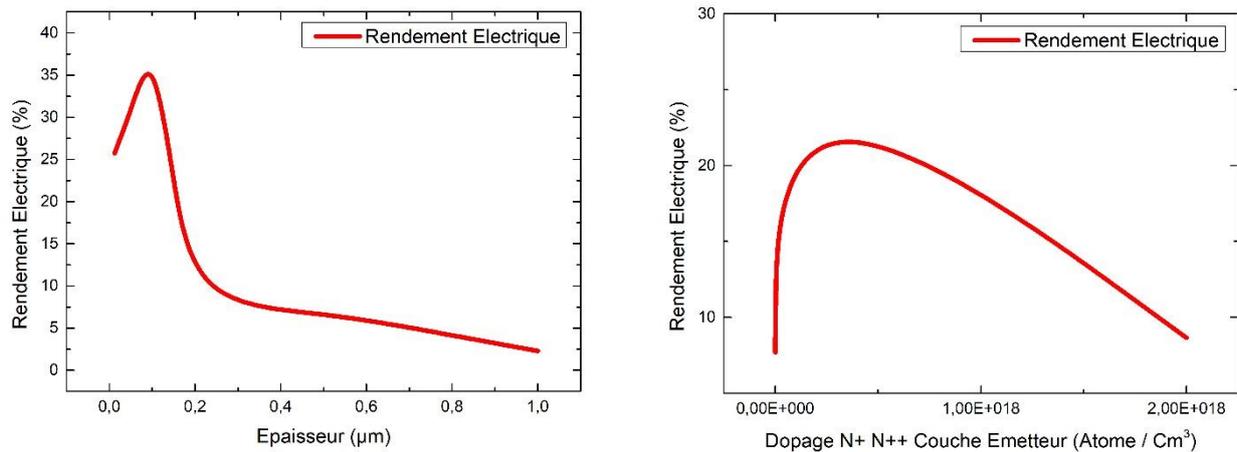


Figure 14: Couche BUF Première Jonction

Les figures ci-dessus représentent la variation de l'épaisseurs et le dopage des cinq couches de la première jonction en fonction du rendement électrique, on remarque une diminution du rendement en fonction de l'augmentation de l'épaisseur, ceci s'explique par le fait que la première jonction possède un gap de l'ordre de 2.14eV qui fait face aux énergies inférieures à cette valeurs, donc seules les longueurs d'ondes petites vont contribuer à la génération de recombinaison électron trou, et on diminuant l'épaisseur le nombres d'atomes dans la nouvelles structure vont diminuer d'où l'augmentation du rendement (augmentation de la probabilité de généré pairs électron trou)

