

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique



Université Hadj Lakhdar Batna
Faculté De Technologie
Département d'Electronique



Mémoire

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MAGISTER en Electronique**

Option:

Micro Electronique IC Design

Par

M^r Bencherif Hichem

Thème

**Etude et modélisation analytique d'une cellule solaire à
base de Si-Ge**

Soutenu devant le jury composé de :

Pr	Abdelhamid BENHAYA	Prof.	Université de Batna	Président
Pr	Fayçal DJEFFAL	Prof.	Université de Batna	Rapporteur
Pr	Ramdane MAHAMDI	Prof.	Université de Batna	Examineur
Dr	Djamil RECHEM	M.C.A	Université d'Oum El Bouaghi	Examineur

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué sous la direction de monsieur **Fayçal DJEFFAL**, Professeur à l'Université de Batna. Membre du laboratoire de l'électronique avancée (LEA).

Je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur **Abdelhamid BENHAYA**, Professeur à l'Université de Batna, d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.

Je remercie sincèrement monsieur **Ramdane MAHAMDI** Professeur à l'Université de Batna et monsieur **Djamil RECHEM** M.C.A à l'Université d'Oum El Bouaghi d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Enfin j'exprime ma reconnaissance et ma sympathie à, mes collègues de laboratoire de l'électronique avancée (LEA), mes frères et mes amis.

A mes parents

A mes frères

A ma famille

A mes amis.



TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

Table des matières	ii
Table des figures.....	ii
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Aspects fondamentaux sur la photovoltaïque	
Chapitre I : Aspects fondamentaux sur la photovoltaïque	6
I-1.Introduction.....	6
I-2 La place du photovoltaïque	6
I-3. Les différentes filières du photovoltaïque	8
1.4. Le spectre solaire	9
1.5. L'intensité du rayonnement.....	11
1.6. Notion de la Masse d'Air	11
1.7. Matériaux photovoltaïques	12
1.7.1. La bande interdite	13
I-8 Principe de la conversion photovoltaïque	14
I.9 Les cellules solaires.....	16
I.9.1 Cellule solaire idéale	16
I.9.2 Cellule solaire réelle	17
I.10. Caractéristique d'une cellule solaire	18
I.10.1 Le courant de court circuit, I_{sc}	18
I.10.2 La tension de circuit ouvert, V_{co}	18
I.10.3 La réponse spectrale, SR (λ)	18
I.10.4 La puissance maximale, P_m	19
I.10.5 Le facteur de forme, FF	19
I.10.6 Le rendement de conversion, η	19
I.11 Les pertes physiques et technologiques	20
I-12 Conclusion	22

Chapitre II : Le revêtement et son impact sur le rendement de la conversion

Chapitre II : Le revêtement et son impact sur le rendement de la conversion	25
II.1. Introduction.....	25
II.2. Les oxydes transparents conducteurs (OTC)	25
II.3. Critères de choix des oxydes transparent conducteurs.....	26
II.4. Méthodes de dépôt des OTC.....	27
II.5. Applications des OTC.....	28
II.5. 1.Capteurs à gaz	28
II.5.2.Systèmes optoélectroniques	28
II.5. 3. Cellules solaires	28
II.6. Les OTC les plus exploités	29
II.6.1.L'oxyde de zinc (ZnO)	29
II.6.1.1.Quelques propriétés de ZnO	29
II.6.2.L'oxyde de titane (TiO ₂).....	31
II.6.2.1.Les propriétés de TiO ₂	31
II.6.3.Sulfure de Zinc (ZnS)	34
II.7. Conclusion	37

Chapitre III : Modélisation analytique d'une cellule solaire à base de SiGe

Chapitre III : Modélisation analytique d'une cellule solaire à base de SiGe	39
III-1 Introduction	39
III-2 Modèle de simulation.....	40
III-2-1- Structure de la cellule	40
III-3- Eclairement, puissance incident et flux solaire au sol	40
III-4- Coefficient d'absorption	41
III-5- Coefficient de réflexion	42
III-6- Taux de génération et taux de recombinaison.....	45
III-7- Densité de phot-courant J_{ph}	45

III -8- Densité de photo-courant total J_{ph}	48
III-9- Réponse spectral	49
III-10- Caractéristique courant-tension	49
III-11- Conclusion	50

Chapitre IV : Résultat, discussions et optimisation

Chapitre IV : Résultat, discussions et optimisation	52
IV-1 Introduction.....	52
IV-2 Coefficient d'absorption	52
IV-3 Effet de l'angle de texturisation de la couche N (SiGe)	54
IV-4 Effet de la hauteur de texturisation de la couche N	56
IV-5 Effet de la concentration du Germanium	58
IV-6 Effet de la concentration de l'aluminium	61
IV-7 Effet de l'épaisseur de la couche antireflet	63
IV-8 Caractéristique	63
IV-9 Optimisation.....	64
IV-9-1 L'optimisation multi-objective par MOGAs	65
IV-9-2 Optimisation du rendement de la cellule solaire par MOGAs.....	66
IV-9-3 Résultats et discussions	67
IV-9-3-1 Paramétrage	67
IV-9-3-2 Application de la technique d'optimisation MOGA	67
IV-10 Conclusion	71
Conclusion générale	73
Référence	74



TABLE DES FIGURES

Table des figures

Chapitre I : Aspects fondamentaux sur la photovoltaïque

Figure I-1 : Rayonnement solaire annuel sur un plan horizontal	7
Figure I-2 : Évolution de la capacité installée cumulative de systèmes.....	7
Figure I-3 : Modèle solaire, grande installation solaire (Chine).	8
Figure I-4 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque	8
Figure I-5 Le spectre solaire	10
Figure I-6 l'énergie solaire en fonction des longueurs d'ondes	10
Figure I-7 L'irradiance en fonction des longueurs d'ondes	11
Figure I-8 l'Air Mass.....	12
Figure I-9 Rayonnements et semi-conducteurs	14
Figure I-10 : Profil de bande d'une jonction P-N	15
Figure I-11 : Jonction P-N éclairée	15
Figure I-12 : Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale	17
Figure I-13 : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle	18
Figure I-14 : Caractéristique courant tension d'une cellule solaire éclairée	19
Figure I-15 Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration de la lumière dans le silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde à 300K.....	21
Figure I-16 Schéma équivalent d'une cellule solaire	22

Chapitre II : Le revêtement et son impact sur le rendement de la conversion

Figure II.1 : Evolution du nombre de publications traitant de ZnO, In ₂ O ₃ et SnO ₂	26
Figure II-2 : Structure cristalline du ZnO.....	30
Figure II-3 : Mailles cristallographiques des phases anatase (a), rutile (b), et brookite (c) du TiO ₂	32

Figure II-4 : structure cristalline de ZnS	34
Figure II-5 : Structure de bande de ZnS	36

Chapitre III : Modélisation analytique d'une cellule solaire à base de SiGe

Figure III-1 : (a)cellule solaire à hétérojonction à base de SiGe avec texturisation (b) illustration de la propagation d'un rayon sur la surface texturée	40
Figure III-2 : Approximation de l'éclairement solaire au sol	41
Figure III-3 : différentes dimensions d'une cellule solaire a hétérojonction Si-Ge(n)/Si(p).....	45

Chapitre IV : Résultats, discussions et optimisation

Figure IV-1 : Le coefficient d'absorption de Si et Ge en fonction de la longueur d'onde	53
Figure IV-2 : Le coefficient d'absorption de ZnO :Al en fonction de la longueur d'onde	53
Figure IV-3-1 : Le coefficient de réflexion (R) en fonction de l'angle de texturisation(ψ)	54
Figure IV-3-2 : Variation du photo-courant J_{ph} en fonction de l'angle de texturisation (ψ)	54
Figure IV-3-3 : Variation de la tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction de l'angle de texturisation (ψ)	55
Figure IV-3-4 : Variation de l'efficacité de conversion (η) en fonction de l'angle de texturation (ψ)	55
Figure IV-4-1 : Le coefficient de réflexion (R) en fonction de la hauteur de texturisation (H)	56
Figure IV-4-2 : Variation du photo-courant J_{ph} en fonction de la hauteur de texturisation (H)	56
Figure IV-4-3 : variation de la tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction de la hauteur de texturation (H)	57

Figure IV-4-4: variation de l'efficacité de conversion (η) en fonction de la hauteur de texturisation (ψ)	57
Figure IV.5: Variation de la conductivité du $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_{(x)}$ en fonction de la concentration du Germanium	58
Figure IV-5-1: Le coefficient de réflexion de la cellule en fonction de la concentration du Germanium	59
Figure IV-5-2: Variation du photo-courant J_{ph} en fonction de la concentration du Germanium	59
Figure IV-5-3: Variation de la tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction de la concentration du germanium	60
Figure IV-5-4: Variation de l'efficacité de conversion (η) en fonction de la concentration du Germanium dans la couche (N) $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_{(x)}$	60
Figure -IV-6-1: Le coefficient de réflexion de la cellule en fonction de la concentration de l'Aluminium	61
Figure IV-6-2: Variation du photo-courant J_{ph} en fonction de la concentration de l'aluminium	61
Figure IV-6-3: variation de la tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction de la concentration de l'Aluminium.....	62
Figure IV-6-4: variation de l'efficacité de conversion (η) en fonction de la concentration de l'Aluminium dans la couche antireflet $\text{ZnO}_{(1-x)}\text{Al}_{(x)}$	62
Figure IV-7 variation de la réflexion en fonction de l'épaisseur de la couche antireflet	63
Figure IV-8 La caractéristique de sortie obtenue à partir du modèle analytique d'une cellule solaire a hétérojonction avec texturation de surface, comparée avec les résultats d'une cellule planaire (non texturée)	64
Figure IV-9 L'optimisation multi-objective par algorithmes génétiques.....	66
Figure IV-10 Solution de Pareto-optimale de la cellule solaire analysée	68
Figure IV-11 Caractéristiques I-V et l'efficacité de conversion obtenues avec optimisation par MOGAs, pour les deux cellules (planaire et texturisée)	69



Introduction Générale

Introduction Générale

Avec le développement mondial de la demande énergétique, les réserves d'énergies fossiles seront un jour épuisées si des alternatives ne sont pas développées. Depuis quelques années est mis en avant le développement d'énergies propres et renouvelables, telles que l'éolien, la biomasse, le géothermique, l'hydraulique et le photovoltaïque car ils contribuent peu à l'effet de serre.

Le photovoltaïque est une des voies qui s'est significativement développée au cours de ces dernières années, avec un taux de croissance de 40 %. Depuis l'obtention d'un rendement voisin de 5% avec des cellules photovoltaïques à base de silicium en 1950, des travaux très concluants ont été effectués afin d'améliorer le rendement de conversion et d'élargir le champ du photovoltaïque à l'échelle industrielle. Le solaire photovoltaïque connaît aujourd'hui un très fort développement et rencontre un succès sans cesse croissant tant en zone urbaine qu'en zone rurale, tant auprès des particuliers que des entreprises. Selon la dernière étude de l'association professionnelle de l'énergie solaire (Enerplan), la production mondiale d'électricité photovoltaïque à l'horizon 2030 pourrait couvrir 60 % des besoins en électricité des pays européens, et d'ici 2040, le photovoltaïque pourrait représenter 20 à 28 % de la Production mondiale d'électricité [1].

La production photovoltaïque mondiale actuelle est à base de silicium cristallin (mono-Si 36,3% et mc-Si : 44%). En effet, cette filière reste la plus avancée sur le plan technologique et industriel, car la technologie du silicium est arrivée presque à sa maturité et le silicium compose la quasi-intégralité des composants électroniques qui nous entourent, c'est qu'il a des propriétés de conductivité, stabilité et de résistance physique a en faire pâlir ses potentiels concurrentes. Du moins, jusqu'à aujourd'hui, puisqu'il est en train de se faire coiffer sur le poteau par des nouveaux matériaux montants qui sont les alliages (binaire, ternaire,...etc.). Vue les performances montrées par le SiGe sur le plan électriques et optiques, ce dernier peut jouer un rôle indispensable pour le développement des composants photovoltaïques modernes. Des travaux en laboratoire, récemment publiés, montrent que des dispositifs photovoltaïques en SiGe sont potentiellement capables de détrôner les composants en Silicium, ouvrant la voie à des panneaux solaires performants car plus efficaces et plus petits [2]. En plus, les programmes actuels de recherche et de développement de l'industrie photovoltaïque revêtent une extrême importance aux nouveaux procédés de croissance, à la réduction

de l'épaisseur des cellules, à l'optimisation du concept des structures photovoltaïque et à la minimisation des étapes technologique de fabrication. Aussi, la réduction de la réflectivité de la face avant des cellules photovoltaïques, est un des points essentiels à résoudre pour améliorer leurs rendements de conversion, on peut obtenir cette réduction on texturant la surface des cellules solaires pour assurer un confinement optique de la lumière.

Un autre moyen permet d'améliorer les rendements photovoltaïques en réduisant la réflectivité par l'élaboration des couches antireflets. Ces dernières jouent un rôle prépondérant dans l'industrie des cellules photovoltaïques qui sont, jusque là, obtenues par des traitements de dépôts chimiques [3]. Dans ce contexte, et pour bien comprendre l'influence du confinement optique et du revêtement par couches antireflet sur l'efficacité de conversion des cellules solaires des nombreux modèles numériques et empiriques sont déjà développés [4-6].

Le but de ce travail est consacré principalement à l'étude et la modélisation analytique d'une cellule solaire à hétérojonction de structure: ZnO-Al/Si-Ge/Si, qui permet à décrire l'effet des paramètres de texturation de surface et de revêtement par couches antireflet sur les performances de la cellule solaire, en vue d'optimiser les caractéristiques physiques et géométriques des différentes couches de la cellule.

Ce travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous faisons un état de l'art sur les aspects fondamentaux sur la photovoltaïque au moyen d'une étude bibliographique, nous décrivons brièvement le rôle joué par les cellules photovoltaïques dans la transformation de la grandeur physique en une grandeur électrique. Nous énumérons leurs caractéristiques avant d'entamer la description des différentes pertes physiques et technologiques dans les cellules solaires.

Le deuxième chapitre est consacré à faire à priori un rappel sur les oxydes transparents conducteurs et leur impact sur le rendement de la conversion photovoltaïque et l'extension de son utilisation comme des couches antireflets dans les cellules solaires, où les propriétés cristallographiques, optiques, électriques de ces oxydes transparents conducteurs sont exposées dans ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressées en premier lieu à la modélisation analytique de la cellule solaire à base de SiGe, et voir l'impact des mécanismes de confinement optique et du revêtement par couche antireflet sur ces caractéristiques.

Le quatrième chapitre regroupe les interprétations des différents résultats issus de la modélisation analytiques de la cellule solaire. En dernier, nous avons formé un problème d'optimisation multi-objectif conformément à notre approche de base, qui consiste à maximiser le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et le facteur de forme, afin de maximiser l'efficacité de conversion.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale qui récapitule les différents résultats trouvés.



Chapitre I

**Aspects fondamentaux sur la
photovoltaïque**



I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'histoire de l'énergie solaire et des différentes filières photovoltaïques, en se basant sur le principe de l'effet photovoltaïque et les caractéristiques des cellules solaires afin de faire un aperçu au sujet des différents types des pertes physiques et technologiques.

Dans ce contexte, ce chapitre est une synthèse des nombreuses informations sur les cellules solaires que l'on peut trouver dans la littérature.

I.2 La place du photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est issue de la conversion directe de la lumière venant du soleil, en électricité. Cette dernière est une forme d'énergie des plus pratiques car aisément exploitable pour de très nombreux usages. En tant qu'énergie solaire, elle bénéficie d'une source d'énergie permanente qui est la plus abondante de toutes, fossiles ou renouvelables, car la radiation solaire arrivant à la surface de la terre est de 3 400 000 ex joules par an, soit 6700 fois l'énergie produite par les Hommes en 2009 [7]. Cette ressource est de plus suffisamment bien répartie pour que son utilisation soit viable en tout point de notre planète (Figure I-1).

Son énergie peut être produite localement, ce qui réduit les pertes lors du transport et sécurise l'approvisionnement. En raison de cette production locale et de son caractère intermittent, elle nécessite d'être intégrée à une infrastructure adaptée : stockage de l'énergie pour les systèmes isolés, réseaux intelligents et relais par d'autres sources d'énergie pour les systèmes raccordés au réseau.

Un autre avantage est que l'énergie nécessaire à la production de systèmes photovoltaïques est restituée par leur fonctionnement en 1 à 3 ans seulement selon les conditions d'installation, comparée à la durée de vie de 25 ans du système [8]. Enfin il s'agit d'un produit dont l'utilisation est non polluante, silencieuse et n'entraînant pas de perturbation du milieu, si ce n'est par l'espace qu'il occupe, qui peut être très faible lorsqu'il est intégré au bâti.

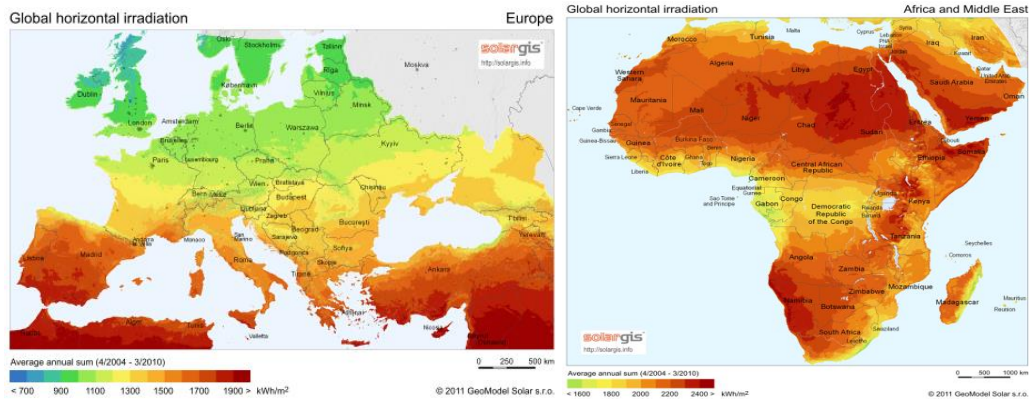


Figure I-1 Rayonnement solaire annuel sur un plan horizontal, [7,9].

Les rendements des systèmes photovoltaïques sont typiquement compris entre 15 et 20 %. A titre de comparaison, l'électricité issue des centrales thermiques utilisant des ressources fossiles est obtenue avec un rendement limité par celui de leur cycle thermodynamique de Rankine, c'est-à-dire 30 à 40 %.

Sa part dans le bouquet énergétique mondial est encore très faible, mais la capacité photovoltaïque installée connaît une croissance exponentielle, supérieure à celle des autres sources d'énergie. Ainsi, son taux de pénétration du marché énergétique pourrait devenir significatif dans les prochaines années à venir. Cette croissance est portée par le marché européen, et en particulier l'Allemagne (Figure I-2), qui représente à elle seule 43 % de la capacité mondiale installée de 2010 [10].



Figure I-2 Champs photovoltaïque en Allemagne. [10]

Si les industries allemandes et japonaises se partageaient jusqu'à il y a peu d'années le marché mondial du photovoltaïque, c'est désormais la Chine qui domine largement la

production industrielle (Figure I-3). Afin de rester compétitives vis-à-vis des coûts de production des pays d'Asie, les industries occidentales ont ainsi besoin de miser sur la recherche et développement.



Figure I-3 Modèle solaire. Plus grand installation solaire-un 13,78 MW de puissance solaire photovoltaïque (Chine). [5]

I.3 Les différentes filières du photovoltaïque

Il existe différents types de modules photovoltaïques. Les modules faits de cellules de silicium cristallin sont les plus répandus, il est généralement prédit qu'ils le resteront dans les années à venir [12]. Cette technologie représente actuellement 80 % du marché (Figure I-4).

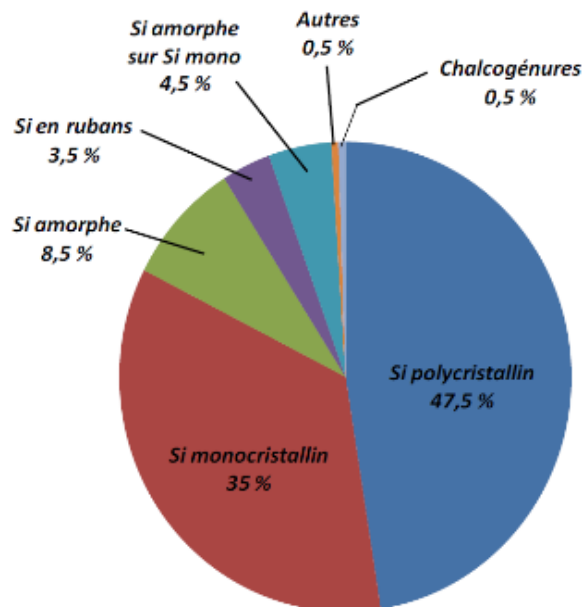


Figure I-4 Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [11].

Une autre voie du photovoltaïque est la technologie couches minces. Il s'agit de cellules faites d'un matériau plus absorbant que le silicium cristallin, de sorte qu'une épaisseur de quelques micromètres suffit à absorber le spectre solaire. Les couches minces industrialisées actuellement sont faites de silicium amorphe, de tellure de cadmium ou de chalcogénures (notamment les CIS faits de diséléniure de cuivre-indium et CIGS en cuivre, indium, gallium et sélénium), ainsi que de leurs dérivés. Leurs coûts de fabrication sont plus faibles ainsi que leurs rendements de conversion : de l'ordre de 4 à 8 % pour le silicium amorphe, 10-11 % pour le CdTe et 7-11 % pour les CIS et CIGS [13]. Les chalcogénures ont démontré des rendements plus élevés en laboratoire mais peinent à pénétrer dans le marché photovoltaïque. Les cellules CdTe ont un coût en €/Wc plus avantageux que le silicium cristallin, ce qui a permis à l'entreprise « First Solar » de devenir un poids lourd du marché en quelques années seulement, mais la présence de cadmium et de tellure, toxiques, compromet son impact environnemental.

D'autres technologies sont positionnées sur des applications spécifiques. Pour les applications spatiales ou le photovoltaïque à concentration, pour lesquelles les coûts peuvent être plus élevés, des cellules en arséniure de gallium ou à multi-jonctions sont utilisées. Ces dernières sont un empilement de deux à six cellules absorbant chacune une partie du spectre spécifique sur un même substrat, de sorte d'optimiser l'exploitation de tout le spectre solaire. C'est ce type de cellule qui atteint le rendement record de conversion photovoltaïque, qui est de 43,5 % sous concentration [14], les cellules industrielles approchant les 40 %.

Toutes les technologies évoquées précédemment sont de nature inorganique, mais il existe également des cellules organiques. Les cellules à colorant et celles en matériaux polymères sont commercialisées sur des marchés de niche, elles ont des coûts de fabrication très faibles et des rendements de 2-4 %.

1.4. Le spectre solaire:

Le photon est la particule élémentaire du rayonnement électromagnétique. Ce dernier comprend aussi bien la lumière visible que les ondes radios ou les rayons X [15]. Un rayonnement est caractérisé par sa longueur d'onde, sa fréquence, son énergie

et son intensité. Le photon peut avoir des énergies très différentes. A chaque énergie qu'il peut prendre est reliée une longueur d'onde qui lui est inversement proportionnelle. L'ensemble des longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique permet de définir le spectre électromagnétique représenté par la (Fig.1.5).

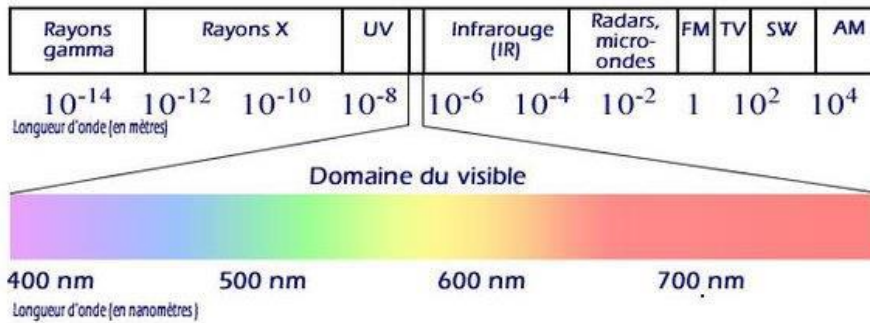


Fig-1.5- Le spectre solaire

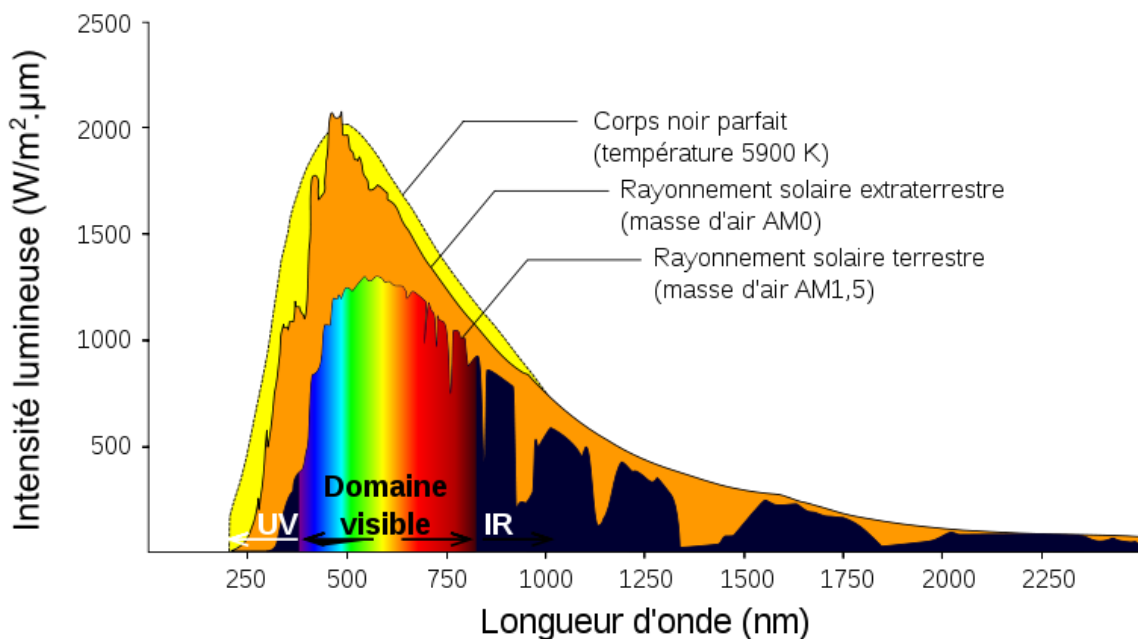


Fig.1.6 l'énergie solaire en fonction des longueurs d'ondes.

D'après la (Fig.1.6), 9% de l'énergie du rayonnement solaire se trouve dans la bande des ultraviolets $< 0.4 \mu m$, 47% dans la bande visible $0.4 \text{ à } 0.8 \mu m$ et 44% dans la bande des infrarouges $> 0.8 \mu m$, on voit bien que la partie de l'énergie solaire max transformable en électricité correspond au domaine visible [16].

1.5. L'intensité du rayonnement :

Le rayonnement se caractérise par son domaine Spectral comme on vient de voir et par son intensité (plus un corps est chaud ($> 0^{\circ}\text{K}$) plus il émet un rayonnement intense). La confrontation entre le rayonnement solaire et les éléments du système climatique font qu'à la surface du sol, la densité de puissance n'est plus que de 0.9 kW/m^2 , en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et gaz carbonique. En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption (Fig.1.7).

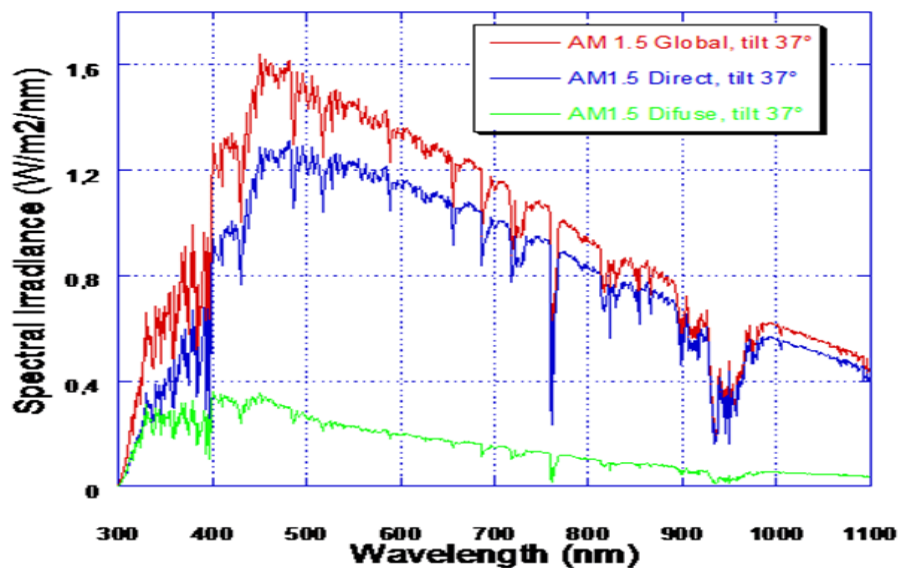


Fig.1.7 L'irradiance en fonction des longueurs d'ondes

1.6. Notion de la Masse d'Air :

Quand le soleil est directement vertical (position du zénith), la quantité d'énergie reçue à midi est max car l'épaisseur de l'atmosphère est minimum au niveau de la mer, c'est repéré comme : Air Mass 1 (AM1), masse d'air. L'énergie solaire atteignant la surface terrestre dans cette condition n'est plus que de 1000 Wm^2 . N'importe quel changement de l'angle du soleil (l' $\text{AM} > 1$) l'énergie arrivant à la surface de la terre diminue [17].

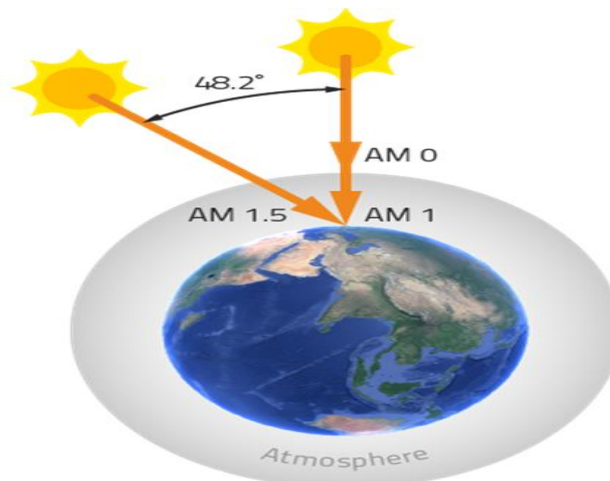


Fig.1.8 l'Air Mass

L'Air Masse définie par :

$$AM = \frac{1}{\cos \alpha}$$

- α l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale.
- AM1 = correspond au soleil au zénith ($\alpha = 0$)
- AM4 = correspond à l'horizon ($\alpha = 75^\circ$)
- AM1.5 = correspond ($\alpha = 48,2^\circ$)
- AM0 utilisé pour préciser les conditions au dessus de l'atmosphère AM

1.7. Matériaux photovoltaïques:

L'intérêt de l'utilisation de semi conducteurs pour la réalisation des cellules photovoltaïques tient à la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser, que par la direction que peut prendre ce courant, la possibilité de moduler dans le temps et dans l'espace la concentration interne des porteurs de charges. Cette faculté est elle-même dépendante de la structure électronique fondamentale des semi-conducteurs qui les différencie nettement des métaux et dans une moindre mesure des isolants [18]. En effet les semi conducteurs produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin. En 2011, 87 % des installations photovoltaïques installées dans le monde comportaient du silicium mono ou multi cristallin. Bien qu'étant l'élément chimique le plus abondant sur Terre après l'oxygène, le silicium ne peut être trouvé à l'état pur. Il doit donc être extrait de la silice, purifié,

mis en forme puis dopé avant d'être utilisé. Toutes ces opérations ont un important coût énergétique. Pourtant aujourd'hui le silicium cristallin est utilisé par 90% des panneaux produits dans le monde. Mais il existe de nombreuses autres technologies déjà industrialisées comme les couches minces ou en phase de recherche.

1.7.1. La bande interdite:

La famille des matériaux semi-conducteurs, peut être classée en deux familles. Les matériaux à gap direct, comme la plupart des composés issues des colonnes III- V du tableau périodique et les matériaux à gap indirect comme le silicium (colonne IV) [16]. La bande interdite (l'énergie de gap) E_g d'un semi-conducteur détermine comment réagit une cellule solaire à la lumière. Le tableau 1.1 montre les valeurs de la bande interdite de quelques semi conducteurs. Elle est propre à chaque semi-conducteur mais selon le besoin on la change en les combinant (composés binaires, ternaires....).

Matériel	Bande interdite (eV) à 300 k
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.42
InP	1.34
CdS	2.42
CdTe	1.48

La bande interdite du matériau semi-conducteur détermine la longueur d'onde de la lumière nécessaire pour générer de l'énergie électrique. La relation reliant la bande interdite et la longueur d'onde est:

$$\lambda = hc/E_g = 1.24/E_g$$

Donc : Energie du photon = $1.24/\lambda$ Où

- λ est la longueur d'onde en μm

- h est la constante de Planck,
- c est la vitesse de la lumière dans le vide
- E_g est l'énergie de gap en eV ($1\text{eV}=1.6.10^{-19}\text{J}$)

Dans le cas d'arséniure de gallium, la longueur d'onde qui correspond à 1.42 eV est 0.873 μm . A une énergie supérieure à 1.1 eV, le silicium génère de l'électricité. Pour l'arséniure de gallium, une lumière d'énergie supérieure à 1.43 eV excite ses électrons de la couche extérieure

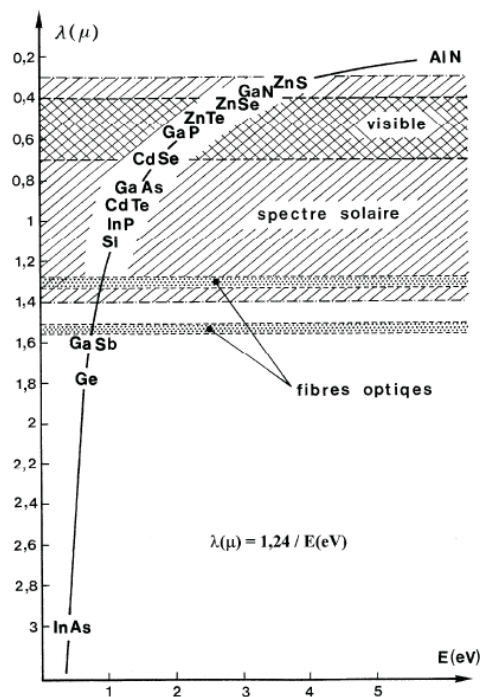


Fig.1.9 Rayonnements et semi-conducteurs [16]

On voit bien que le spectre solaire conditionne le choix des matériaux pour les convertisseurs d'énergies.

I.8 Principe de la conversion photovoltaïque

Considérons une jonction P-N recevant un rayonnement de fréquence ν , telle que $h\nu > E_g$. Si les photons incidents interagissent avec les électrons de la bande de valence en leur communiquant leur énergie, ceux-ci passent dans la bande de conduction y'est laissant des trous. Le rayonnement incident excite des paires électron-trou. Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N se diffusent. Seuls atteignent la zone de charge d'espace et les porteurs libérés de part et d'autres de la

jonction à une distance inférieure à leur longueur de diffusion L , pris et accélérés par le champ électrique E ils traversent la zone de transition. La région N reçoit des électrons et se charge négativement, la région P accepte des trous et devient positive. Le rayonnement incident a pour effet de polariser la jonction en direct.

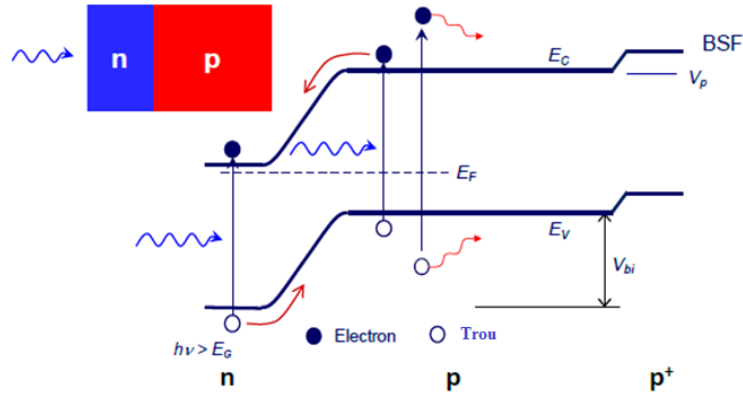


Fig. I.10 Profil de bande d'une jonction P-N

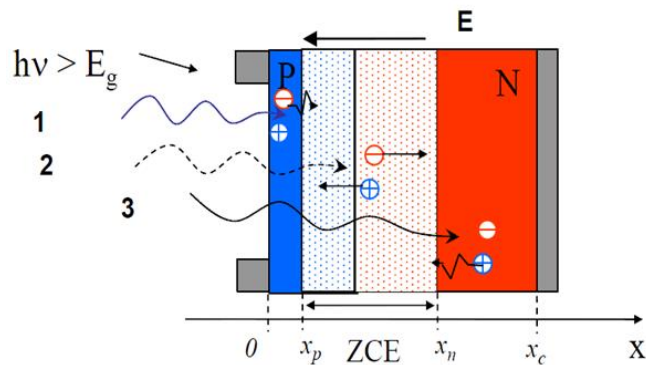


Fig. I.11 Jonction P-N éclairée

Les porteurs séparés créent un champ électrique E' qui est opposé au champ E . Le champ résultant est donc $E - E'$, ce qui veut dire que la différence de potentiel électrostatique entre le côté P et le côté N est réduite de V_d à $V_d - V$ comme le montre la figure (1.10). Ceci va conduire à une auto-polarisation dans le sens passant de la diode. La tension V est la même tension qu'il faudrait appliquer dans le sens passant de la diode non éclairée pour qu'il laisse passer un courant, I_d , égal au photo-courant, I_{ph} .

Le résultat global étant la création d'une différence de potentiel V , aux bornes de la jonction. L'apparition de cette tension aux bornes d'une jonction illuminée porte le nom : « Effet photovoltaïque ».

La valeur maximum de V est V_d , lui-même inférieur à $\frac{E_g}{q}$

$$V_d = \frac{E_g}{q} + \frac{KT}{q} \log\left(\frac{N_a N_d}{N_c N_v}\right) \quad (\text{I.1})$$

I.9 Les cellules solaires

La figure (1.11) représente une cellule solaire éclairée, le rayonnement arrivant sur cette cellule sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule, les photons dont l'énergie est supérieure à l'énergie du gap seront absorbés.

I.9.1 Cellule solaire idéale

Si la caractéristique de la jonction est de la forme :

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

I_s : courant de saturation.

On peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'un photo-courant supplémentaire, I_{ph} . Dont le sens est opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule éclairée, on recueille ce courant.

Le courant sous lumière vaut :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (\text{I.3})$$

Et la tension V est donnée par :

$$V = QU_t \ln\left(\frac{I_{ph} + I_s - I}{I_s}\right) \quad (\text{I.4})$$

Où $U_t = \frac{KT}{q}$, Q est le facteur de qualité.

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire éclairée est montrée sur la figure (1.14).

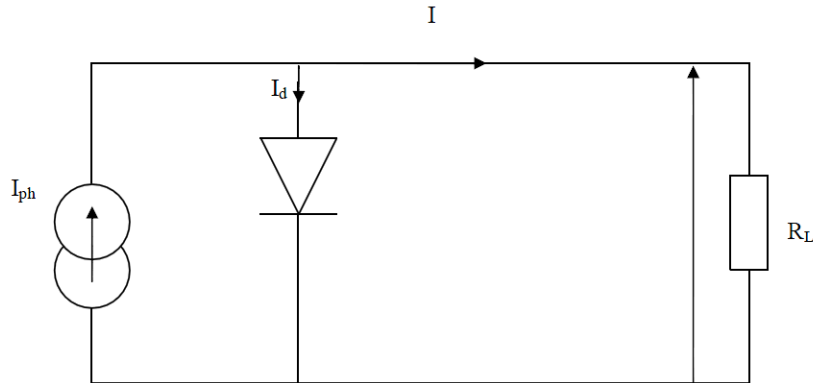


Fig. I.12 Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale

I.9.2 Cellule solaire réelle

La figure (I.13) présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer sur la caractéristique I-V de la cellule.

La première est la résistance série, R_s , cette résistance est liée à l'impédance des électrodes et de la base, il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction.

La deuxième est la résistance shunt, R_{sh} , qui correspond aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge.

L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances parasites R_s et R_{sh} s'écrit donc :

$$I(V) = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.5)$$

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V+R_s I}{QU_r}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

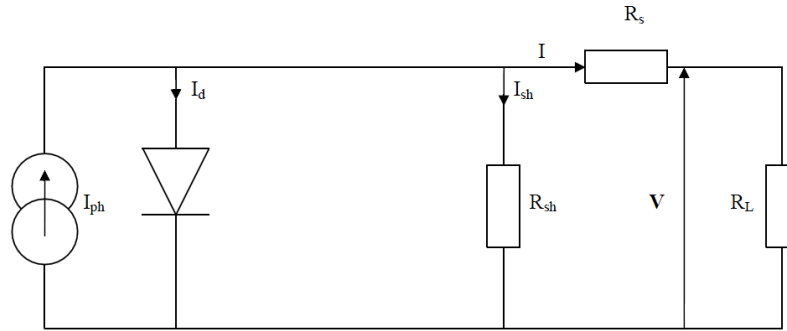


Fig. I.13 Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle

I.10 Caractéristique d'une cellule solaire

I.10.1 Le courant de court circuit, I_{sc}

Le courant de court circuit est le courant débité par la cellule sous éclairement en court-circuitant la sortie. C'est à dire que : $I_{sc} = I (V=0)$.

Pour une cellule solaire idéale le courant de court circuit est égal au courant de photo génération I_{ph} .

I.10.2 La tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire : $V_{co} = V (I=0)$.

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{co} = QU_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (I.7)$$

I.10.3 La réponse spectrale, $SR(\lambda)$

La réponse spectrale d'une cellule solaire est le rapport du courant total généré par la cellule au courant qui peut être généré pour chaque longueur d'onde du spectre incident.

Elle renseigne sur la réaction de la radiation incidente et permet de fixer la gamme d'utilisation de la cellule.

$$SR(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{qF(\lambda)(1 - R(\lambda))} \quad (I.8)$$

I.10.4 La puissance maximale, P_m

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit $(V.I)$ est maximum.

Si V_m I_m sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximum est la surface du plus grand rectangle de côtés V_m et I_m qu'on peut inscrire sous la courbe $I(V)$ (Fig.1.14)

$$P_m = (IV)_{\max} = I_m V_m \quad (\text{I.9})$$

I.10.5 Le facteur de forme, FF

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit $I_{cc}V_{oc}$. Il indique la qualité de la cellule, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites. R_s et R_{sh} .