III. 7 Détermination du rendement par variation du dopage et l'épaisseurs des couches de la deuxième jonction

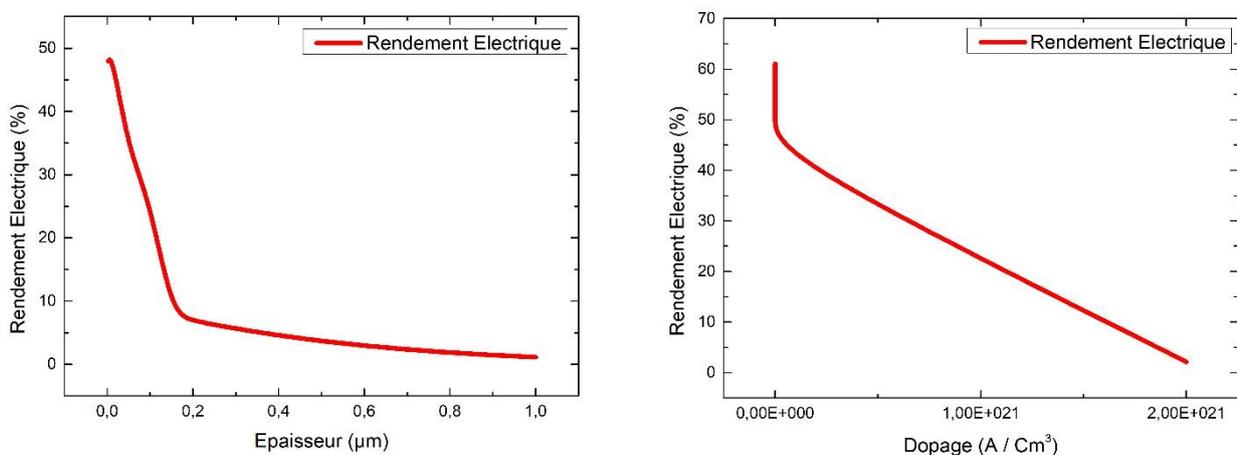


Figure 15: Couche Fenêtre Deuxième Jonction

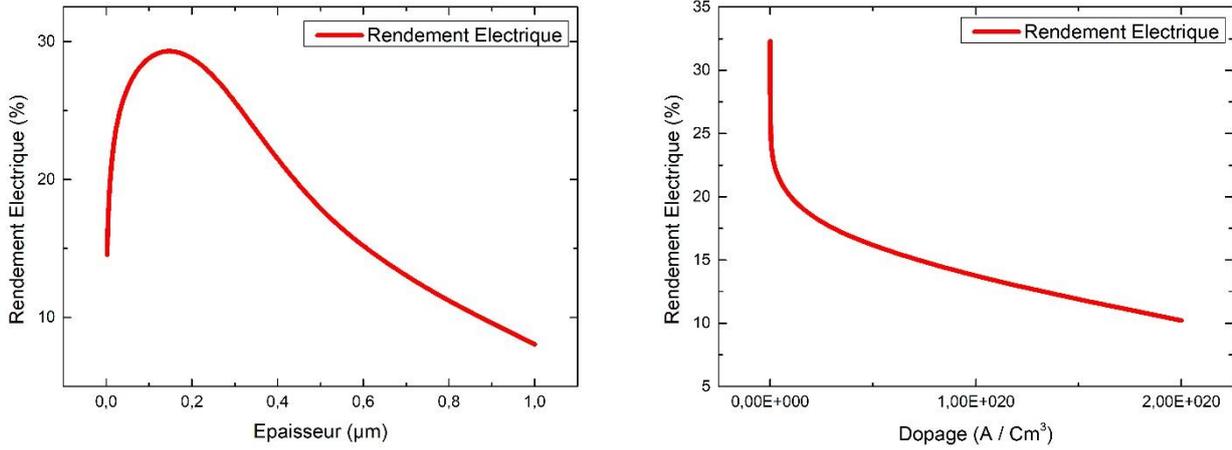


Figure 16 : Couche Émettrice Deuxième Jonction

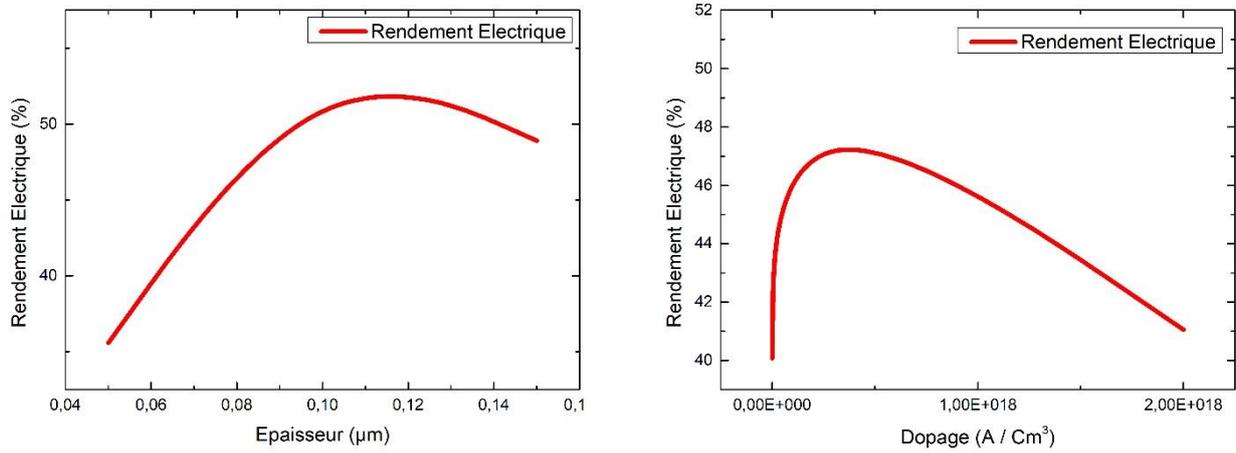


Figure 17 : Couche Base Deuxième Jonction

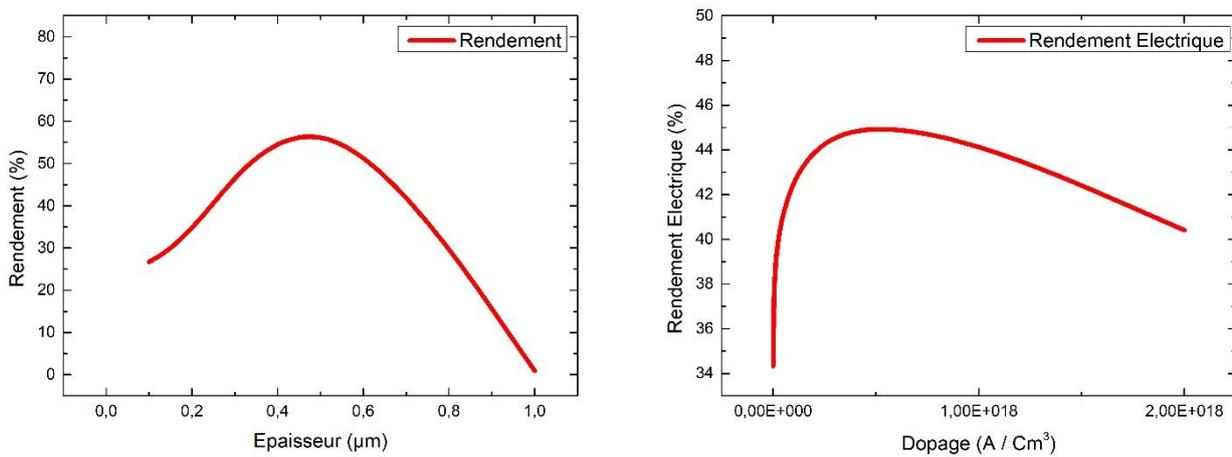


Figure 18: Couche BSF Deuxième Jonction

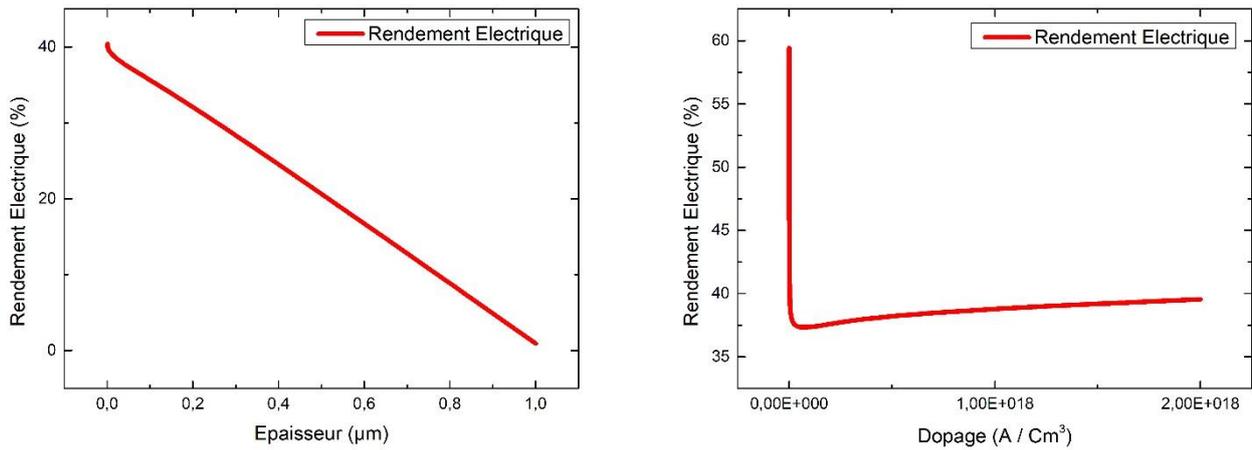


Figure 19 : Couche BUF Deuxièm Jonction

Dans la deuxième jonction, les figures ci-dessus représentent aussi la variation de l'épaisseurs et le dopage des cinq couches en fonction du rendement électrique, en effet l'énergie de gap de la deuxième jonction est moins importante que la première jonction, donc le nombre de photons incidents avec des longueurs d'ondes petites et moyennes selon l'énergie de gap pénétrant vers la deuxième jonction peuvent générées plus de pair électrons trous d'où l'augmentation du rendement par rapport à la première jonction, il faut noter aussi que le rendement varie avec la variation des épaisseur et le dopage d'une manière proportionnelle, on peut conclure, que à l'échelle nanométrique la structure tandem montre des résultats prometteuse dans la fabrication des cellules de 3ème génération pour les deux jonction 1, et 2.

Par ailleurs la technique de dimensionnement des cellules solaires, appliquée dans notre travail dite le dimensionnement génétique des structures, représente la technique idéale pour prédire l'ordre de grandeur des paramètres physico-chimiques de la structure.

III. 8 Détermination du rendement par variation du dopage et l'épaisseurs des couches de la troisième jonction

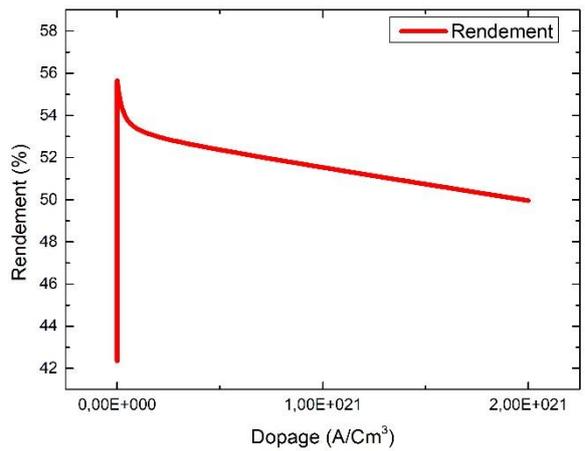
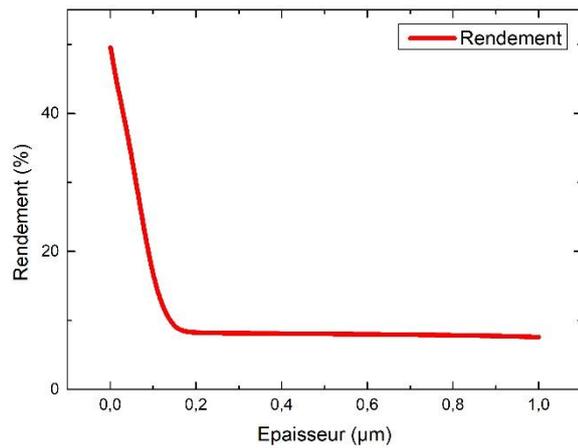
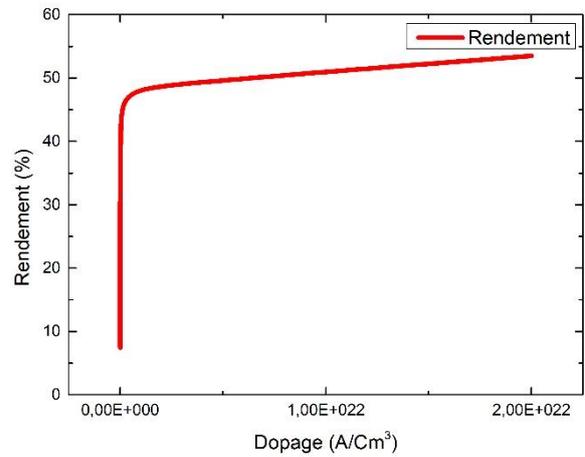
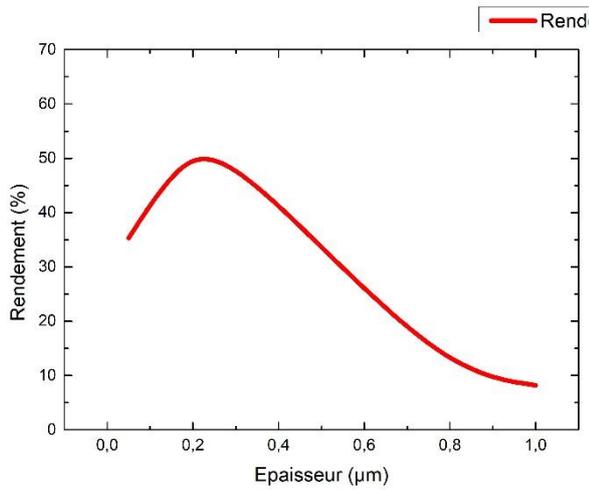
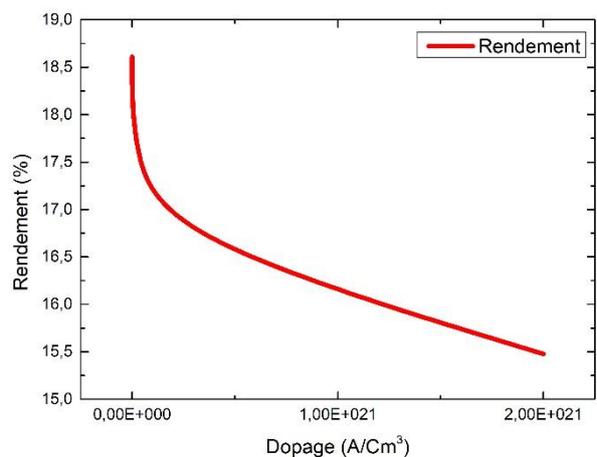
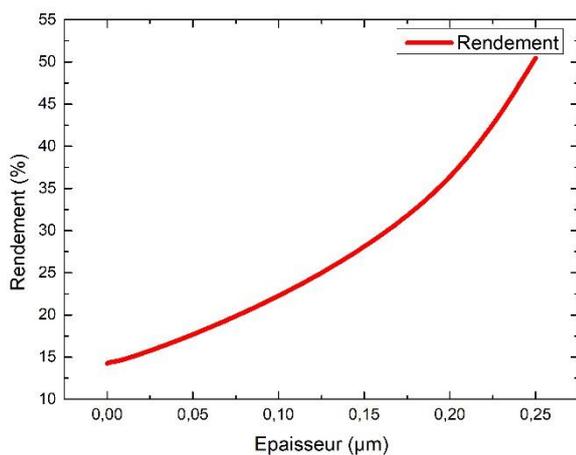