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} V_{oc}} \quad (\text{I.10})$$

I.10.6 Le rendement de conversion, η

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance du rayonnement incident.

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (\text{I.11})$$

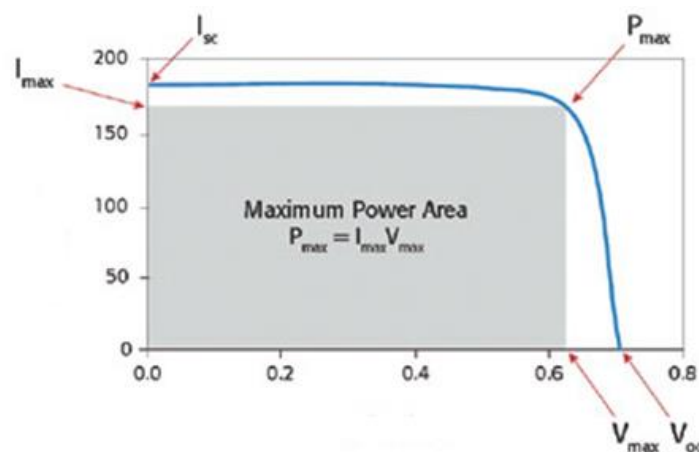


Fig. I.14 Caractéristique courant tension d'une cellule solaire éclairée

I.11 Les pertes physiques et technologiques

Le rendement d'une cellule est affecté par différents types de pertes, ce qui fait que toute l'énergie incidente n'est pas convertie en électricité. Nous allons décrire ces pertes ici.

Absorption incomplète des photons : Les photons d'énergie inférieure à celle de la bande interdite du silicium, de 1,12 eV, ne peuvent être absorbés par le matériau pour produire des paires électron-trou, car les électrons ne peuvent pas passer le gap. Ainsi le domaine infrarouge au-delà de 1100nm, qui représente environ 27 % de l'énergie incidente, ne peut être utilisé par la cellule.

Excès d'énergie des photons : En revanche les photons d'énergie supérieure à la bande interdite seront absorbés. Cependant, la différence d'énergie entre celle du photon et celle du gap ne sera pas exploitée, mais perdue par thermalisation. Environ 28% de l'énergie incidente se trouve inutilisée pour cette raison, notamment dans les domaines visible et ultraviolet.

Recombinaisons du silicium : La tension de circuit ouvert ne peut pas dépasser l'énergie du gap E_g/q plus, en raison de la recombinaison Auger, la tension a une limite supérieure encore réduite [19].

Facteur de forme : Dans la Figure (I.14), la courbe I(V) de la cellule n'est pas carrée, mais suit l'exponentielle de l'équation liée à la statistique de Boltzmann. par conséquent, Le facteur de forme ne peut être supérieur à 89%.

Les pertes que nous venons d'évoquer sont toutes dues à la physique de la cellule et sont inévitables dès lors qu'il s'agit d'une cellule de silicium cristallin. Elles ramènent le rendement à une valeur maximale théorique de 29 % [20].

D'autres pertes sont de nature technologique, et peuvent être atténuées par un procédé de fabrication optimisé. Elles sont de trois types principaux.

Les pertes optiques : Elles proviennent de photons qui ne sont pas absorbés par le silicium, malgré leur énergie supérieure au gap. Il en résulte principalement une réduction du courant de la cellule.

- ❖ La collecte des porteurs en face avant utilise une grille de métal. Cette grille n'étant pas transparente, elle cause de l'ombre sur la cellule, et donc des zones où aucun photon ne pourra pénétrer. Pour cette raison, on essaie de

minimiser la surface de cette grille. Cependant, si elle est trop faible, cela créera des pertes résistives.

- ❖ L'indice de réfraction optique du silicium est beaucoup plus élevé que celui de l'air, ce qui cause une réflexion importante.
- ❖ La profondeur d'absorption des photons de grandes longueurs d'onde est supérieure à l'épaisseur de la cellule (Figure I-15). Cela signifie que le silicium est partiellement transparent pour ces photons.

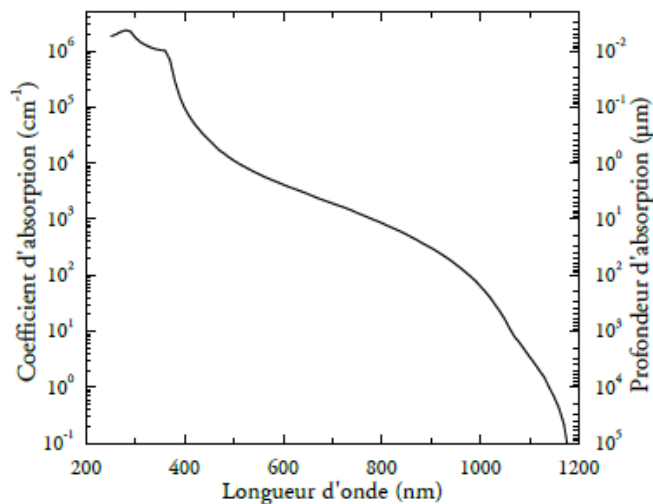


Figure I-15 Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration de la lumière dans le silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde à 300K.

Les pertes par recombinaison : Une fois que la paire électron-trou est formée par absorption d'un photon, les porteurs de charge doivent migrer vers la ZCE et vers les zones de collecte. En chemin, il est possible qu'un électron et un trou s'assemblent : c'est la recombinaison.

Les porteurs de charge sont alors perdus, ils ne pourront plus être collectés pour être utiles au circuit. Le temps et la distance parcourus par un porteur avant d'être recombinaison sont caractérisés par leur durée de vie et leur longueur de diffusion.

Les pertes résistives : Le courant, en traversant une zone de résistivité non nulle, génère des pertes par effet Joule. C'est le cas dans l'émetteur entre deux lignes de métallisation, dans la base, au contact entre le semi-conducteur et le métal, dans la métallisation et dans les interconnexions du module. La somme de toutes ces pertes est reflétée par la résistance série de la cellule. L'autre type de perte résistive est la fuite de

courant court-circuitant la cellule, par exemple si la jonction n'est pas correctement ouverte aux bords de la cellule ou si la métallisation traverse l'émetteur.

En tenant compte des pertes technologiques, la cellule peut être modélisée par le schéma de la Figure (I-16) à deux diodes. L'équation de sa courbe $I(V)$ est alors

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{qV - IR_s}{n_1 KT}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{qV - IR_s}{n_2 KT}} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (I.12)$$

Avec R_s la résistance série, correspondant aux pertes par effet Joule

R_{sh} La résistance shunt, correspondant aux fuites de courant

I_{01} Le courant de génération-recombinaison dans la ZCE

I_{02} Le courant de diffusion dans les zones neutres (zone n et zone p)

$n_1 = 1$ et $n_2 = 2$ les facteurs d'idéalité des diodes 1 et 2 respectivement

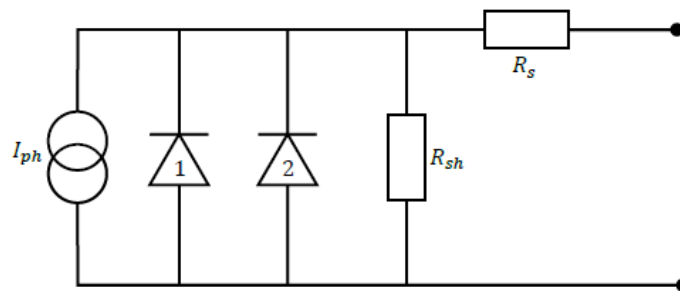


Figure I-16 Schéma équivalent d'une cellule solaire.

Les pertes optiques sont reflétées par une baisse de la valeur de I_{ph} , les pertes résistives par R_s et R_{sh} . La recombinaison se traduit par les valeurs de I_{01} , I_{02} , n_1 et n_2

I-12 Conclusion

A travers ce chapitre, l'importance de l'énergie photovoltaïque, les caractéristiques, les pertes physiques et technologiques d'une cellule solaire ont été exposées d'une façon très explicite.

Parmi les causes de la réflexion citée dans ce chapitre, on note les pertes optiques, la différence des indices de réfraction de l'air et de celui du semi-conducteur.

Afin de l'atténuer on peut effectuer une adaptation d'indice, par un dépôt d'une couche antireflet (OTC) en face avant.

Pour mieux comprendre l'impact du dépôt d'un OTC en face avant sur les caractéristiques de la cellule, les notions essentielles des oxydes transparents conducteurs seront bien exposées dans le chapitre suivant.



Chapitre II

**Les revêtements par OTC et leur impact
sur le rendement de la conversion**

II.1. Introduction

Il existe une famille d'oxydes qui, en plus d'être transparents, peuvent devenir conducteurs (type n) s'ils possèdent un excès d'électrons dans leur réseau. Cet excès d'électrons peut être créé soit par des défauts de structure induisant un déséquilibre dans la stœchiométrie de l'oxyde, soit par un dopage approprié. On les appelle ces, les oxydes transparents conducteurs. Les OTC dans les cellules solaires sont employés comme électrodes transparentes. Ils doivent nécessairement avoir une haute transmission optique afin de permettre un transport efficace des photons jusqu'à la couche active et également une bonne conductivité électrique qui est requise pour obtenir le moins de pertes de transport des charges photo-générées.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude bibliographique sur les oxydes transparents conducteurs (OTC).

II.2. Les oxydes transparents conducteurs (OTC)

Les oxydes transparents et conducteurs (Transparent Conductive Oxides : OTC) sont des matériaux prometteurs. Depuis la découverte au début du siècle de la double propriété de conductivité électrique et transparence dans le domaine du visible [21], la recherche s'est vraiment intensifiée à partir des années 80. L'avènement de nouvelles technologies avec la démocratisation des écrans plats ou des panneaux solaires a contribué à cette émergence.

Un des facteurs illustrant l'activité liée à une recherche spécifique est le nombre de publications éditées par année portant sur ces matériaux. La figure II.1 montre l'évolution des publications concernant l'oxyde de zinc, d'indium et d'étain depuis les années 70 jusqu'en 2008. Ces trois oxydes métalliques sont les plus étudiés car ils ont démontré les meilleures propriétés. Nous remarquons que l'oxyde de zinc est le plus étudié récemment. L'explication peut venir du fait que l'oxyde de zinc est aussi utilisé dans de nombreuses applications optoélectroniques telles que les diodes électroluminescentes (LED) émettant dans les UV. Les deux autres oxydes sont principalement étudiés comme électrodes transparentes. Néanmoins, de nombreux autres oxydes métalliques existent avec des propriétés plus ou moins similaires.

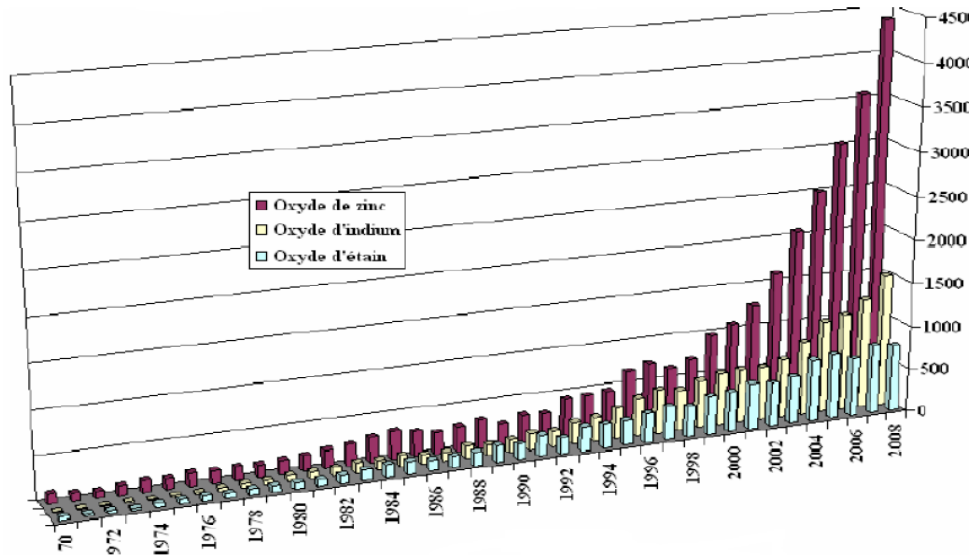


Figure II.1 : Evolution du nombre de publications traitant de ZnO, In₂O₃ et SnO₂ [21].

Les (OTC) possèdent un gap élevé et sont en fait des semi-conducteurs dégénérés, c'est-à-dire que leur niveau de Fermi se situe tout proche de la bande de conduction (BC), voire même à l'intérieur de cette bande, pour les (OTC) fortement dopés. Cela signifie que la BC est déjà bien remplie d'électrons à température ambiante, rendant ainsi les (OTC) conducteurs. De plus, le gap élevé des OTC (~ 3-4 eV) les empêche d'absorber les photons ayant une énergie inférieure à celle du gap, et les rend transparents à la lumière visible. Grâce à des technologies telles que : la triple jonction absorbant tout le spectre solaire, des rendements de plus de 35 % peuvent être atteints. Des chercheurs à l'institut Fraunhofer des systèmes à Energie solaire ont obtenu l'un des plus hauts records : un rendement de 41.1 %. Leur système associe un concentrateur solaire d'un facteur de 454 qui concentre la lumière sur une cellule multi-jonction de 5 mm² de surface. Les couches actives sont composées de la superposition de GaInP/GaInAs sur substrat de germanium.

II.3. Critères de choix des oxydes transparent conducteurs

Le facteur de qualité Q (appelé aussi facteur de mérite F_m) d'un film mince OTC peut être défini comme le rapport de la conductivité électrique σ sur l'absorbance optique dans le visible A .

$$Q = \frac{\sigma}{A} = -\{r \ln(T + R)^{-1}\} = T \cdot \sigma \cdot d \quad (\text{II.1})$$

Où σ [$\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$] conductivité électrique.

A [cm^{-1}] coefficient d'absorption

T [%] transmission totale dans le visible.

R [%] réflexion totale dans le visible.

d [cm] épaisseur du film

La diversité des OTC et de leurs applications correspond au fait que le critère de choix d'un OTC ne dépend pas uniquement du facteur de qualité. D'autres paramètres, tels les stabilités thermique, chimique et mécanique, ou encore la toxicité, le faible coût de préparation, les contraintes de mise en œuvre, ou également le travail de sortie (fondamental pour ce qui concerne l'injection des porteurs), jouent un rôle clé dans le choix des OTC [22].

II.4. Méthodes de dépôt des OTC

De nombreuses techniques peuvent être employées influençant différemment les propriétés des couches.

CVD : Dans un procédé CVD (Chemical Vapor Deposition) typique, le substrat maintenu à une température fixe est exposé à un ou plusieurs précurseurs en phase gazeuse, qui réagissent et/ou se décomposent à la surface du substrat pour générer le dépôt désiré. Cette technique peut, entre autres, être réalisée sous pression réduite.

ALD : Le principe de l'ALD (Atomic Layer Deposition) est un procédé séquentiel. Le processus comprend des phases de dépôt qui consistent à l'envoi d'une faible quantité de précurseurs, et des phases de purge. Ces différentes phases composent le cycle de dépôt de l'ALD qui est reconduit pour atteindre l'épaisseur souhaitée.

Pulvérisation cathodique: La pulvérisation cathodique est une technique qui synthétise un matériau sur un substrat à partir d'une source solide appelée cible. L'application d'une différence de potentiel entre la cible et les parois du réacteur au sein d'une atmosphère raréfiée permet la création d'un plasma froid. Sous l'effet du champ électrique, les espèces positives du plasma se trouvent attirées par la cathode (cible) et entrent en collision avec cette dernière. Elles communiquent alors leur quantité de mouvement, provoquant ainsi la pulvérisation des atomes sous forme de particules neutres qui se condensent sur le substrat et forment le film.

Procédé Sol-gel : A partir d'une solution chimique contenant le précurseur, deux types de procédés peuvent être utilisés pour former des films minces : le trempage (dip-coating) et la centrifugation (spin-coating). Le premier consiste à tremper le substrat dans la solution afin de laisser une fine couche à sa surface. La vitesse verticale de trempage du substrat y influence l'épaisseur de la couche. Pour le second, le film résulte

de la rotation du substrat où l'on a déposé la solution. En contrôlant la vitesse de rotation, l'accélération et les propriétés de la solution, l'épaisseur peut être ajustée assez précisément.

II.5. Applications des OTC

Les propriétés des OTC démontrées précédemment permettent d'envisager leur emploi dans de nombreuses applications. Dans cette partie, nous allons présenter les principales utilisations de ces matériaux.

II.5. 1. Capteurs à gaz

En présence de certains gaz, les propriétés électriques des OTC peuvent changer. Le gaz considéré s'adsorbe à la surface de la couche mince ou des joints de grains de celui-ci. La molécule adsorbée peut capturer un électron libre. Il en résulte donc une réduction de la conductivité électrique. Le rapport entre les résistivités avant et après la mise en présence du gaz est appelé sensibilité du capteur. Le gaz à détecter ne doit pas nécessairement être adsorbé à la surface du capteur, il peut venir perturber les espèces oxygénées déjà présentes à la surface et perturber indirectement la résistivité.

Le dopage joue également un rôle important, Shishiyanu et al montrent que le dopage étain détient la plus grande sensibilité comparé aux dopages Al, Cu ou Pd [23]. D'autres études optimisent la concentration du dopant pour augmenter la sensibilité comme, par exemple, le dopage à l'indium de couche de SnO₂ pour détecter du CO [24].

II.5. 2. Systèmes optoélectroniques

Des diodes électroluminescentes sont réalisées avec, entre autres, des couches de OTC. Par exemple, des LED sont fabriquées avec la jonction n-ZnO/p-GaN. Grâce à l'émergence de OTC de type p, des systèmes basés sur des jonctions PN réalisées tout en OTC ont vu le jour. Ils ne sont qu'au stade expérimental mais la porte est ouverte pour l'électronique transparente.

II.5. 3. Cellules solaires

Les OTC se trouvent dans différents types de cellules solaires. Ils peuvent être utilisés dans tous les types de cellules telles que (a-Si:H), poly-Si:H, CIGS, polymères, etc. Avec leurs propriétés qui diffèrent d'un OTC à l'autre, Ces dernière sont liées à la concentration N_V : la transmission est inversement proportionnelle et la conductivité est proportionnelle. Une concentration élevée, par exemple, augmente la conductivité électrique mais diminue aussi la transmission dans le domaine du visible et du proche

infrarouge. Ceci est dû à une absorption et une réflexion des charges libres. La valeur optimale de N_V dépend du rendement quantique de la couche active.

Fortunado et al. Dressent un panorama des différentes utilisations des OTC pour les cellules solaires. [25]

II.6. Les OTC les plus exploités

II.6.1. L'oxyde de zinc (ZnO)

Pendant de nombreuses années, les principales applications de l'oxyde de zinc se sont situées dans les domaines de l'industrie chimique et pharmaceutique. Actuellement de nouvelles voies de recherches en optoélectronique suscitent un très vif intérêt pour ce matériau vu ses propriétés multiples : grande conductivité thermique, grande capacité calorifique, constante diélectrique moyenne, haute résistivité, faible absorption d'eau. Il est important de noter que sous sa forme pigmentaire, il diffuse et absorbe fortement les rayonnements ultraviolets [26].

II.6.1.1. Quelques propriétés de ZnO

Le ZnO est un semi-conducteur de large gap, il est transparent dans le visible et dans le proche infrarouge. Il présente un ensemble de propriétés qui permettent son utilisation dans un certain nombre d'applications comme par exemple des varistances employées pour limiter de grandes coupures de tension (dispositifs électroniques en céramique poly-cristallins possédant des caractéristiques courant-tension non linéaires). Il peut également trouver des applications en optoélectronique, cathodoluminescence, photoluminescence, électroluminescence, comme capteur de produit chimique dans les couches minces [27]. Il possède aussi des propriétés électromécaniques très intéressantes, ce qui lui permet d'être utilisé, à grande échelle, comme conducteur transparent dans les dispositifs acoustiques et dans les lignes à retard micro-ondes ou encore comme matériel piézoélectrique. [28, 29].

a. Propriétés cristallographiques

L'oxyde de zinc appartient à la classe cristalline $P63mc$. Il se cristallise en un réseau hexagonal de type Wurtzite ; La structure Wurtzite contient quatre atomes par maille dont les positions sont : O^{-2} : (0; 0; 0); (2/3; 1/3; 1/2) ; et Zn^{+2} : (0; 0; 3/8); (2/3; 1/3; 7/8),

Dans lequel les ions d'oxygènes O^{-2} sont disposés suivant un réseau de type hexagonal compact, où les ions de zinc Zn^{+2} occupent la moitié des positions interstitielles tétraédriques ayant le même arrangement que les ions d'oxygène (Voir Figure II.2).

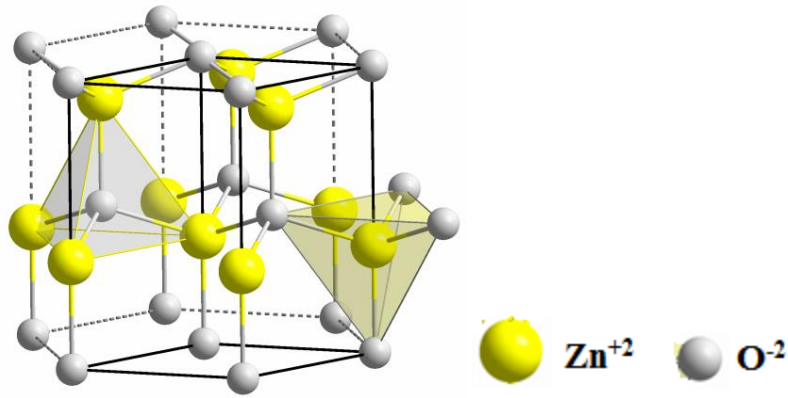


Figure II.2 : Structure cristalline du ZnO [30].