Figure 20 : Couche fenêtre dans la troisième Jonction

Figure 21: Couche Émettrice dans la troisième Jonction

Figure 22: Couche Base dans la troisième Jonction



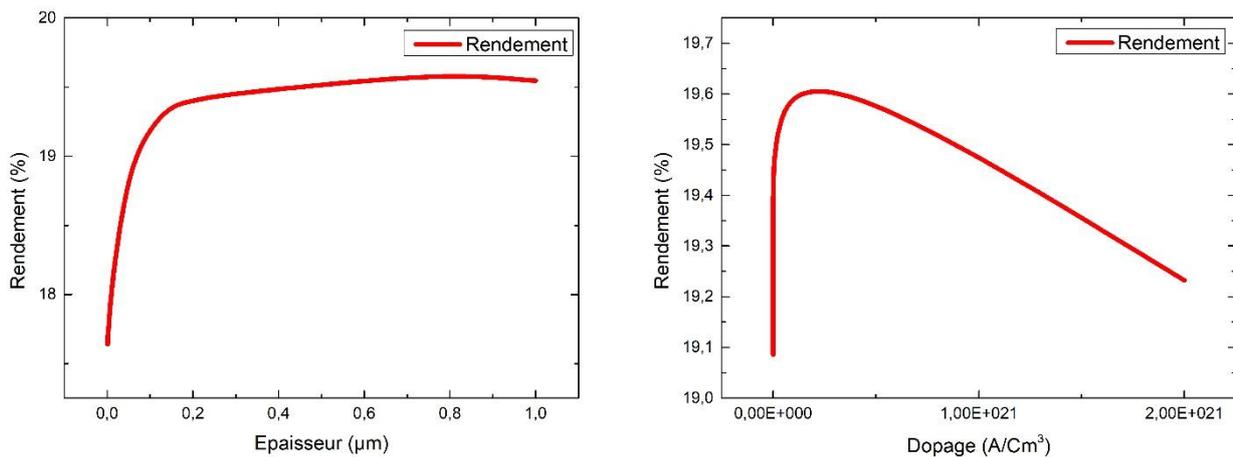


Figure 23: Couche BSF dans la troisième Jonction

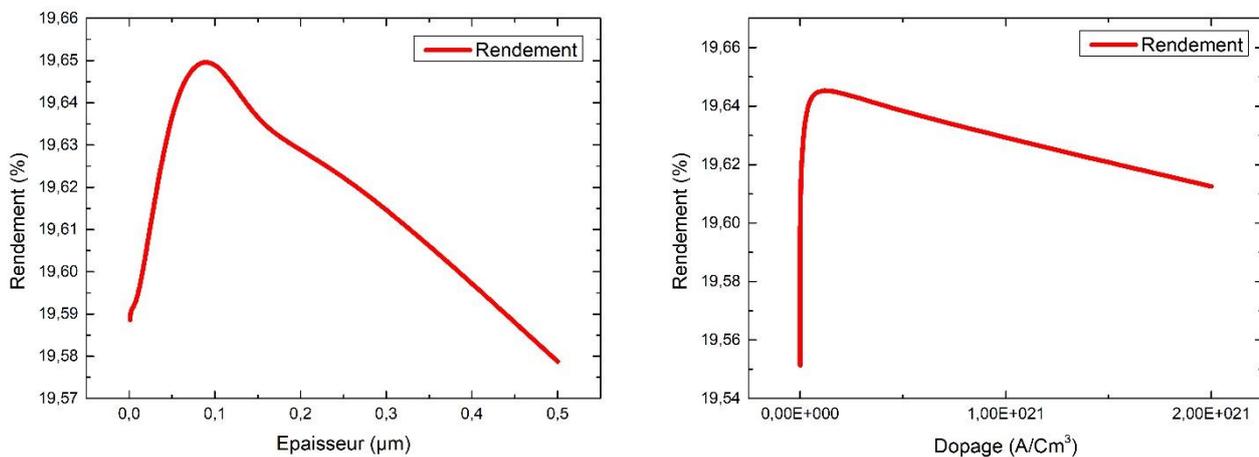


Figure 24: Couche BUF dans la troisième Jonction

La troisième jonction, les figures ci-dessus représentent aussi la variation que l'épaisseurs et le dopage des cinq couches en fonction du rendement électrique, on remarque le paramètre de dimensionnement joue un rôle important dans les premières couches fenêtre et émettrice et moins importants dans le reste couches, l'importance de l'effet tunnel permettant au électrons de franchir la barrière de potentiel est moins important par rapport au d'autres jonctions supérieurs, ceci nous permet de conclure que le nombre de couche tandem, ce limite au trois couches car l'importance quantique de pompage d'électron se focalise dans les structures de gap élevé.

Par ailleurs la dernière jonction n'a pas présenté des résultats remarquables d'où la confirmation de nos propos,

Une étude optique complémentaire confirmera plus les prédictions énergétiques proposées. Ou encore la comparaison entre des structures tandem à deux couches est même plus.

III.9 Résultats d'optimisation :

Les résultats de la simulation pour la cellule optimisée, sont données dans le tableau suivant. La majorité des facteurs ont augmentés avec la variation des épaisseurs et le dopage, dans les deux premières jonctions, et moins important dans le reste de la structure.