La maille hexagonale de la structure Wurtzite se caractérise par trois constantes de réseau $a = 3.25 \text{ \AA}$, $c = 5.12 \text{ \AA}$ et u ; a étant le côté d'un losange constituant la base, c le côté parallèle à l'axe (oz) et u est une coordonnée intérieure le long de cet axe. Ces constantes déterminent la position relative des sous-réseaux de l'anion O^{2-} et du cation Zn^{+2} . La coordonnée u est définie par la relation suivante :

$$u = \frac{1}{4} + \frac{c^2}{3a^2} \quad (\text{II.2})$$

b. Propriétés optiques

L'interaction de la lumière (onde électromagnétique) avec la matière (électrons du matériau) peut expliquer clairement les propriétés optiques d'un matériau.

Lors de l'application de la théorie de dispersion sur un matériau, il convient de séparer l'absorption fondamentale de l'absorption des porteurs libres. Si seule la première contribution est présente, le matériau a la qualité d'un diélectrique. Le cas échéant, le matériau est un métal. Pour les semi-conducteurs, les deux contributions sont importantes.

L'indice de réfraction de l'oxyde de zinc sous la forme massive est égal à 2,0 [31]. En couches minces, son indice de réfraction et son coefficient d'absorption varient en fonction des conditions d'élaboration des couches. L'indice de réfraction a une valeur variant entre 1,7 et 2,2 suivant les auteurs [32,33]. L'amélioration de la stichométrie du ZnO conduit à une diminution du coefficient d'absorption et à une augmentation de l'énergie de la bande interdite [34,35].

c. Propriétés électriques

C'est un semi-conducteur dégénéré de type n , La grande conductivité des couches d'oxydes purs est due à la forte concentration en porteurs libres (électrons), étant donné que la mobilité dans ces couches est considérablement plus faible que celle en volume

du matériau correspondant. La forte concentration en électrons est attribuée à la déviation par rapport à la stœchiométrie (ou défauts dans la structure).

Une conductivité élevée ($> 5.10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) est possible dans le ZnO de type *n*, en raison des défauts intrinsèques, des dopants (Al, In, Ga, B, F) ou en combinaison [36]. Les mobilités des électrons dans des couches minces de ZnO rapportées, sont typiquement de l'ordre de 20 à 30 $\text{cm}^2/\text{V.S}$. En outre, la mobilité maximale obtenue dans les cristaux simples de ZnO est de l'ordre de $\sim 200 \text{cm}^2/\text{V.S}$.

II.6.2.L'oxyde de titane (TiO_2)

L'oxyde de titane est le pigment blanc le plus utilisé. Il n'est pas toxique et remplace le blanc de plomb. Il est obtenu à partir du minerai du titane. Environ 95% de la quantité de minerai extraite est utilisée pour la production du pigment et seulement 5% pour la préparation du métal. L'oxyde de titane est largement produit dans le monde, avec un volume de vente annuel supérieur à 3,5 millions de tonnes et une consommation mondiale augmentant d'environ 2% par ans.

II.6.2.1.Les propriétés de TiO_2

a. Propriétés structurales

Le TiO_2 existe sous trois formes de structure cristalline principales: anatase (tétraгонаle), rutile (tétraгонаle) et brookite (orthorhombique). Ces structures peuvent être décrites en termes d'unité octaédrique (TiO_6). Les trois structures cristallines varient en fonction de la distorsion de ces unités et leur modèle d'assemblage, comme le montre la figure (II.3). Le dioxyde de titane est commercialement disponible selon deux structures cristallines : l'anatase et le rutile. Dans le cas de l'anatase, les mailles cristallographiques sont connectées par les sommets des unités octaédriques, alors qu'elles sont reliées par les arêtes dans le cas de la structure rutile. Il en résulte que la phase rutile est plus compacte que l'anatase. Les densités de ces deux composés sont de 3.9 g/cc pour l'anatase et 4.2 g/cc pour le rutile.

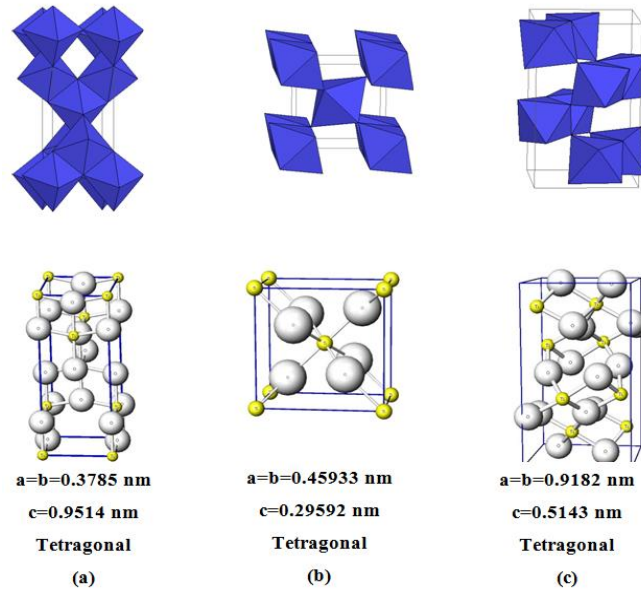


Figure II.3: Mailles cristallographiques des phases anatase (a), rutile (b), et brookite (c) du TiO_2 .

b. Propriétés optiques et électrique

Pour les trois formes cristallines de TiO_2 précédemment citées, la bande de valence est formée par le recouvrement des orbitales e_g du titane et $2p$ de l'oxygène. La bande de conduction est quant à elle formée par les orbitales e_g et t_{2g} du titane. La largeur de la bande interdite, à l'origine de l'absorption, varie selon la phase considérée. Une méthode pour déterminer les énergies des transitions optiques est d'utiliser les relations entre le coefficient d'absorption α d'un composé et l'énergie du rayonnement. Ces relations sont les suivantes :

➤ pour une transition indirecte: $\alpha = \frac{1}{h\nu} \cdot (h\nu - E_g)^2$ si $h\nu > E_g$ (II.3)

➤ Pour une transition directe : $\alpha = \frac{1}{h\nu} \cdot (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}$ si $h\nu > E_g$ (II.4)

Ainsi, le tracé des courbes $(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}$ et $(h\nu - E_g)^2$ en fonction de $(h\nu)$ permet, par extrapolation, d'extraire la valeur des énergies des transitions indirectes et directes.

Pour déterminer le coefficient d'absorption, il sera nécessaire d'utiliser des méthodes différentes suivant la mise en forme du matériau étudié. S'il s'agit de suspensions de particules non diffusantes, de simples mesures d'absorption permettent d'extraire, à partir de la relation :

$$\alpha = 2303 \cdot \left(\frac{A\rho}{l_c} \right) \quad (\text{II.5})$$

Ou

- A est l'absorbance de l'échantillon ;
- ρ est la masse volumique de l'anatase;
- c est la concentration en TiO_2 (en g/cm^3) ;
- l est le chemin optique parcouru par le faisceau (en cm).

Le TiO_2 anatase est un semi-conducteur à gap indirect. Par conséquent, son coefficient d'absorption est faible pour les longueurs d'onde d'énergie proche de l'énergie du gap. Il est donc nécessaire de mesurer l'absorption de TiO_2 sur des solutions concentrées, afin de diminuer l'erreur sur la mesure.

Une limitation de cette méthode est que TiO_2 a un indice de réfraction important : 2,55 pour l'anatase à 590 nm. Un important contraste d'indice entre TiO_2 et son milieu environnant peut être à l'origine d'importants phénomènes de diffusion. Pour éviter cela, la taille des particules doit être au moins dix fois plus petite que la longueur d'onde de la lumière incidente. Par conséquent, si la mesure d'absorption est réalisée sur des colloïdes (nanoparticules en suspension dans un milieu, par exemple de l'eau) de diamètre supérieur à 30 nm, le résultat sera biaisé du fait de la diffusion. Une alternative permettant de s'affranchir de ce problème est de réaliser des mesures sur poudre en réflexion diffuse.

En effet, les travaux de Kubelka et Munk permettent de lier le coefficient d'absorption de poudres K à leur coefficient de dispersion S (ces coefficients étant exprimés par unité d'épaisseur) [37] :

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (\text{II.6})$$

où R est la réflectance, c'est-à-dire le rapport entre l'intensité diffusée et l'intensité incidente. K étant proportionnel au tracé des courbes $(\alpha \cdot h\nu)^{\frac{1}{2}}$ et $(\alpha \cdot h\nu)^2$ en fonction de $h\nu$ permettra, comme précédemment, d'évaluer les valeurs des énergies des transitions directes et indirectes.

Dans le cas de TiO_2 anatase, ces deux méthodes ont été utilisées et ont permis de mettre en évidence deux transitions indirectes et deux transitions directes. Leurs énergies sont respectivement de 3,2 eV et 3,55 eV d'une part [38], et de 4 eV et 4,3 eV d'autre part.

II.6.3.Sulfure de zinc (ZnS)

a. Propriétés cristallographiques

Les propriétés de sulfure de zinc sont très importantes tant que matériau transparent dans la région visible. Les principaux types de structure de ZnS se présentent sous deux formes, α - phase (structure hexagonale de wurtzite) et β - phase (structure cubique de sphalérite) [39]. La bande interdite est de l'ordre de 3.72 eV pour forme cubique et 3.77eV pour forme hexagonale [40]. Le réseau de la blende ZnS (sphalérite, structure cubique) est une variante du réseau du silicium, puisqu'il est constitué de deux réseaux cubiques faces centrés, l'un de Zn et l'autre de S, décalés du quart de la diagonale principale. Le réseau de la wurtzite de ZnS (structure hexagonale) est constitué de l'alternance de plane de Zn et S, chacun présentant un arrangement hexagonal des atomes correspondants comme on peut le voir sur la (figure II.4) [41].

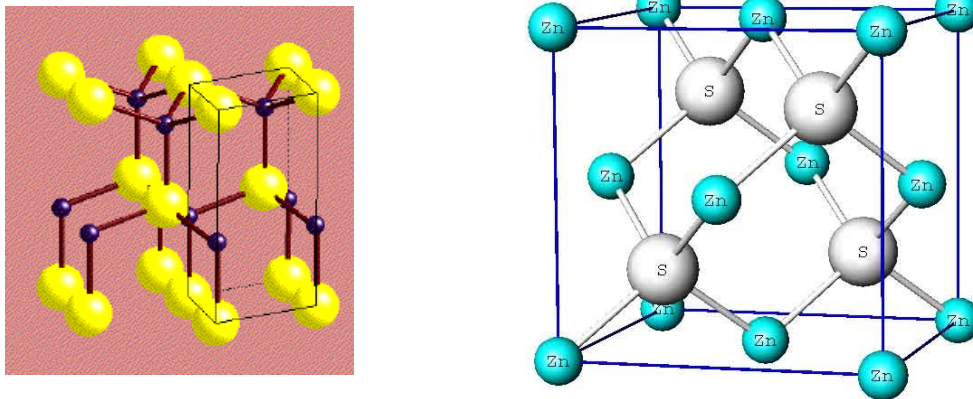


Figure II.4 : structure cristalline de ZnS.

Les principales propriétés des deux structures de ZnS sont représentées sur le tableau suivant:

Tableau II.1 : Comparaison entre les structures cubique (Blende) et hexagonale (wurtzite).

Structure	Blende	Wurtzite
Motif formulaires	ZnS	ZnS $Z' = 2$
Maille et mode de réseau	Cubique F, $a = 5.409$, $Z = 4$	Hexagonale, $a = 3.811 \text{ \AA}$, $c = 6.234 \text{ \AA}$ Translations de réseau + (0, 0, 0)
Motif périodique	ZnS	$Zn_2 S_2$ $Z = 1$
Positions atomiques	Zn^{+2} (0, 0, 0) S^{-2} ($1/4, 1/4, 1/4$)	Zn^{+2} (0, 0, 0) ($2/3, 1/3, 1/2$) S^{-2} (0, 0, $5/8$) ($2/3, 1/3, 1/8$)
Principales données numériques	Compacité $\tau = 0.702$	Compacité $\tau = 0.702$
	Distances interatomiques $d_{c-c} = 2.342$ ($r_{Zn^{+2}} = 0.74$, $r_{S^{-2}} = 1.84$)	Distances interatomiques $d_{c-c} = 2.342 \text{ \AA}$ ($r_{Zn^{+2}} = 0.60 \text{ \AA}$, $r_{S^{-2}} = 1.84 \text{ \AA}$)
	Coordinance $[Zn^{+2}] = 4$, $[S^{-2}] = 4$	Coordinance $[Zn^{+2}] = 4$, $[S^{-2}] = 4$
	Densité massique $\rho = 4.10 \text{ g.cm}^{-3}$	Densité massique $\rho = 3.98 \text{ g.cm}^{-3}$

b. Propriétés électriques

En général, le ZnS est un semi-conducteur de type n [42], l'origine de la grande conductivité des couches de sulfure pures est due à la forte concentration en porteurs (électrons) étant donné la mobilité dans ces couches est considérablement plus faible que celle en volume du matériau correspondant. La forte concentration en électrons est attribuée à la déviation par rapport à la stœchiométrie (ou défauts dans la structure). La déviation à la stœchiométrie peut être due aux vacances d'anions ou à un excès de cations en position interstitielle. La nature exacte des défauts de structure dans la plupart des cas est encore incertaine [44].

Le ZnS est un semi conducteur à gap direct [43], le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence est situé au point r de la zone de Brillouin, la bande interdite est de l'ordre de 3.65 eV qui permet des transitions verticales entre la bande de valence et la bande de conduction, et aussi d'avoir des transitions verticales[45]. Cette valeur de bande interdite peut varier suivant le mode de préparations et le taux de dopage entre 3.65eV et 3.7eV [46].

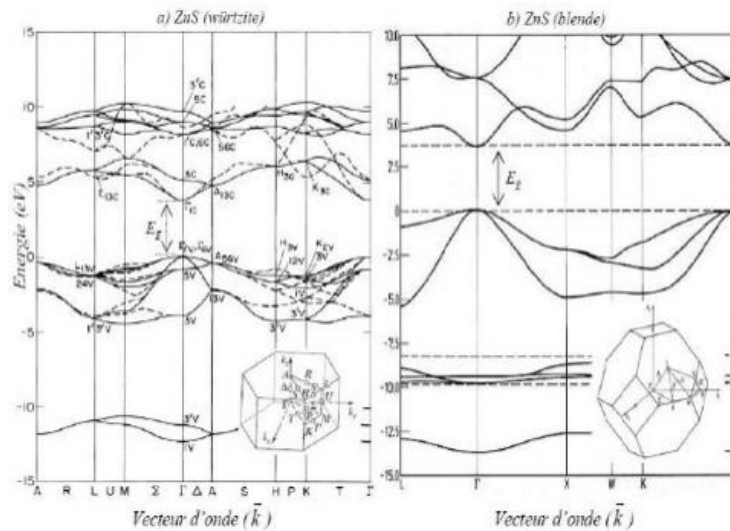


Figure II.5 : Structure de bande de ZnS, avec la première zone de Brillouin de la structure würtzite et blende [44].

c. Propriétés optiques de sulfure de zinc (ZnS)

La transparence optique du ZnS dans les régions visibles du spectre solaire est une conséquence de son large gap ($E_g = 3.65$ eV), le seuil fondamental d'absorption de ZnS se situant dans l'ultraviolet. ZnS est transparent au dessous du niveau de l'absorption à presque 340 nm, bien qu'il soit possible de trouver quelques absorptions qui commencent entre 400 et 440 nm ceci est dû aux déviations de la stœchiométrie. La forme du spectre d'absorption intrinsèque peut être observée seulement sur les couches minces en raison de leur grand coefficient d'absorption.

Le sulfure de Zinc (ZnS) est un matériau à gap direct. Il y a une certaine anomalie dans la littérature concernant l'énergie du gap; Vamage et Yshokawa réclament que le gap d'énergie à la température ambiante de ZnS est de 3.6eV, tandis qu'une bande de valence à la transition de niveau de donneur à 3.3eV explique le fait qu'une plus petite valeur (typiquement 3.4 eV) est souvent rapporté. Ainsi, le gap à la température ambiante de ZnS peut être placé dans la gamme 3.6 à 3.7 eV.

L'indice de réfraction de rang ZnS de 2,41 à 0,5 μm a 2,29 à 1.1 μm . Ces indices s'étalent avec sa transparence élevée, ce qui rend proche de l'idéal comme un antireflet [45].

II.7 Conclusion

Via ce chapitre les oxydes transparents conducteurs (OTC) sont des matériaux prometteurs dans le domaine photovoltaïque, ce qui nous incite à présenter leurs propriétés cristallographiques, optiques et électriques, sans omettre de citer quelques types des(OTC).



Chapitre III

**Modélisation analytique d'une cellule
solaire à base de Si-Ge**

III.1 Introduction

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient.

Le rendement de conversion est affecté par différents types de pertes, ce qui fait que toute l'énergie incidente n'est pas convertie en électricité.

La réflexion de la lumière à la surface avant est l'un des principaux mécanismes de perte qui limitent l'amélioration de l'efficacité de conversion de ces cellules [47]. A l'heure actuelle de nombreux efforts ont été déployés pour réduire cette perte optique, parmi les stratégies les plus utilisées c'est les revêtements par couches antireflet, le revêtement par (OTC) peut réduire la réflexion par interférence destructive de la lumière réfléchi par les interfaces glass-ARC-substrat [48]. Une réduction supplémentaire de réflexion qui peut être réalisé à travers plusieurs couches (OTC), ou par un contrôle précis de la géométrie OTC [49-50], qui permet un passage progressif de l'indice de réfraction de glass au (OTC) de ce fait le (ZnO:Al) est souvent utilisé comme couche antireflet a cause de sa grande transparence et transmission optique, et sa bonne conductivité électrique qui lui permet d'avoir un grand potentiel dans les fabrications des cellules solaires [51], néanmoins technologiquement le ZNO est un matériau important dont l'élément constituant est abondant et le matériau lui-même s'adapte a une variété de technique de dépôt de couche mince: tel que l'évaporation [52-53], MOCVD [54-55], sputtering [56-57], spray pyrolysis [58-59].

Dans ce contexte, un autre moyen pour minimiser la réflexion à la surface existe pour prolonger la trajectoire de la lumière dans la cellule est nommé le confinement optique (light trapping), dans le silicium cristallin ou le silicium amorphe la Texturisation de la surface est utilisée pour réduire l'épaisseur de la cellule sans minimiser l'absorption, elle peut aussi améliorer la tension de circuit ouvert V_{co} [61,62], elle est réalisée par l'intermédiaire d'un procédé de gravure alcaline qui se traduit par une pyramide aléatoire,

Le but de ce travail est consacré principalement à développer un modèle analytique qui permet de découvrir l'effet des paramètres de texturisation de surface (angle et hauteur) et les concentrations de germanium et de l'aluminium sur les caractéristiques de la cellule (R , J_{sc} , V_{co} et η)

III.2 Modèle de simulation

III.2. 1 Structure de la cellule

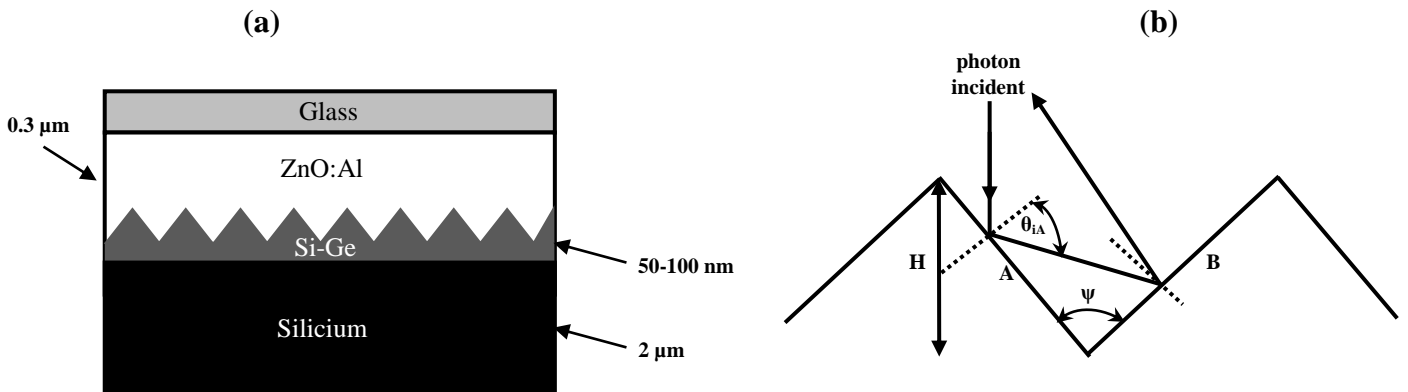


Figure III .1 : (a)cellule solaire à hétérojonction à base de SiGe avec texturisation de la couche (N) et (ZnO :Al) comme couche antireflet (b) illustration de la propagation d'un rayon sur la surface texturée

θ_{iA} : Angle incident sur le plan A,

ψ : Angle de texturisation

H : hauteur de texturisation

III.3. Eclairage, puissance incidente et flux solaire au sol

Pour être utilisable dans le calcul analytique, l'éclairage solaire au sol est approximé par une fonction non linéaire sous la forme [63] :

$$ECL(\lambda) = y_0 + A \left[1 - e^{\frac{-(\lambda-\lambda_0)}{t_1}} \right]^p e^{\frac{-(\lambda-\lambda_0)}{t_2}} \quad (III.1)$$

Où : $0.3 \leq \lambda \leq 2.5 \mu\text{m}$

Par variation de tous les 6 paramètres y_0 , λ_0 , A , t_1 , p et t_2 tout en comparant au spectre solaire, on trouve l'expression suivante :

$$ECL(\lambda) = 0.06977 + 7.0625 \left[1 - e^{\frac{-(\lambda-0.26052)}{0.15994}} \right]^{2.28411} e^{\frac{-(\lambda-0.26052)}{0.22285}} \quad [\text{KW m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (III.2)$$

D'où la puissance incidente au sol

$$P_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} ECL(\lambda) d\lambda \quad [\text{W cm}^{-2}] \quad (III.3)$$

Où $E_{cl}(\lambda)$ en $[W\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}]$

Pour $\lambda_{min}=0.3\ (\mu m)$ et $\lambda_{max}=1.4\ (\mu m)$, on trouve que : $P_i=69.4908\ (mW\ cm^{-2})$.

Par conséquent le flux solaire au sol est (voir la figure (III.1)) :

$$\phi(\lambda) = \frac{E_{CL}(\lambda)}{h\nu} \quad [cm^{-2}\ s^{-1}\ \mu m^{-1}] \quad (III.4)$$

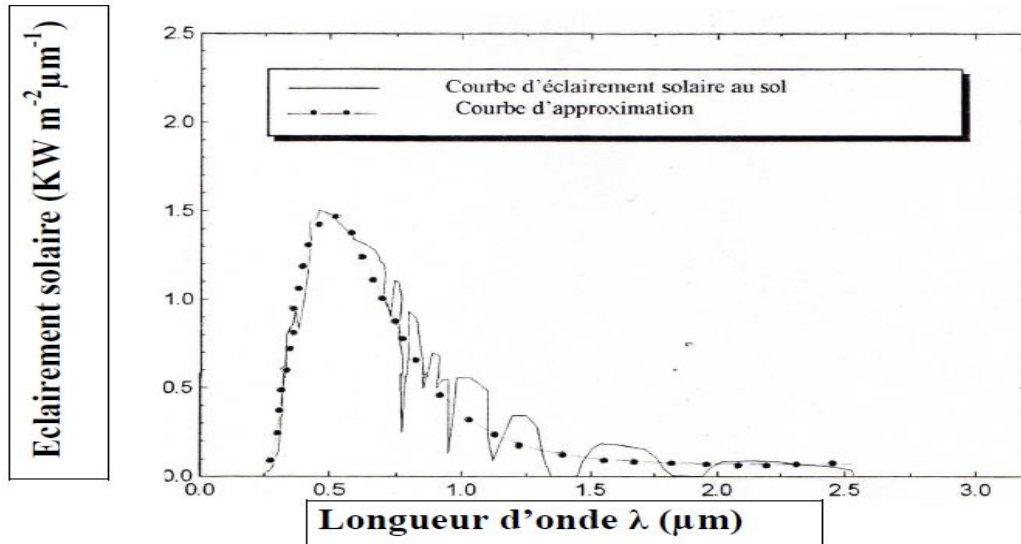


Figure III.2 : Approximation de l'éclairement solaire au sol

III.4. Coefficient d'absorption :

Les valeurs du coefficient d'absorption, $\alpha(\lambda)$ peuvent être trouvées dans des différentes littératures [64].

En particulier, nous avons adopté la relation où le coefficient d'absorption est donné par

$$\alpha(\lambda) = \frac{C}{E} (E - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (III.5)$$

Avec C = constante dépend du semi-conducteur, $E=h\nu$, E_g = gap du semi-conducteur

- **Pour le ZnO:Al** : le coefficient d'absorption dépend du gap, ce dernier varie en fonction de la concentration de l'aluminium dans le mélange $ZnO_{(1-x)}Al_x$

$$E_{g_{ZnO:Al}} = x_{Al} E_{g_{Al}} + (1 - x_{Al}) E_{g_{ZnO}} \quad (III.6)$$

$$\alpha_{ZnO:Al}(\lambda) = \frac{C}{E} (E - E_{g_{ZnO:Al}})^{\frac{1}{2}} \quad (III.7)$$

- **Pour le SiGe** : le coefficient d'absorption dépend du gap, ce dernier varie en fonction du pourcentage de Germanium dans le mélange $Si_{(1-x)}Ge_x$

$$E_{g1}(x_{Ge}) = x_{Ge}E_{g_{Ge}} + (1 - x_{Ge})E_{g_{Si}} \quad (\text{III.8})$$

Et pour une concentration du germanium $x_{Ge}=20\%$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1(\lambda) = \alpha_1(\lambda) = \frac{C}{E}(E - E_{g_{SiGe}})^{\frac{1}{2}} \quad 0.3 \leq \lambda \leq 1.2 \mu m \\ \alpha_1(\lambda) = 0 \quad \lambda > 1.2 \mu m \end{array} \right. \quad (\text{III.9})$$

➤ **Pour le Si** : le coefficient d'absorption est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_2(\lambda) = \frac{C}{E}(E - E_{g_{Si}})^{\frac{1}{2}} \quad 0.3 \leq \lambda \leq 1.1 \mu m; \\ \alpha_2(\lambda) = 0 \quad \lambda > 1.1 \mu m; \end{array} \right. \quad (\text{III.10})$$

$E_{g_{Si}}$: gap du silicium

III.5. Coefficient de réflexion:

Dans notre structure on utilise un modèle analytique basé sur le confinement optique de la lumière « light trapping »,

La texturisation de surface est faite régulièrement au niveau de la couche N de la jonction N- P pour réduire l'effet de réflexion et d'allonger le chemin optique en le rendant oblique à l'intérieur de la cellule. De cette manière, pour les photons, tout se passe comme si la cellule était épaisse de $(W_n/\cos \theta_i)$, deux facteurs contrôlent cette texturisation, l'angle (Ψ) et la hauteur (H), on utilise les lois optiques pour les déterminer. Aussi une couche antireflet (ZnO:Al) sera déposée pour assurer une adaptation d'indices de réfractations.

➤ Pour notre modèle la réflexion est défini par [60]:

$$R = \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos(2\beta)}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos(2\beta)} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$\beta = \frac{2\pi n_2 d}{\lambda}$$

r_{12} : coefficient de réflexion du milieu (glass-ZnO:Al)

r_{23} : coefficient de réflexion du milieu (ZnO:Al-SiGe)

d : l'épaisseur de la couche antireflet (ZnO:Al)

λ : longueur d'onde

Calcul de r_{12} :

L'indice de réfraction optique du SiGe est beaucoup plus élevé que celui du glass, ce qui cause une réflexion importante. Le moyen de l'atténuer est d'effectuer une adaptation d'indice, par un dépôt de diélectrique en face avant, dans notre cas c'est le (ZnO:Al).

Considérons la structuration planaire des couche de ZnO:Al et celle du glass, le coefficient de réflexion dans ce milieu (glass-ZnO:Al) est donné par la relation [60]:

$$r_{12} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (\text{III.12})$$

$$n_2 = \sqrt{\varepsilon_{\text{ZnO:Al}}}$$

$$\text{Avec : } \varepsilon_{\text{ZnO:Al}} = x_{\text{Al}} \varepsilon_{\text{Al}} + (1 - x_{\text{Al}}) \varepsilon_{\text{ZnO}}$$

n_1 : indice de réfraction de glass

n_2 : indice de réfraction du ZnO:Al

ε : permittivité relative

Calcul de r_{23} :

L'utilisation d'une texturisation de la couche N, alliée à une couche antireflet, permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident.

La texturisation triangulaire périodique de la couche N, avec une incidence normale du photon ($\theta_i = 0$) (figure (III.1.b)) favorise la possibilité pour le rayon réfléchi d'arriver une seconde fois à l'interface avec la cellule et donc les chances pour la lumière de pénétrer dans le matériau, le coefficient de réflexion r_{23} du milieu (ZnO:Al-SiGe) donné par :

$$r_{23} = R_A R_B$$

Ou : R_A et R_B sont les coefficients de réflexion du rayon sur les plan A et B.

L'équation si dessus est appliquer sur deux composantes, parallèles et perpendiculaires car le plan n'est pas planaire

$$r_{23} = \frac{R_{\parallel} + R_{\perp}}{2} = \frac{R_{A\parallel} R_{B\parallel} + R_{A\perp} R_{B\perp}}{2} \quad (\text{III.13})$$

$R_{A\parallel} R_{B\parallel}$ Et $R_{A\perp} R_{B\perp}$ Sont donnés par les équations de Fresnel [60] :

$$R_{A\parallel} = \frac{n_3 \cos \theta_{iA} - n_2 \cos \theta_{tA}}{n_3 \cos \theta_{iA} + n_2 \cos \theta_{tA}} \quad R_{A\perp} = \frac{n_2 \cos \theta_{iA} - n_3 \cos \theta_{tA}}{n_2 \cos \theta_{iA} + n_3 \cos \theta_{tA}} \quad (\text{III.13.a})$$

$$R_{B\parallel} = \frac{n_3 \cos \theta_{iB} - n_2 \cos \theta_{tB}}{n_3 \cos \theta_{iB} + n_2 \cos \theta_{tB}} \quad R_{B\perp} = \frac{n_2 \cos \theta_{iB} - n_3 \cos \theta_{tB}}{n_2 \cos \theta_{iB} + n_3 \cos \theta_{tB}} \quad (\text{III.13.b})$$

$$n_3 = \sqrt{\varepsilon_{\text{SiGe}}} \quad \text{ou} \quad \varepsilon_{\text{SiGe}} = x_{\text{Ge}} \varepsilon_{\text{Ge}} + (1 - x_{\text{Ge}}) \varepsilon_{\text{Si}}$$

Avec :

ε : permittivité relative

n_3 : indice de réfraction du SiGe

θ_{iA} : Angle d'incidence sur le plan A

θ_{iB} : Angle d'incidence sur le plan B

θ_{tA} : Angle de réfraction du plan A

θ_{tB} : Angle de réfraction du plan B

ψ : Angle de texturisation

Les indices t et i dans l'équation si dessus représentent le rayon transmit (réfracté) et incident respectivement:

Calcul des angles d'incidence θ_{iA} , θ_{iB}

Pour une texturisation triangulaire périodique on trouve :

$$\theta_{iA} = \frac{\pi - \psi}{2} \quad (\text{III.14})$$

Pour calculer l'angle d'incidence sur le plan B θ_{iB} on utilise la loi de **Snell-Discarte** [60]

On trouve que : $\theta_{iB} = \psi - \theta_{iA}$ (III.15)

Calcul des angles de réfraction θ_{tA} , θ_{tB} :

La relation entre l'angle de réfraction et l'angle d'incidence est donné par [60] :

$$n_r \sin \theta_r = n_i \sin \theta_i \quad (\text{III.16})$$

n_i =indice de réfraction du milieu de d'incidence

n_r = indice de réfraction du deuxième milieu

Donc :

$$\sin \theta_{tA} = \frac{1}{n_{23}} \sin \theta_{iA} \quad \text{Donc} \quad \theta_{tA} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{n_{23}} \sin \theta_{iA} \right) \quad (\text{III.16.a})$$

$$\sin \theta_{tB} = \frac{1}{n_{23}} \sin \theta_{iB} \quad \text{Donc} \quad \theta_{tB} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{n_{23}} \sin \theta_{iB} \right) \quad (\text{III.16.b})$$

Avec : $n_{23} = \frac{n_3}{n_2}$

Calcul de la hauteur de texturisation H

De la figure (III.1.b) on trouve que :

$$H = A \cos \left(\frac{\psi}{2} \right) \quad (\text{III.17})$$

H : hauteur de texturation

A : longueur du plan A

III.6. Taux de génération et taux de recombinaison

Le taux de génération des paires électrons –trou à une distance, x de la surface éclairée de la cellule est donné par :

$$G(x, \lambda) = \alpha(\lambda)\phi(\lambda)(1 - R(\lambda))e^{(-\alpha(\lambda)x)} \quad [1/ (m^3s)] \quad (III.18)$$

Le taux de recombinaison peut être approximé d'après la théorie de recombinaison de Shockley-Read-Hall, comme une fonction de la densité des porteurs minoritaires.

- ❖ $U_n = \frac{n - n_0}{\tau_n}$ est le taux de recombinaison des électrons dans la région P.
- ❖ $U_p = \frac{p - p_0}{\tau_p}$ est le taux de recombinaison des trous dans la région N.

Où n est la concentration des électrons dans la région P et p est celle des trous dans la région N.

n_0 est la concentration des électrons à l'équilibre et p_0 est celle des trous à l'équilibre.

III.7. Densité de photo courant J_{ph} :

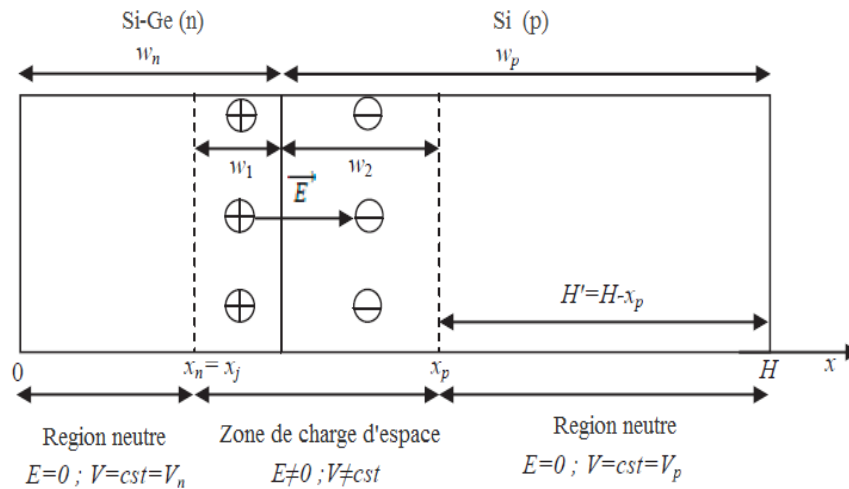


Figure III.3 Les différentes dimensions d'une cellule solaire a hétérojonction Si-Ge(n) /Si(p)

w_n et w_p sont les largeurs des SiGe (n) et Si(p) respectivement est la largeur de la jonction Et :
 $x_n = x_j = w_n - w_1$; $x_p = x_j + w_1 + w_2$; $H = w_n + w_p$; $H' = H - x_p = w_p - w_2$

Les largeurs de la zone de charge d'espace w_1, w_2 et la barrière de potentiel V_d sont données par [16] :

$$W_1 = \left(\frac{2N_{a2}}{eN_{d1}} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 N_{d1} + \varepsilon_2 N_{a2}} \right)^{\frac{1}{2}} (V_1 - V_2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III.19})$$

$$W_2 = \left(\frac{2N_{d1}}{eN_{a2}} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 N_{d1} + \varepsilon_2 N_{a2}} \right)^{\frac{1}{2}} (V_1 - V_2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III.20})$$

$$V_d = V_1 - V_2 = V_t \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (\text{III.21})$$

a) La première zone neutre N (SiGe)

1) L'équation de continuité

Les minoritaires sont des trous pour le semi-conducteur de type N. L'équation de continuité s'écrit dans cette région comme :

$$G_p - \frac{P - P_0}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = 0 \quad (\text{III.22})$$

Où : $G_p = \alpha_1 \phi (1 - R) \exp(-\alpha_1 x)$ désigne le taux de génération des paires électrons/trous.

2) L'équation de densité de courant

$$J_p = q\mu_p P_n E - qD_p \frac{dP_n}{dx} \quad (\text{III.23})$$

Dans cette région $E=0$, donc $J_p = -qD_p \frac{dP_n}{dx}$

On remplace J_p et G_p dans l'équation de continuité, on obtient

$$D_p \frac{d^2 P_n}{dx^2} + \alpha_1 \phi (1 - R) \exp(-\alpha_1 x) - \frac{P_n - P_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (\text{III.24})$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$P_n - P_{n0} = A_1 \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) + B_1 \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha_1 \phi (1 - R) \tau_p}{(L_p^2 \alpha_1^2 - 1)} \exp(-\alpha_1 x) \quad (\text{III.25})$$

Où $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$: est la longueur de diffusion des trous.

En peut trouver les deux constantes A_1 et B_1 à partir des conditions aux limites :

➤ A la surface, une recombinaison se produit avec une vitesse S_p la condition est :

$$D_p \frac{d(P_n - P_{n0})}{dx} = S_p (P_n - P_{n0}) \quad \text{à } x=0 \quad (\text{III.26})$$

➤ A la limite de la jonction la densité des porteurs en excès réduite à zéro par le champ électrique dans la zone de déplétion, ceci est traduit par:

$$P_n - P_{n0} = 0 \quad \text{à } x=x_j \quad (\text{III.27})$$

Donc :

$$P_n - P_{n0} = \frac{\alpha_1 \phi (1-R) \tau_p}{(L_p^2 \alpha_1^2 - 1)} \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha_1 L_p \right) \text{sh} \left(\frac{x_j - x}{L_p} \right) + \exp(-\alpha_1 x_j) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \text{sh} \left(\frac{x}{L_p} \right) + \text{ch} \left(\frac{x}{L_p} \right) \right)}{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) \text{sh} \left(\frac{x_j}{L_p} \right) + \text{ch} \left(\frac{x_j}{L_p} \right)} - \exp(-\alpha_1 x) \right] \quad (\text{III.28})$$

Donc

$$J_p = -q D_p \left(\frac{dP_n}{dx} \right)_{x_j} = \left[\frac{q \phi (1-R) \alpha_1 L_p}{(L_p^2 \alpha_1^2 - 1)} \right] \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha_1 L_p \right) - \exp(-\alpha_1 x_j) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \text{ch} \left(\frac{x_j}{L_p} \right) + \text{sh} \left(\frac{x_j}{L_p} \right) \right)}{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) \text{sh} \left(\frac{x_j}{L_p} \right) + \text{ch} \left(\frac{x_j}{L_p} \right)} - \alpha_1 L_p \exp(-\alpha_1 x_j) \right] \quad (\text{III.29})$$

b) La deuxième zone neutre P (Si)

1) L'équation de continuité

Les minoritaires sont des électrons pour le semi-conducteur de type P, on peut écrire :

$$G_n - \frac{n - n_0}{\tau_n} - \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (\text{III.30})$$

$$\text{Où : } G_n = \alpha_2 \phi (1-R) \exp(-\alpha_2 x)$$

2) L'équation de densité de courant

$$J_n = q \mu_n n_p E - q D_n \frac{dn_p}{dx} \quad (\text{III.31})$$

Dans cette région E=0, donc $J_n = -q D_n \frac{dn_p}{dx}$

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + \alpha_2 \phi (1-R) \exp(-\alpha_2 x) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = 0 \quad (\text{III.32})$$

On remplace J_n et G_n dans l'équation de continuité, nous obtenons :

Dont la solution est :

$$n_p - n_{p0} = A_2 \text{ch} \left(\frac{x}{L_n} \right) + B_2 \text{sh} \left(\frac{x}{L_n} \right) - \frac{\alpha_2 \phi (1-R) \tau_n}{(L_n^2 \alpha_2^2 - 1)} \exp(-\alpha_2 x) \quad (\text{III.33})$$

Où : $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ est la longueur de diffusion des électrons.

En peut trouver les deux constantes A_2 et B_2 à partir des conditions aux limites :

➤ à la surface, une recombinaison se produit avec une vitesse S_n la condition est :

$$-D_n \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} = S_n (n_p - n_{p0}) \quad \text{à } x=H \quad (\text{III.34})$$

➤ à la limite de la jonction la densité des porteurs en excès réduite à zéro par le champ électrique dans la zone de déplétion :

$$n_p - n_{p0} = 0 \quad \text{à } x = x_j + w_1 + w_2 \quad (\text{III.35})$$

Donc

$$n_p - n_{p0} = \frac{\alpha_2 \phi (1-R) \tau_n}{(L_n^2 \alpha_2^2 - 1)} \times \left[\frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} + \alpha_2 L_n \right) \text{sh} \left(\frac{x_j - x}{L_n} \right) + \exp(-\alpha_2 x_j) \left(\frac{S_n L_n}{D_n} \text{sh} \left(\frac{x}{L_n} \right) + \text{ch} \left(\frac{x}{L_n} \right) \right)}{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \text{sh} \left(\frac{x_j}{L_n} \right) + \text{ch} \left(\frac{x_j}{L_n} \right)} - \exp(-\alpha_2 x) \right] \quad (\text{III.36})$$

La densité de photo courant dans cette région est :

$$J_n = qD_n \left(\frac{dP}{dx} \right)_{x_j+w_1+w_2} = \left(\frac{\alpha_2 \phi (1-R) \tau_n}{(L_n^2 \alpha_2^2 - 1)} \right) \exp(-\alpha_1 (x_j + w_1) - \alpha_2 w_2) \times \left[\alpha_2 L_n - \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \left(\text{ch} \left(\frac{H'}{L_n} \right) - \exp(-\alpha_2 H') \right) + \text{sh} \left(\frac{H'}{L_n} \right) + \alpha_2 L_n \exp(-\alpha_2 H')}{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \text{sh} \left(\frac{H'}{L_n} \right) + \text{ch} \left(\frac{H'}{L_n} \right)} \right] \quad (\text{III.37})$$

c) La densité de courant dans la zone de charge d'espace pour les deux semi-conducteurs

$$J_{w1} = q\phi(1-R)e^{-\alpha_1 x_j} (1 - e^{-\alpha_1 w_1}) \quad (\text{III.38})$$

$$J_{w2} = q\phi(1-R)e^{-\alpha_1 (w_1 + x_j)} (1 - e^{-\alpha_2 w_2}) \quad (\text{III.39})$$

Donc la densité dans cette zone totale est :

$$J_{ZCE} = J_{w1} + J_{w2} \quad (\text{III.40})$$

$$J_{ZCE} = q\phi(1-R)e^{-\alpha_1 x_j} \left[(1 - e^{-\alpha_1 w_1}) + e^{-\alpha_1 w_1} (1 - e^{-\alpha_2 w_2}) \right] \quad (\text{III.41})$$

Et par conséquent la densité du photo-courant est donnée par :

$$J_{ph}(\lambda) = J_n(\lambda) + J_p(\lambda) + J_{ZCE}(\lambda) \quad (\text{III.42})$$

III.8. Densité de photo courant totale, J_{ph}

La densité de photo courant totale, J_{ph} , est obtenue en intégrant la densité de courant, J_{ph} sur toute la gamme du spectre solaire utilisée. J_{ph} est donnée par :

$$J_{ph} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} J_{ph}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} J_n(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} J_p(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} J_{ZCE}(\lambda) d\lambda \quad (\text{III.43})$$

III.9. Réponse spectrale $SR(\lambda)$

La réponse spectrale est donnée par

$$SR(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\phi[1-R(\lambda)]} \quad (\text{III.44})$$

III.10. Caractéristique courant tension

La principale caractéristique d'une cellule solaire est celle de la variation de la densité de courant débitée par la cellule en fonction de la tension à ses bornes, communément appelée caractéristique J-V. A partir de cette caractéristique l'utilisation peut déduire aisément la densité de courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, ainsi que la puissance maximale que peut débiter la cellule.

a) La densité de courant de saturation, J_s

Le mécanisme de transport peut être simulé par la solution numérique de l'équation de poisson et les équations de continuité pour les électrons et les trous. La plupart des études expérimentales ont révélées que les propriétés électroniques à l'obscurité telle que la densité de courant de saturation, J_s et le facteur de qualité, Q , jouent un rôle très important dans la caractéristique courant tension, J-V.