Paramètre	Cellule de Base	Cellule Optimisé	Gain
<i>J_{sc}</i>	9.80609 mA/cm ²	12.30401 mA/cm ²	25.47%
<i>V_{oc}</i>	5.26026 V	5.89876 V	12.13%
<i>P_{max}</i>	35.7907 mW	58.8765mW	64,50%
<i>FF</i>	69.3852%	93.1351%	34,22%
Rendement %	26.2166%	47.4356%	60,90%

Tableau 1 : Résultat d'optimisation de la structure tandem

III.10 Propriété optique de la structure

Le rendement quantique pour la cellule optimisée est représenté sur la figure 25 Le rendement quantique de la seconde cellule à augmenter de près de 20 % en raison du changement des concentrations de dopage des couches tampon et BSF ainsi que les épaisseurs. Le changement de concentration de dopage dans la deuxième cellule BSF a donnée plus de chance pour les porteurs minoritaires pour migrés vers la jonction PN pour augmenter I_{sc}, tandis que l'augmentation de la concentration de dopage dans le tampon a favorisé la diminution du champ électrique qui a empêché le flux de porteurs à travers la jonction tunnel. Le rendement quantique de la troisième et quatrième cellule a augmenté de 8 à 10 % par rapport à la cellule de référence, mais il reste toujours très faible en raison des mouvement électron trou important pour les deux premières cellules. La forme de chaque courbe du rendement quantique dans la cellule multi-jonction optimisée est restée relativement la même par rapport aux formes de courbe rendement quantique dans la cellule multi-jonction de base.

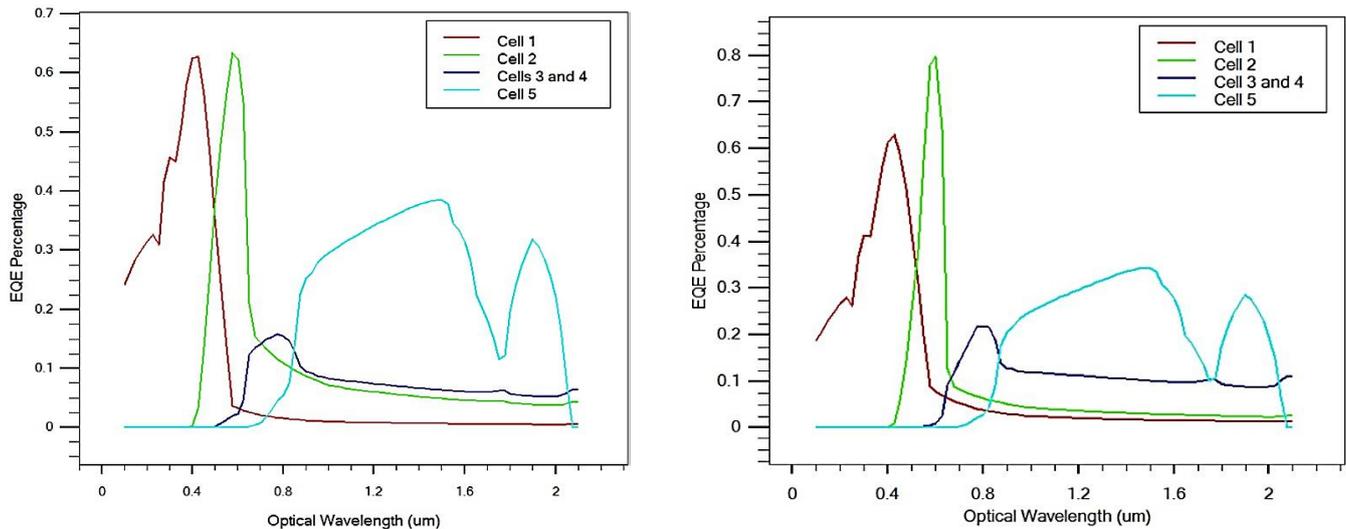


Figure 25 : Rendement quantique avant optimisation et après optimisation

III.11 Conclusion

Une cellule solaire à quatre jonctions a été modélisée avec succès dans SILVACO ATLAS en utilisant les spécifications de conception d'une cellule à quatre jonctions disponibles dans l'industrie. Ceci est important dans la mesure où peu de modèles SILVACO ATLAS ont été conçus avec plus de trois jonctions ont fait, Les concentrations de dopage initiales et les épaisseurs de couche ont été établies de telle sorte que les valeurs de tension en circuit ouvert, de courant de court-circuit, de puissance maximale, de facteur de forme et d'efficacité soient raisonnables par rapport à la cellule sur laquelle le modèle était basé. Une fois la cellule de référence établie avec les propriétés des matériaux recueillies pour chacune des différentes couches de cellules, la simulation a été menée avec succès. La cellule optimisée a entraîné une augmentation du rendement électrique et quantique global, une puissance de sortie maximale supérieure à 50 mW, un courant de court-circuit supérieur à 10 mA, une tension en circuit ouvert supérieure à 5,3 V, un facteur de forme supérieur à 90 % et une efficacité supérieure à 42 %. Les facteurs les plus significatifs pour la cellule multi-jonction basée sur les matériaux choisis se sont avérés les couche tampon, BSF des premières jonctions. Les facteurs modifiés ont déplacé la zone de recombinaison la plus élevée de la deuxième jonction vers la première jonction, ce qui a entraîné une densité de courant globale plus élevée en raison de la diminution de la recombinaison dans la deuxième jonction.