Pour la cellule solaire à hétérojonction à base de SiGe de structure N - P, la densité de courant de saturation J_s est donnée par [16].

$$J_s = q\left(\frac{p_{n0}D_p}{L_p} + \frac{n_{p0}D_n}{L_n}\right) = q\left(\frac{n_{i1}^2 D_p}{N_d L_p} + \frac{n_{i2}^2 D_n}{N_a L_n}\right) \quad (\text{III.45})$$

Où n_{i1} est la concentration intrinsèque de la couche N et n_{i2} est celle de la couche P.

b) Caractéristique J-V idéale

La caractéristique J-V idéale est donnée par :

$$J = J_{ph} - J_s \left[e^{\frac{V}{V_t}} - 1 \right] \quad (\text{III.46})$$

$$J_{SC} = J_{ph} \quad ; \quad V_{CO} = V_t \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_s}\right) \quad ; \quad P_m = (JV)_{\max}$$

Et par conséquent, on peut facilement déduire le facteur de forme et le rendement de conversion, qui sont donnés respectivement par :

$$FF = \frac{P_m}{J_{SC} V_{CO}} \quad ; \quad \eta = \frac{P_m}{P_i}$$

c) Caractéristique J-V réelle

Dans les cellules solaires, le schéma équivalent doit être modifié pour inclure la résistance série, R_S (résistance de perte ohmique dans la surface frontale) et la résistance Shunte, R_{SH} , (résistance de courant de fuite), d'où l'équation caractéristique suivante :

$$I = I_{ph} - I_S \left[e^{\frac{V+R_S I}{V_t}} - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_{SH}} \quad (\text{III.47})$$

Si $V=0$ alors $J=J_{sc}$, donc l'équation devient :

$$I_{SC} = I_{ph} - I_S \left[e^{\frac{R_S I_{SC}}{V_t}} - 1 \right] - \frac{R_S I_{SC}}{R_{SH}} \quad (\text{III.48})$$

Cette équation est une équation non linéaire qu'on peut résoudre numériquement.

Aussi si $I=0$ alors $V=V_{co}$, donc l'équation devient :

$$I_{ph} - I_S \left[e^{\frac{V_{CO}}{V_t}} - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_{SH}} = 0 \quad (\text{III.49})$$

Comme cette équation est non linéaire, alors elle admet une solution numérique qui est la tension de circuit ouvert V_{co} .

De la même manière que le cas précédent on peut calculer la puissance maximale P_m et le rendement de conversion η .

II.11. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié et analysé le fonctionnement d'une cellule solaire à base de SiGe, ayant une structure N-P, avec la texturisation de la couche N, et le (ZnO :Al) comme couche antireflet.

Ce programme de calcul que nous avons élaboré, nous permet de calculer les densités de courant dans toutes les régions (Les deux zones N et P et la zone de charge d'espace) de la cellule solaire. Et par conséquent, La détermination de la densité de courant totale aussi d'étudier l'influence de la géométrie de texturisation de la surface en l'occurrence, l'effet de la couche antireflet sur les différentes caractéristiques de la cellule (R , J_{sc} , V_{co} , et η).



Chapitre IV

Résultats, discussions et optimisation

IV.1.Introduction

Pour étudier l'effet des différents paramètres de revêtements et de texturisation sur l'efficacité de conversion photovoltaïque, nous exposons dans ce chapitre les différents résultats obtenus avec leurs interprétations physiques, qui peuvent donner un aperçu précis sur le comportement de la cellule solaire proposée en prenant en compte l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques de la cellule (J_{ph} , V_{co} et η).

Les paramètres utilisés dans notre étude sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau. IV.1 Les valeurs des données utilisées dans le calcul pour le Silicium

Paramètre	Valeur
Concentration des atomes accepteurs, N_a (cm^{-3})	5.10^{15}
Concentration intrinsèque, n_{i2} (cm^{-3})	$1.45.10^{10}$
La densité effective d'état d'électrons dans la bande de conduction N_{c2} (cm^{-3})	$2.8 .10^{19}$
La densité effective d'état des trous dans la bande de valence N_{v2} (cm^{-3})	$1.04.10^{19}$
L'énergie de gap, E_{g2} (eV)	1.12
Permittivité relative, ϵ_{r2}	11.9

Tableau. IV.2 Les valeurs des données utilisées dans le calcul pour le Germanium

Paramètre	Valeur
Concentration des atomes donneurs, N_d (cm^{-3})	10^{17}
Concentration intrinsèque, n_{i1} (cm^{-3})	$2.4.10^{13}$
La densité effective d'état d'électrons dans la bande de conduction N_{c1} (cm^{-3})	$1.04.10^{19}$
La densité effective d'état des trous dans la bande de valence N_{v1} (cm^{-3})	6.10^{18}
L'énergie de gap, E_{g1} (eV)	0.66
Permittivité relative, ϵ_{r1}	16

IV.2.Coefficient d'absorption :

Les figures (IV.1) et(IV.2) représentent respectivement les courbes de coefficients d'absorption de Si-Ge et ZnO:Al en fonction de la longueur d'onde.

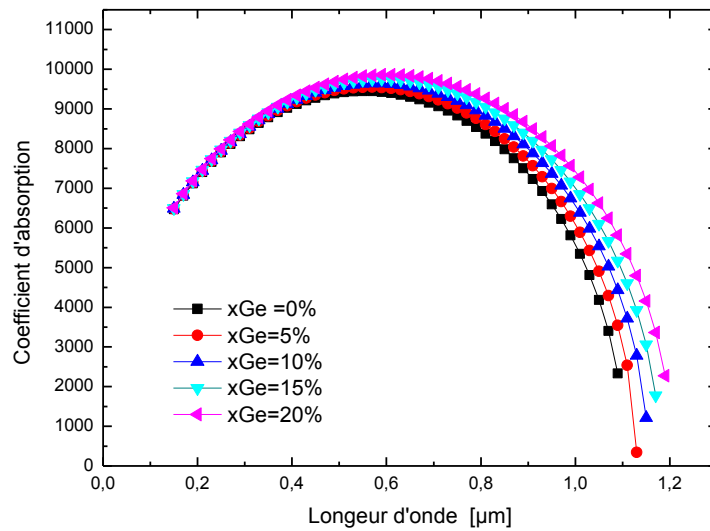


Figure. IV.1. Le coefficient d'absorption de $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$ en fonction de la longueur d'onde.

On observe dans la figure (IV.1.) que le coefficient d'absorption varie proportionnellement avec la longueur d'onde entre 0,2 et 0,6 μm , pour atteindre un maximum de 9800. Par contre à partir de la longueur d'onde de 0,6 μm jusqu'à 1,2 μm , la variation du coefficient d'absorption est inversement proportionnelle. De plus on observe une croissance d'absorption en fonction de l'augmentation de la concentration du Germanium.

Par conséquent, on remarque que l'absorption est influencée par le taux d'implémentation du germanium, qui réduit le gap du Silicium, ce qui cause une augmentation au niveau de l'absorption.

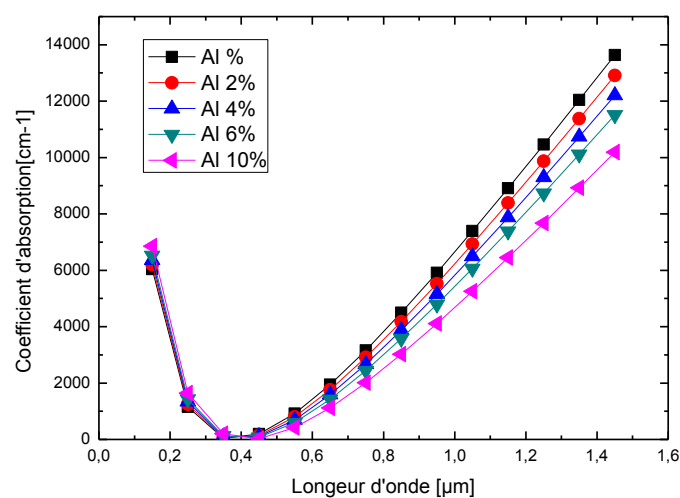


Figure. IV.2. Le coefficient d'absorption de $\text{ZnO}:\text{Al}$ en fonction de la longueur d'onde.

La figure (IV.2.) montre La transparence optique du ZnO dans le visible et dans le proche infrarouge causée par son large gap ($E_g=3.27$), ainsi que l'augmentation de la concentration de l'aluminium a un faible impacte sur l'absorption dans l'intervalle [2%, 10%].

IV.3.Effet de l'angle de texturisation de la région N (SiGe)

Les figures (IV.3) montrent l'effet du changement de l'angle de texturisation de la couche (N) sur la réflexion et les caractéristiques de la cellule (J_{ph} , V_{co} et η)

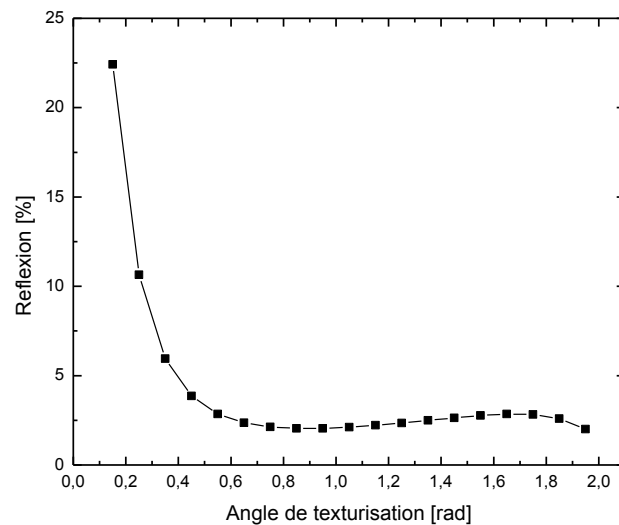


Figure. IV .3.1: Le coefficient de réflexion (R) en fonction de l'angle de texturisation(ψ)

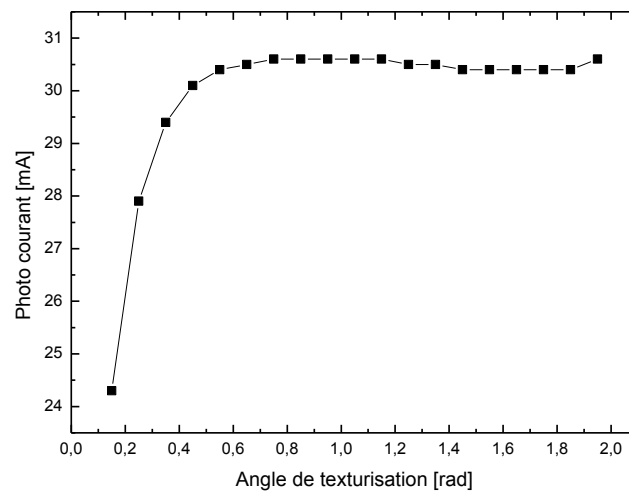


Figure. IV .3.2: Variation du photo-courant J_{ph} en fonction de l'angle de texturisation (ψ)

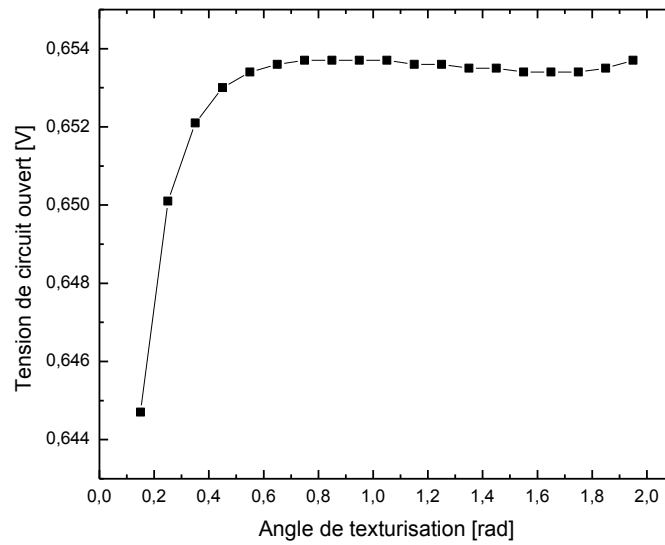


Figure. IV .3.3: Variation de la tension de circuit-ouvert V_{co} en fonction de l'angle de texturisation (ψ)

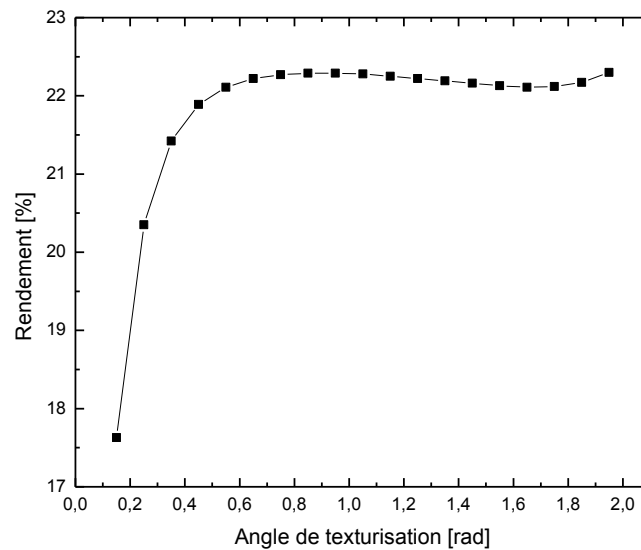


Figure. IV .3.4: Variation de l'efficacité de conversion (η) en fonction de l'angle de texturation (ψ)

Les courbes illustrées auparavant sont obtenues en utilisant le modèle susmentionné en détail dans le chapitre précédent où une diminution de réflexion de la surface est remarquée ainsi qu'un accroissement des caractéristiques de la cellule J_{ph} , V_{co} et le rendement (η) dû à L'augmentation de l'angle de texturisation.

IV.4.Effet de la hauteur de texturisation de la région N

La figure (IV.4) présente l'effet du changement de la hauteur de texturisation sur la réflexion et les caractéristiques de la cellule (J_{ph} , V_{co} et η)

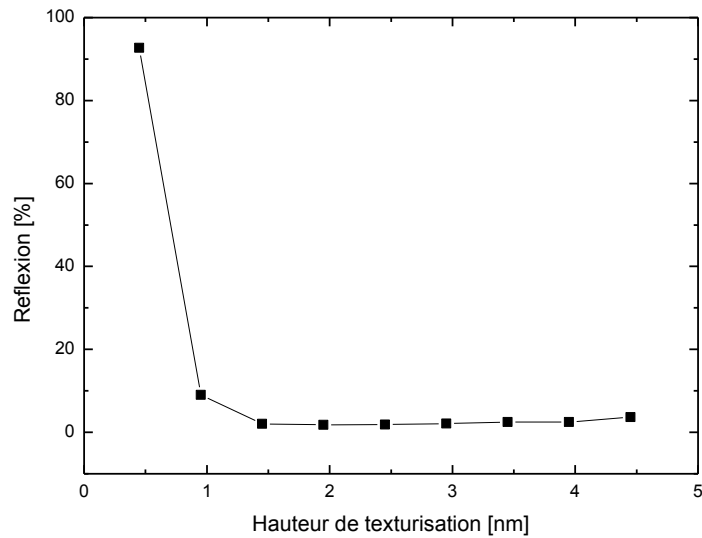


Figure. IV .4.1: Le coefficient de réflexion (R) en fonction de la hauteur de texturisation (H)

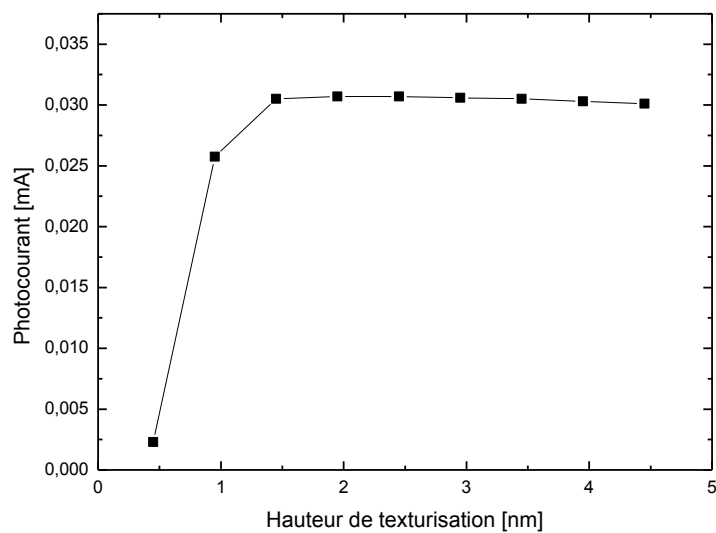


Figure. IV .4.2: Variation du photo-courant J_{ph} en fonction de la hauteur de texturisation (H)

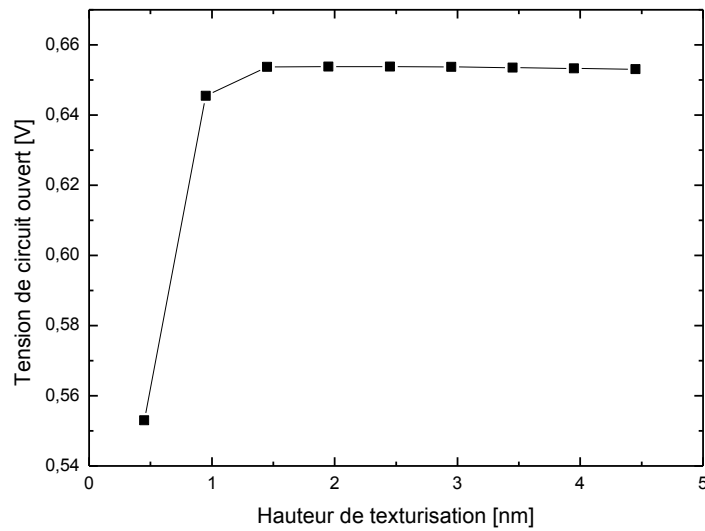


Figure. IV .4.3: Variation de la tension de circuit-ouvert V_{co} en fonction de la hauteur de texturation (H)

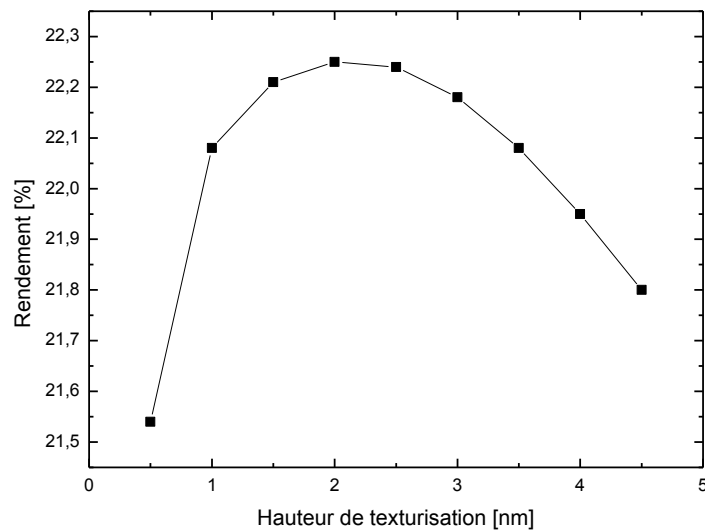


Figure. IV .4.4: Variation de l'efficacité de conversion (η) en fonction de la hauteur de texturation (ψ)

Les figures (IV.4) montrent l'effet du changement de la hauteur de texturation de la couche (N) sur la réflexion et les caractéristiques de la cellule (J_{ph} , V_{co} et η), d'où on remarque une diminution de réflexion qui cause une augmentation des caractéristiques (J_{ph} , V_{co} et η). en plus, un rendement maximal est obtenu pour une valeur de la hauteur de texturation est égale à 2.2 nm. cette dernière observation montre que le problème que nous avons étudié est

fortement non linéaire et possède un comportement complexe. donc, l'utilisation des nouvelles approches basées sur les techniques méta heuristique est indispensable pour modéliser, optimiser et comprendre le comportement des cellules photovoltaïques en incluant l'effet de la texturisation.