Chapitre III : Simulation d'une cellule tandem par logiciel SILVACO ATLAS

La méthode d'optimisation s'est avérée efficace avec quelques mises en garde. Après avoir obtenu les résultats finaux, L'échec de convergence dans la plupart des cas impliquait a limité les temps de calcul dans la dernière jonction proposée le travail a été réalisé sous environnement Windows et nonLinux faute de problème de licence (licence unité de recherche matériaux et énergies renouvelables URMER TLEMCEN).(Michalopoulos, 2002)

Bibliographie

ATLAS User's Manuel [Livre]. - , California : [s.n.], 2011.

D.K. Schroder L.G. Rubin, Semiconductor Material and Device Characterization, [Revue] // Phys. Today. 44 (1991) 107–108. - 1991. - p. doi:10.1063/1.2810086.

Michalopoulos ATLAS User's Manuel, Device simulation software [Revue] // SILVACO International, California. 2011. - 2002.

Michalopoulos P. A novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using Silvaco [Revue] // M.S. thesis, Dept. of Elec. . - 2002.

P, D. Bradley Advanced Thermo-Photovoltaic Cells Modeling, Optimized for Use in Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGS) for Mars and Deep Spase Missions [Livre]. - Monterey California : [s.n.], 2004.

Vieira H. NOB_Mixed_512DP [En ligne]. - 04 2022. - <http://my.nps.edu/web/seed/software-download>.

Z. ZIANI Modélisation des Hétrrostrcture à base des nanofils de SiGe [Livre]. - Tlemcen : [s.n.], 2012.

Liste des Figures

FIGURE 1 : ORGANIGRAMME DE LA STRUCTURE VWF	49
FIGURE 2 : ENTREES ET SORTIES	51
FIGURE 3:STRUCTURE SIMULEE PAR SILVACO.....	53
FIGURE 4: STRUCTURE REALISEE PAR SILVACO.....	53
FIGURE 5:MESHING DE LA STRUCTURE REALISEE PAR SILVACO.....	54
FIGURE 6: LA QUANTITE DU DOPAGE PAR REGIONS EN cm^3	55
FIGURE 7:JONCTION PN PAR REGIONS REALISE PAR SILVACO	55
FIGURE 8: STRUCTURE DE REFERENCE DANS LA SIMULATION SILVACO (Z., 2012).....	56
FIGURE 9: CARACTERISTIQUE IV	57
FIGURE 10: COUCHE FENETRE PREMIERE JONCTION	57
FIGURE 11 : COUCHE ÉMETTRICE PREMIERE JONCTION	58
FIGURE 12: COUCHE BASE PREMIERE JONCTION.....	58
FIGURE 13: COUCHE BSF PREMIERE JONCTION	58
FIGURE 14: COUCHE BUF PREMIERE JONCTION.....	59
FIGURE 15: COUCHE FENETRE DEUXIEME JONCTION	59
FIGURE 16 : COUCHE ÉMETTRICE DEUXIEME JONCTION	60
FIGURE 17 : COUCHE BASE DEUXIEME JONCTION	60
FIGURE 18: COUCHE BSF DEUXIEME JONCTION	60
FIGURE 19 : COUCHE BUF DEUXIEM JONCTION.....	61
FIGURE 20 : COUCHE FENETRE DANS LA TROISIEME JONCTION.....	62

FIGURE 21: COUCHE ÉMETTRICE DANS LA TROISIEME JONCTION	62
FIGURE 22: COUCHE BASE DANS LA TROISIEME JONCTION.....	62
FIGURE 23 : COUCHE BSF DANS LA TROISIEME JONCTION.....	63
FIGURE 24 : COUCHE BUF DANS LA TROISIEME JONCTION.....	63
FIGURE 25 : RENDEMENT QUANTIQUE AVANT OPTIMISATION ET APRES OPTIMISATION	65

Conclusion générale

Dans le domaine de la concentration solaire, la filière à base de matériaux antimoniures représente une alternative crédible aux technologies actuelles développées sur GaAs et InP.

En effet, les alliages III-V, avec des gaps compris entre 0,27 eV et 3,64 eV, présentent des caractéristiques intéressantes pour la fabrication de cellules multi-jonctions, en particulier pour les cellules comportant plus de 4 jonctions qui impliquent la mise en œuvre de matériaux avec des énergies de gap de plus en plus faibles. Les travaux présentés dans ce manuscrit avaient pour objectif l'évaluation de cette nouvelle filière pour des applications sous concentration solaire en se focalisant sur ces cellules à base de Ge et de l'alliage AlInP et GaAs .

Dans le chapitre 1, nous avons présenté l'intérêt des semi-conducteur et les multi-jonctions ainsi que l'impact et les limitations liées à la concentration solaire. Suite à une analyse exhaustive de l'état de l'art des cellules multi-jonctions sous concentration solaire ainsi que les derniers records obtenus sous fortes concentrations, nous avons mis en évidence, afin d'obtenir de hauts rendements à de fortes concentrations solaires, qu'il est nécessaire de s'orienter vers des structures fabriquées de manière monolithique et accordées sur un paramètre de maille unique.

Nous avons présenté dans le chapitre 2 les différents types des cellules solaire utilisés dans le cadre de ces travaux. Nous avons mis en évidence la nécessité d'avoir un matériau à gap entre de 0,5 eV 3 eV pour une structure à partir de 4 jonctions. Vis-à-vis des difficultés à obtenir des gaps inférieurs à 0,7 eV avec les matériaux basés sur des croissances soit sur GaAs soit sur AlInP, ce critère sur les petits gaps confirme le potentiel de la filière antimoniure. Nous avons de même présenté dans le chapitre 3 le logiciel de simulation ainsi que les modèle utilisé (SILVACO).

Ce modèle nous a permis de simuler nos courbes expérimentales I(V) et de réponse spectrale, et d'extraire des prometteuses dans la modélisation structurale.

Un travail important a été mené concernant la détermination des propriétés optiques par la variation des épaisseurs et la concentration du dopage qui a permis de développement la structure idéale pour des hétérojonction à l'échelle nanométrique

Résumé :

Les cellules solaires à jonctions multiples ont donné naissance à des dispositifs photovoltaïques compacts à haut rendement, qui offrent des améliorations significatives par rapport aux conceptions conventionnelles de cellules solaires à jonction unique. Cette recherche utilise une conception existante de cellules solaires à quatre jonctions pour fournir la structure de base d'un modèle de simulation basé sur les caractéristiques publiées des cellules. Cette structure est ensuite optimisée en faisant varier la concentration de dopage et l'épaisseur du matériau dans chaque couche de cellule active afin d'augmenter la génération globale de photo courant et de maximiser l'efficacité. L'optimisation de l'efficacité des cellules solaires est réalisée via une méthodologie de conception d'expériences équilibrée presque orthogonale. SILVACO ATLAS est utilisé pour simuler le comportement des structures de cellules solaires multi-jonctions. Les résultats de la simulation sont traités et comparés afin d'améliorer l'efficacité quantique externe, le taux de recombinaison et la génération de courant. Les résultats affichés montrent une amélioration importante du rendement de l'ordre de 26,2166 % à 37,3682 %, tandis que les efficacités quantiques externes des deuxième, troisième et quatrième jonction ont été augmentées de 8 % à 20 %.

Abstract :

Multi-junction solar cells have given rise to compact, high-efficiency photovoltaic devices, which offer significant improvements over conventional single-junction solar cell designs. This research uses an existing four-junction solar cell design to provide the basic structure for a simulation model based on published cell characteristics. This structure is then optimized by varying the doping concentration and material thickness in each active cell layer to increase overall photocurrent generation and maximize efficiency. Optimization of solar cell efficiency is achieved through a nearly orthogonal balanced experiment design methodology. SILVACO ATLAS is used to simulate the behavior of multi-junction solar cell structures. The simulation results are processed and compared in order to improve the external quantum efficiency, the recombination rate and the current generation. The displayed results show a significant improvement in efficiency in the range of 26.2166% to 37.3682%, while the external quantum efficiencies of the second, third and fourth junctions were increased by 8% to 20%.

ملخص:

أدت الخلايا الشمسية متعددة الوصلات إلى ظهور أجهزة كهروضوئية مدمجة وعالية الكفاءة، والتي تقدم تحسينات كبيرة على تصميمات الخلايا الشمسية التقليدية أحادية الوصلة. يُستخدم هذا البحث تصميم خلية شمسية بأربعة وصلات لتوفير الهيكل الأساسي لنموذج محاكاة يعتمد على خصائص الخلية المنشورة. تم تصميم هذه البنية عن طريق تغيير تركيز المنشطات وسمك المادة في كل طبقة خلية نشطة لزيادة توليد التيار الضوئي الكلي وزيادة الكفاءة. يتم تحقيق تحسین كفاءة الخلايا الشمسية من خلال منهجية تصميم تجريبية من عامدة لمحاكاة سلوك هياكل الخلايا الشمسية متعددة الوصلات. تتم معالجة نتائج المحاكاة ومقارنتها من SILVACO ATLAS تجريبيًا. يُستخدم أجل تحسین كفاءة الخلية الخارجية ومعدل إعادة التركيب والجهد الحالي. أظهرت النتائج المعروضة تحسینًا ملحوظًا في الكفاءة في المدى من 26.2166% إلى 37.3682% ، بينما زادت الكفاءة الخلية للخارجية للتقاطع الثانية والثالثة والرابعة بنسبة 8% إلى 20%.