IV.5.Effet de la concentration du Germanium

Les figures(IV.5) illustrent respectivement la variation de la conductivité du (SiGe) et des caractéristiques de la cellule en fonction de la concentration du germanium.

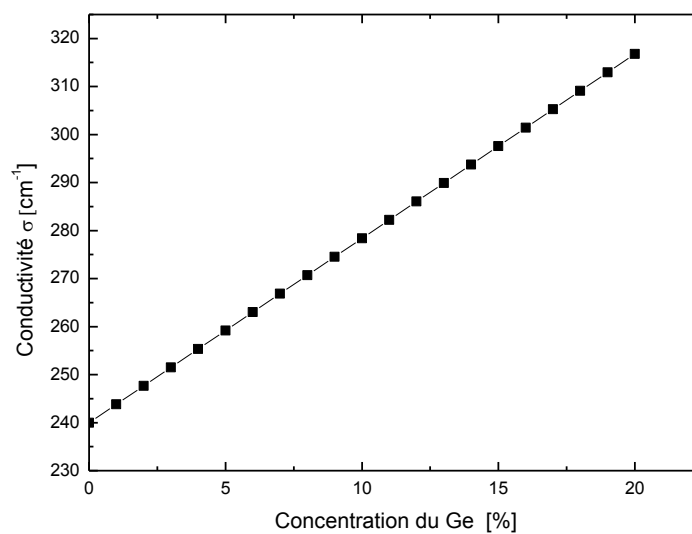


Figure. IV .5: Variation de la conductivité du Si_(1-x)Ge_(x) en fonction de la concentration du Germanium

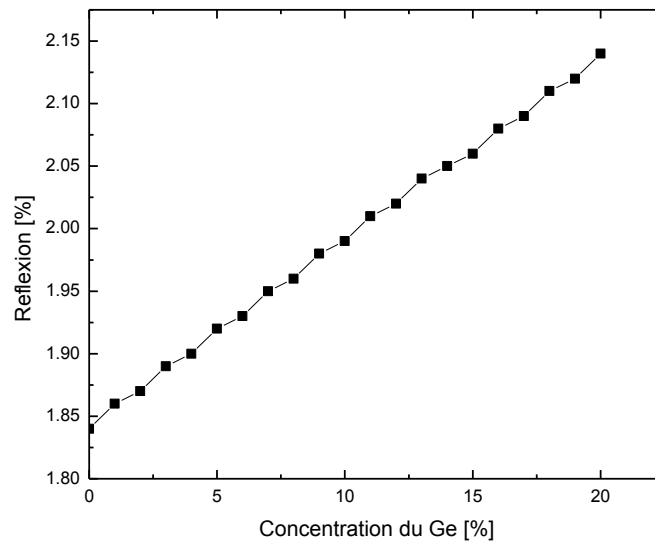


Figure. IV.5.1: Le coefficient de réflexion de la cellule en fonction de la concentration du Germanium

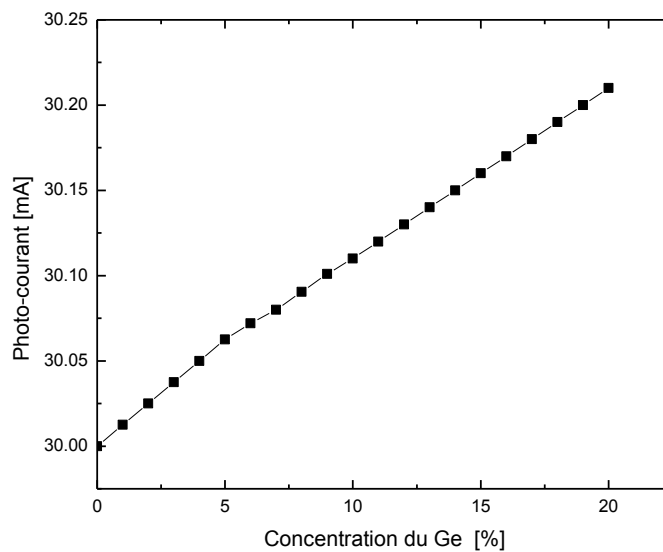


Figure. IV.5.2: Variation du photo-courant J_{ph} en fonction de la hauteur de la concentration du Germanium

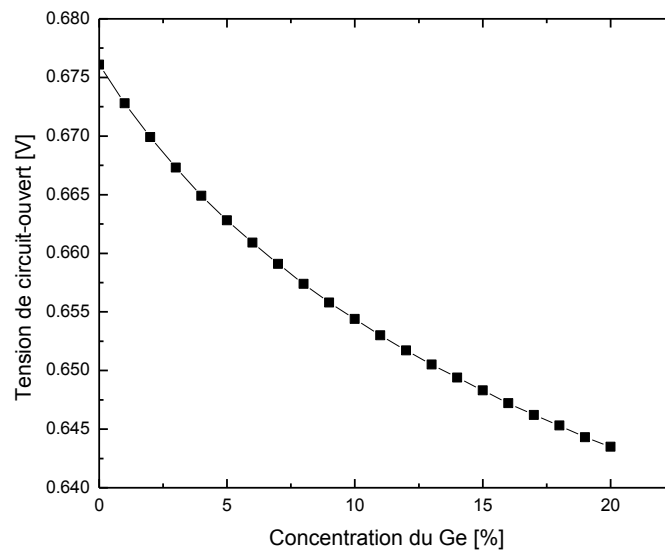


Figure. IV.5.3: Variation de la tension de circuit-ouvert V_{oc} en fonction de la concentration du Germanium

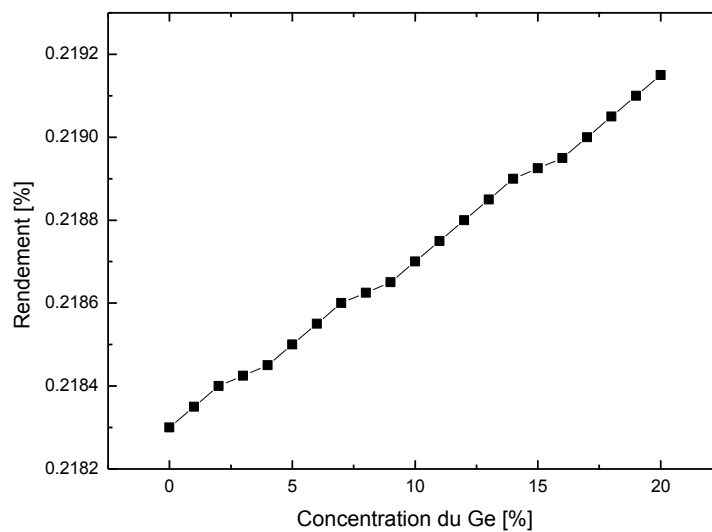


Figure. IV.5.4: Variation de l'efficacité de conversion (η) en fonction de la concentration du Germanium dans la couche (N) $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_{(x)}$

La courbe (IV.5) montre que la conductivité s'améliore lorsque la concentration de germanium augmente donc ce là confirme la relation proportionnelle.

Pour les figures (IV.5.1, IV.5.2, IV.5.3, IV.5.4), Il est bien remarquable que l'augmentation de la concentration du germanium dans la couche N ($\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_{(x)}$), provoque un accroissement de photo-courant I_{ph} et du rendement (η) par contre le V_{co} diminue, ce qui montre l'impacte de

l'implantation du Germanium sur le Gap de la couche N ($\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$), et sa démontre la relation proportionnelle qui existe entre le Gap et le V_{co} , et inversement proportionnelle avec le I_{ph} .

IV.6.Effet de la concentration de l'aluminium

Les figures (IV.6) présente la variation des caractéristiques de la cellule (R , J_{ph} , V_{co} et η) en fonction de la concentration de l'aluminium dans la couche antireflet ($\text{ZnO}_{(1-x)}\text{Al}_x$).

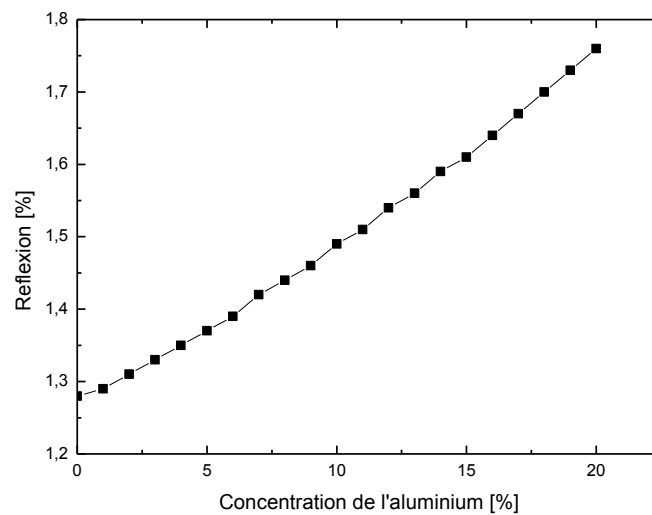


Figure. IV.6.1: Le coefficient de réflexion de la cellule en fonction de la concentration de l'Aluminium

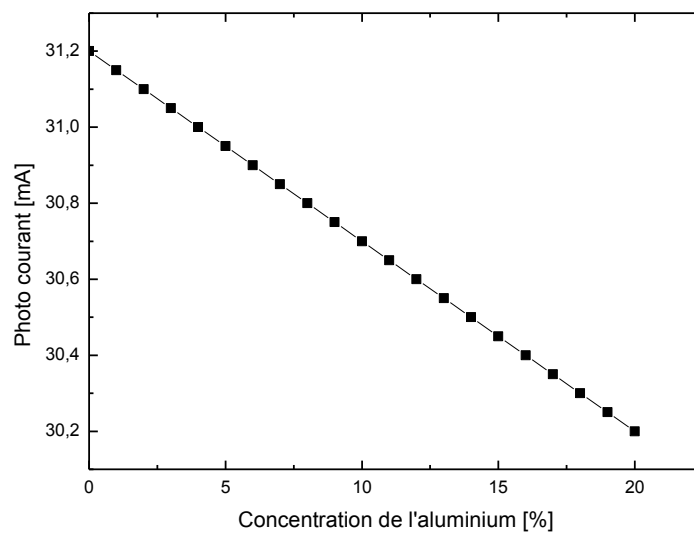


Figure. IV.6.2: Variation du photo-courant J_{ph} en fonction de la concentration de l'Aluminium

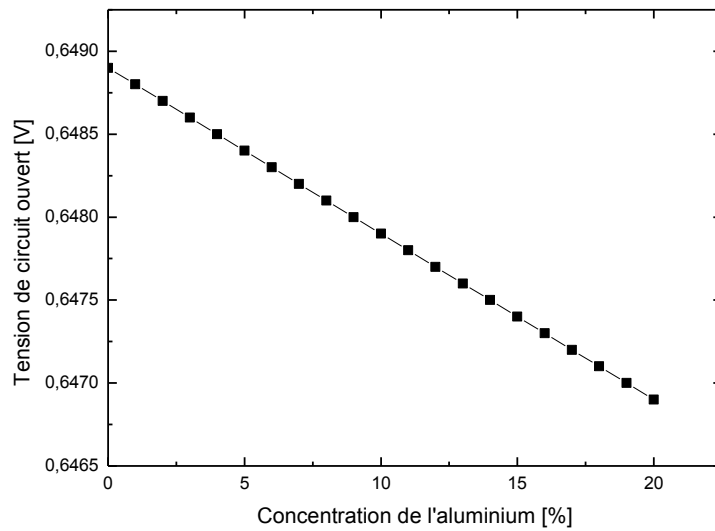


Figure. IV.6.3: Variation de la tension de circuit-ouvert V_{oc} en fonction de la concentration de l'Aluminium

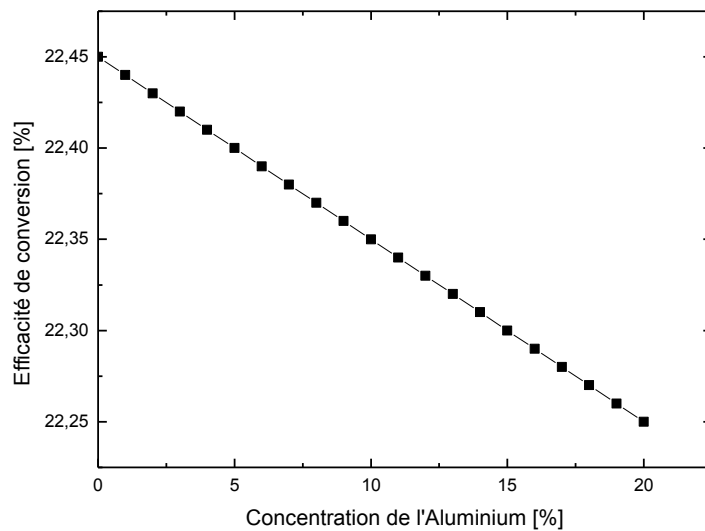


Figure. IV.6.4: Variation de l'efficacité de conversion (η) en fonction de la concentration de l'Aluminium dans la couche antireflet $ZnO_{(1-x)}Al_x$

Les figures (IV.6) montre que la réflexion est influencée par l'augmentation de la concentration de l'aluminium dans la couche antireflet, plus cette concentration est élevée plus la réflexion augmente et les caractéristiques de la cellule diminuent a cause de leur relation inversement proportionnelle avec la réflexion.

IV.7.Effet de l'épaisseur de la couche antireflet

La figure (IV.7), présente la variation de la réflexion en fonction de l'épaisseur de la couche antireflet, Les valeurs obtenues varient entre 2,68% et 1,96%.

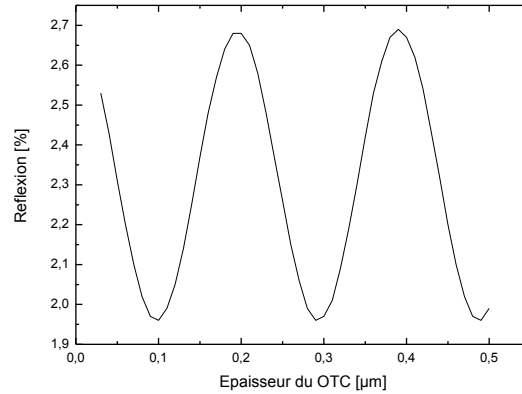


Figure. IV. 7 : Variation de la réflexion en fonction de l'épaisseur de la couche antireflet

À partir de la figure (IV.7) on remarque que la réflexion diminue lorsque l'épaisseur (d) de la couche antireflet (CAR) est de la forme :

$$d = \frac{\lambda}{4n_{OTC}}; \frac{3\lambda}{4n_{OTC}}; \frac{5\lambda}{4n_{OTC}}; \dots (IV.1)$$

La première valeur de d dans l'équation (IV.1) est souvent utilisée dans la pratique sous le nom de (quarter-wavelength rule).

IV.8.Caractéristique

La figure (IV.8) montre la caractéristique I-V d'une cellule solaire, d'où l'angle de texturisation varie entre 30° et 180°.

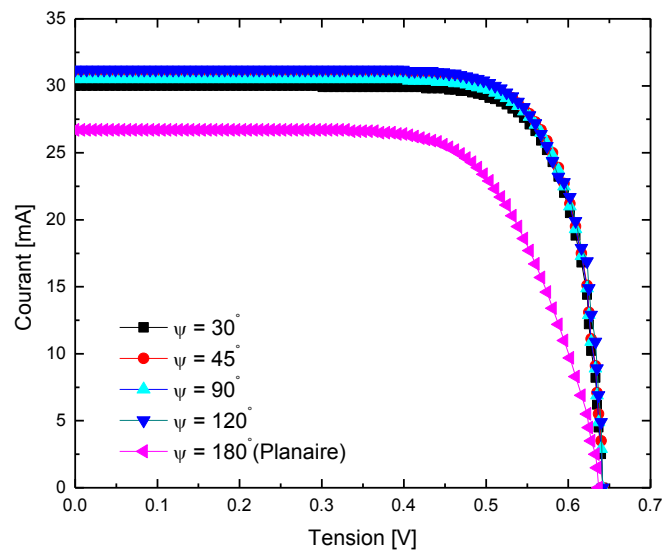


Figure. IV .8. : La caractéristique de sortie obtenue à partir du modèle analytique d'une cellule solaire a hétérojonction avec texturisation de surface, comparée avec les résultats d'une cellule plane (non texturée)

D'après la figure (IV.8.) l'angle de texturisation influence directement sur le courant de court-circuit I_{cc} , on remarque une augmentation de l' I_{cc} de la cellule texturée par rapport à la cellule conventionnelle (plane). Ce qui prouve l'effet du mécanisme de confinement optique, et l'impact du revêtement par couche antireflet sur le courant de court-circuit.

IV.9.Optimisation

Dans cette partie, on s'intéresse à l'optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de (SiGe) en se basant sur l'amélioration du courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et le facteur de forme. Le problème sera présenté sous forme d'une optimisation multi-objective des paramètres physiques, électriques et géométriques.

Le travail effectué dans le chapitre précédent nous a permis d'extraire ces paramètres, qui seront utilisés comme des fonctions de fitness de l'optimisation multi-objective par les algorithmes génétiques afin de minimiser les pertes d'énergie et maximiser l'efficacité de la conversion. Dans ce contexte, l'objectif principal de ce chapitre est de proposer une nouvelle approche basée sur l'optimisation multi-objective en utilisant les Algorithmes Génétiques (MOGA), qui permet la maximisation de la conversion photovoltaïque des cellules solaires.

IV.9.1.L'optimisation multi-objective par MOGA

Depuis que l'algorithme génétique est une technique de solution au problème d'optimisation combinatoire, fondée sur le principe d'évolution naturelle et d'héritage, l'utilisation du MOGA permet l'obtention de plusieurs combinaisons optimale, dans le but de maximiser la fonction objective.

Afin d'atteindre notre objectif, nous avons utilisé la boîte d'outil d'optimisation sous MATLAB, ce qui exige la détermination de quatre paramètres fondamentaux:

- La population : le type, et la taille de la population, la population initiale (utilisés dans l'algorithme génétique...)
- Définition des opérateurs génétiques : sélection, reproduction, mutation, croisement...
- Paramètres du problème multi-objectif : mesure de la distance entre les individus (crowding), fraction de la population aux sens de Pareto (garde la population la plus en forme jusqu'à la fraction spécifiée, afin de maintenir une population diversifiée).
- Critères d'arrêt : génération (spécifier le nombre maximale d'itérations), délai (spécifier la durée maximale en secondes du fonctionnement de l'algorithme génétique avant de s'arrêter.).

Le principe de fonctionnement d'un algorithme génétique traitant un problème d'optimisation multi-objective est représenté par le schéma dans la figure (IV.9)

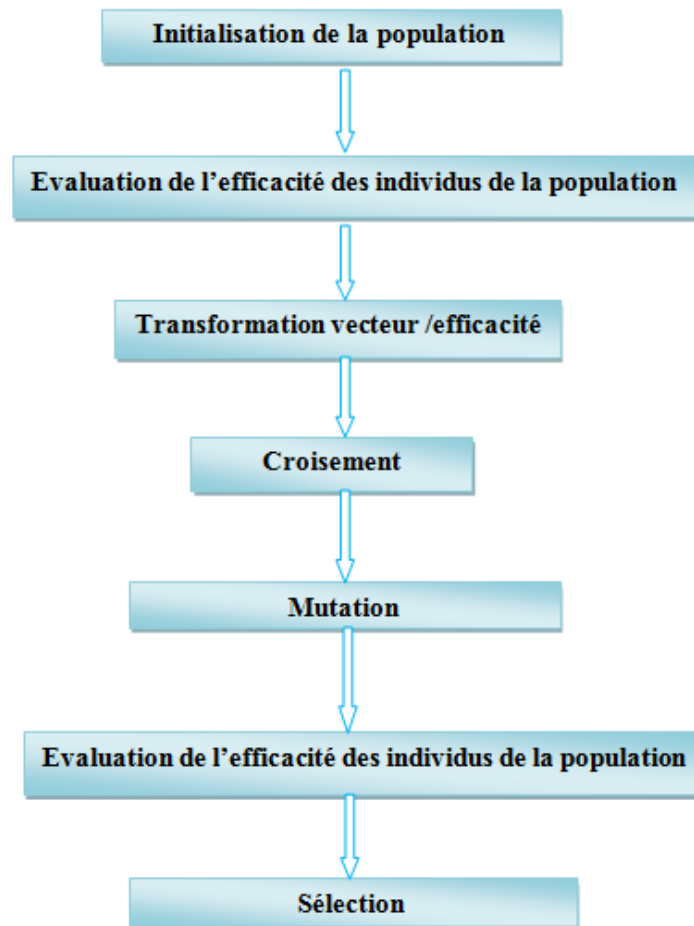


Figure. IV.9. Schéma de principe de l'optimisation multi-objective MOGA

IV.9.2. Optimisation du rendement de la cellule solaire par MOGA

Notre approche comme nous avons déjà expliqué précédemment, est basée sur l'optimisation du rendement de conversion photovoltaïque, cela est acquis par la maximisation du courant de court circuit, tension de circuit ouvert, ainsi que le facteur de forme

- Maximisation du courant de court-circuit:

$$\max(I_{CC}) = \max[I(V = 0)]$$

- Maximisation de la tension de circuit-ouvert:

$$\max(V_{CO}) = \max[QU_t \ln(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1)]$$

- Maximisation du facteur de forme:

$$\max(FF) = \max[\frac{P_m}{I_{CC}V_{OC}}]$$

IV.9.3. Résultats et discussions

IV.9.3.1. Paramétrage

Le tableau IV.3 résume les valeurs des paramètres fondamentaux utilisées dans notre optimisation.

Tableau. IV.3 .Paramètres utilisé dans cette application	
Paramètres	valeurs
Taille de la population	100
Nombre de fonctions fitness	3
Nombre de variable	7
sélection	tournoi
reproduction	0.8
mutation	Gaussienne
croisement	dispersé
Mesure de la distance	crowding
Fraction de la population au sens de Pareto	0.7
Nombre maximum de générations	1500

IV.9.3.2. Application de la technique d'optimisation MOGA

Nous avons appliqué la technique d'optimisation MOGA à une cellule solaire à base de (SiGe) avec texturisation de surface de la couche (n) et le (ZnO:Al) comme couche antireflet, L'espace de solution (front Pareto) représentant l'ensemble des individus est illustré dans la figure (IV.10)

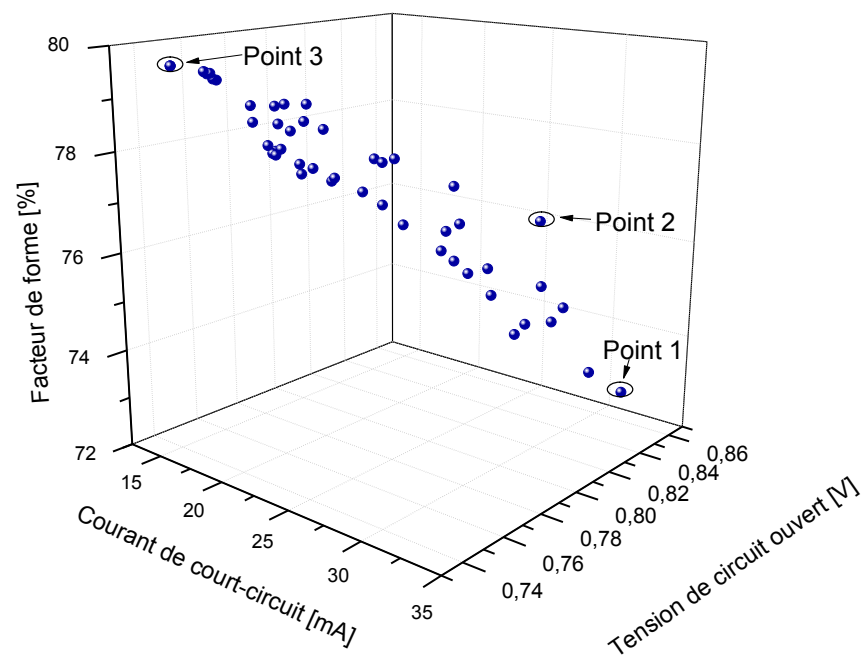


Figure. IV.10. Solution de Pareto-optimale de la cellule solaire analysée

Tableau. IV.4. paramètres de conception optimisés de la cellule

Paramètres	Point 1	Point 2	Point 3
Paramètres de la couche antireflet			
Epaisseur de la couche antireflet, d (nm)	244	209	170
Indice de réfraction, n_2	1,85	1,18	1
Concentration de l'Aluminium, x_{Al} (%)	0.1 %	0.1%	0.1%
Paramètres de la cellule solaire			
Concentration des atomes accepteurs, N_a (cm^{-3})	$1,83 \cdot 10^{17}$	$8,15 \cdot 10^{17}$	$1,06 \cdot 10^{17}$
Concentration des atomes donneurs, N_d (cm^{-3})	$2,5 \cdot 10^{18}$	$2,57 \cdot 10^{18}$	$2,62 \cdot 10^{18}$
Largeur de la région (n) de la ZCE, W_n (nm)	47.37	40.24	31.21
Largeur de la région (p) de la ZCE, W_p (nm)	2000	2000	563
Angle de texturisation de la couche (n), ψ (rad)	1,59	1,34	1,59
Hauteur de texturisation de la couche (n), H (nm)	0.7	0.78	0.7
Concentration du Germanium, x_{Ge} (%)	20%	20 %	20 %
Fonctions fitness			
Courant de court circuit, I_{cc} (mA)	32,68	26,1	14,66
Tension de circuit ouvert V_{co} (V)	0,79	0,84	0,74
Facteur de forme, FF (%)	77,12	73,7	79,6
Rendement de la conversion, η (%)	30.01	25.5	12.41

Les solutions MOGA montre clairement la région de Pareto dans lequel il existe les solutions, de sorte que chaque solution proposée peut être considérée comme aussi bonne que les autres.

Les combinaisons des paramètres liés aux solutions, formant l'ensemble de Pareto, fournissent au constructeur une base de données qui lui permet de choisir les valeurs acceptables et réalisables technologiquement, afin d'atteindre le meilleur rendement de conversion, fournit par la cellule solaire.

La figure (IV.11) montre les caractéristiques I-V et l'efficacité de conversion obtenus. Pour la cellule solaire analysée. Et en raison d'une augmentation d' I_{cc} , V_{oc} et FF, le rendement de la conversion de cette cellule solaire proposée (avec texturisation de surface) est élevé comparant avec celle de la conception classique de la cellule solaire (planaire).

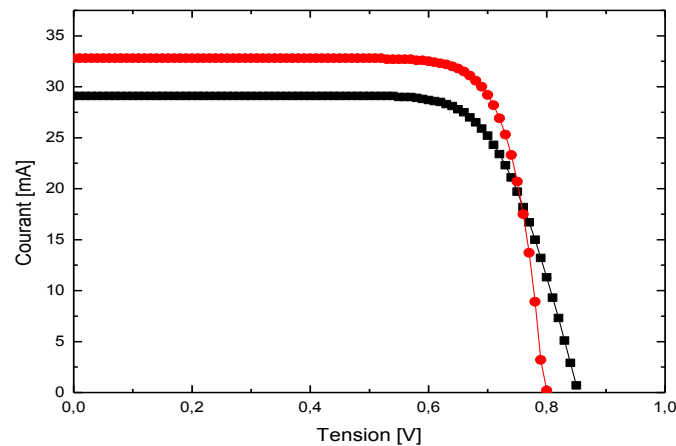


Figure. IV.11. Caractéristiques I-V et l'efficacité de conversion obtenues avec optimisation MOGA, pour les deux cellules solaires (planaire et texturisée)

Tableau. IV.5.: comparaison entre la cellule optimisée et la cellule conventionnelle		
Paramètres	Cellule solaire texturisée (point1)	Cellule solaire conventionnelle
Paramètres de la couche antireflet		
Epaisseur de la couche antireflet, d (nm)	244	201
Indice de réfraction, n_2	1,85	2,24
Concentration de l'Aluminium, x_{Al} (%)	0.1 %	0.1%
Paramètres de la cellule solaire		
Concentration des atomes accepteurs, $N_a(\text{cm}^{-3})$	$1,83.10^{17}$	$9,42.10^{17}$
Concentration des atomes donneurs, $N_d(\text{cm}^{-3})$	$2,50.10^{18}$	$7,19.10^{18}$
Largeur de la région (n) de la ZCE, W_n (nm)	47.37	120
Largeur de la région (p) de la ZCE, W_p (nm)	2000	2000
Angle de texturisation de la couche (n), ψ (rad)	1,59	-
Hauteur de texturisation de la couche (n), H (nm)	0.7	-
Concentration du Germanium, x_{Ge} (%)	20%	20 %
Fonctions fitness		
Courant de court-circuit, I_{cc} (mA)	32,68	29,12
Tension de circuit ouvert V_{co} (V)	0,79	0,85
Facteur de forme, FF (%)	77,12	72,79
Rendement de la conversion, η (%)	30.01	26.07

D'après le tableau (IV.5), il est observé qu'une grande amélioration du rendement de conversion de la cellule solaire, peut être obtenue par l'utilisation de notre approche basée sur l'optimisation MOGA. Donc l'approche proposée dans ce travail peut être considérée comme un outil important dans le domaine de la conception des cellules solaires.

IV.10. Conclusion

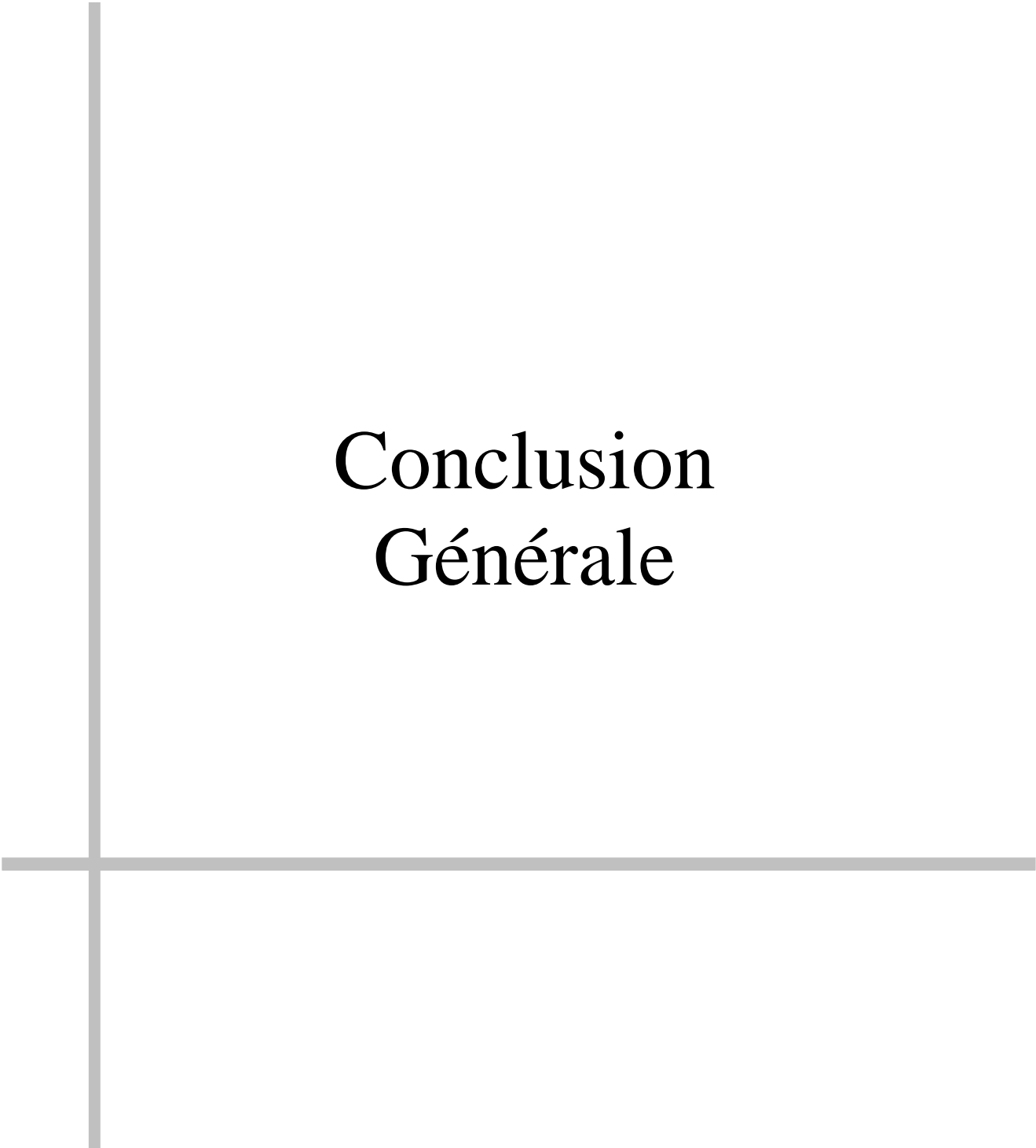
Dans ce chapitre, nous avons étudié et analysé le fonctionnement d'une cellule solaire à base de SiGe/Si, ayant une structure N-P, avec la texturisation de la couche N, et comme couche antireflet on a utilisé le (ZnO :Al).

Le programme de calcul que nous avons élaboré, nous permet d'étudier l'influence de la géométrie de texturisation de la surface en l'occurrence, l'effet de Germanium de la couche (N) et de l'aluminium de la couche antireflet.

L'approche basée sur l'optimisation MOGA, est proposée pour maximiser les performances électriques des cellules solaires. L'algorithme développé a réussi à la recherche du maximum possible de rendement de conversion.

Il est noté que la méthode proposée dans cette partie peut être utilisée pour l'optimisation et l'amélioration des performances de fonctionnement des panneaux solaires.

L'approche proposée sera utile pour la conception des panneaux photovoltaïques afin de prédire les caractéristiques souhaitables, des cellules solaires avant de les élaborer.



Conclusion Générale

Conclusion générale

L'intérêt scientifique aussi bien que le potentiel commercial ont conduit à une recherche accrue dans le domaine du photovoltaïque qui c'est considérablement développé durant ces vingt dernières années. L'étude que nous avons menée avait pour but de développer un modèle analytique d'une cellule solaire à hétérojonction (ZnO:Al/SiGe/Si) qui permet de décrire l'effet des paramètres de texturisation de la surface et de revêtement par couches antireflet sur les performances de la cellule solaire, en vue d'optimiser les caractéristiques physiques et géométriques des différentes couches en utilisons le calcul métaheuristique.

Dans le premier chapitre, nous avons tout d'abord rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine du photovoltaïque les pertes physiques et technologiques d'une cellule solaire ont été exposées d'une façon très explicite.

Les revêtements par couche antireflet et leur impact sur le rendement de la conversion photovoltaïque a fait l'objet du deuxième chapitre. Nous avons exposée les oxydes transparents conducteurs ainsi que leurs propriétés cristallographiques, optiques et électriques, sans omettre de citer quelques types.

Lors du troisième chapitre nous avons développé un model analytique qui permet de décrire l'impact du mécanisme de confinement optique (texturisation de surface) et du revêtement par couche antireflet sur les caractéristiques de la cellule solaire (R , J_{sc} , V_{co} et η), ainsi que les concentrations de germanium et d'aluminium. La présentation et l'interprétation des résultats obtenus ont fait l'objet du quatrième chapitre. Ces résultats ont permis d'optimiser le comportement électrique de la cellule solaire étudiée dans ce mémoire.

Les résultats obtenus à travers ce mémoire nous encouragent également à procéder à des réflexions supplémentaires dans ce domaine. En appliquant, par exemple, ces travaux à des modules photovoltaïques à large échelle, où autres modèles et approches doivent être développées.

Références

- [1] “2010 Survey of energy resources,” rapport du Conseil Mondial de l’Energie, 2010.
- [2] Liao. X, Du, W. ; Yang, X. ; Povolny, H. “High efficiency amorphous silicon germanium solar cells ,” 3-7 Jan. 2005, Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE p 1444 – 1447.
- [3] L Schirone, G Sotgiu, F.P Califano ; “Chemically etched porous silicon as an anti-reflection coating for high efficiency solar cells” , Thin Solid Films, Volume 297, Issues 1–2, 1 April 1997, Pages 296–298.
- [4] Joachim Müller ; Bernd Rech, Jiri Springer, Milan Vanecek “ TCO and light trapping in silicon thin film solar cells ,”, Solar Energy, Volume 77, Issue 6, December 2004, Pages 917–930.
- [5] “Trends in photovoltaic applications – Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2010,” International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme, 2011.
- [6] Dennis M. Callahan , Jeremy N. Munday, and Harry A. Atwater “Solar Cell Light Trapping beyond the Ray Optic Limit ” *Nano Lett.*, 2012, 12 (1), pp 214–218.
- [7] C. Iskander Yousif, ‘Recent Developments of Applying Solar Photovoltaic Technologies in Malta’, Proceedings of the ‘Enemalta’ 25th Anniversary Conference on Energy Efficiency, Mediterranean Conference Centre, 18th-19th October, Valetta, Malta, 2002.
- [8] V. Fthenakis and H. Kim, “Photovoltaic’s: Life-cycle analyses,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1609 – 1628, 2011.
- [9] Energie-Atlas, données de Métronome 6.0. <http://www.energie-atlas.ch>.
- [10] “Global market outlook for photovoltaic’s until 2015,” European Photovoltaic Industry Association, 2011.
- [11] “Solar photovoltaic’s competing in the energy sector – on the road to competitiveness” European Photovoltaic Industry Association, 2011.
- [12] A. Jäger-Waldau, “PV status report 2008, research, solar cell production and market implementation of photovoltaics,” Joint Research Centre, European commission, 2008.
- [13] Photon International, analyse EPIA, mars 2010.

- [14] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 38)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, no. 5, pp. 565–572, 2011.
- [15] A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube, *Fundamentals of Solar Cells. Photovoltaic Solar Energy Conversion*. Academic Press, New York, 1983.
- [16] S. M. Sze, *Physics of semiconductor Devices*. 2nd ed. John Wiley & Sons Inc; 1981.
- [17] J. G. Fossum, R. D. Nasby and E. L. Burgess, Development of high-Efficiency p+-n-n+ back-surface-field silicon solar cells, *Proc. 13th Photovoltaic Specialists' Conf.*, Washington, DC, June 5 - 8, 1978, IEEE, New York, 1978, p. 1294.
- [18] Mathieu H, Fanet H. *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*. 6th ed. Paris: Dunod; 2009.
- [19] M. A. Green, "Limits on the open-circuit voltage and efficiency of silicon solar cells imposed by intrinsic Auger processes," *IEEE Transactions on Electron Device*, vol. 31, no. 5, pp. 671–678, 1984.
- [20] R. M. Swanson, "Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells," in *Proceedings of the 31th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, p. 889, 2005.
- [21] S.A. Studenikin, N. Golego, and M. Cocivera, Optical and electrical properties of undoped ZnO films grown by spray pyrolysis of zinc nitrate solution, *Journal of Applied Physics*, 1998, vol 83(4), pp. 2104-2111
- [22] M GRATZEL, P. BONHOTE : Développement d'un nouveau type de cellules solaires basées sur des films semi conducteurs nanocristallin. Institut de Chimie physique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, (1995).
- [23] L. ZNAIDI et al, Synthèse d'aérogels nanométriques de TiO₂ et leur application photo catalytique, laboratoire d'ingénierie des matériaux et des hautes pressions, CNRS-UPR 1311, Université Paris XIII, (1998).
- [24] J. RANCOURT, *Optical thin films, User's handbook*, Mac Graw Hill, New York, (1987).
- [25] Yinhua Jianga, Yun Yan, Wenli Zhang, Liang Ni, Yueming Sun, Hengbo Yin, "Synthesis of cauliflower-like ZnO–TiO₂ composite porous film and photoelectrical properties », *Applied Surface Science*,(2011),vol 257.pp 6583–6589.
- [26] A.Moustaghfir « Élaboration et caractérisation de couches minces d'oxyde de zinc. Application à la photo protection du polycarbonate », Thèse de doctorat, université Blaise Pascal, (2004).

- [27] I. Saad eddin, "Preparation and characterization of now transparent conducting oxides based on SnO₂ and In₂O₃: ceramics and thin films", thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, (2007).
- [28] N. Ito, Y. Sato, P.K. Song, A. Kaijio, K. Inoue, Y. Shigesato, *Thin Solid Films* vol 99-pp 496, (2006) .
- [29] W. Siefert, *Thin Solid Films* 121-275, (1984).
- [30] A. Fouchet, "Croissance et caractérisations de films minces de ZnO et ZnO dopé cobalt préparés par ablation laser pulsé", Thèse de doctorat, université de Caen, (2006).
- [31] *Handbook of Chemistry and Physics*, 56th Edition, Ed. R.C. Weast, CRS Press, 1975).
- [32] E.M. Bachari, G. Baud, S. Ben Amor, M. Jacquet, *Thin Solid Films*, 348, 165 (1999).
- [33] T.K. Subramanyam, B. Srinivasulu Naidu, S. Uthanna, *Cryst. Res. Technol.*, 35, 1193 (2000).
- [34] M. Rebien, W. Henrion, M. Bär, C.H. Fischer, *App. Phys. Lett.*, 80, 3518 (2002).
- [35] F. Ng-Cheng-Chin, M. Roslin, Z.H. Gu. T.Z. Fahidy, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 31, L71 (1998).
- [36] K.I. Chopra, S. Major and D.K. Pandya, *Thin solid films* 1, 102 (1986).
- [37] P. Kubelka, F. Munk, *Z. Tech. Phys.*, 1931, 12, 593-601.
- [38] H. Tang, H. Berger, P. Schmid, F. Levy, G. Burry, *Solid State Commun.*, 1993, 87, 847-850.
- [39] D. Nithyaprakash, M. Ramamurthy, P. Thirunavukarasu, T. Balasubramaniam. J. Chandrasekaran and P. Maadeswaran *Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials Volume 1, -1*, (2009) p. 42-51.
- [40] I. Altina, I. Polatb, E. Bacaksızb, M. Sokmena, - *Applied Surface Science* 258 , (2012)4861– 4865.
- [41] T. BUCH, A. GEOFFROY et B. LAMBERT *journal de physique Colloque C3*, supplénzenf au no 4, Tome 35, Auri/, (1974) page C3-159.
- [42] M.A. Hernández-Fenollosa, , M.C. López, V. Donderis, M. González, B. Marí, J.R. Ramos-Barrado *Thin Solid Films* 516 ,(2008)1622–1625.
- [43] E. Bacaksiz, , O. Görür, M. Tomakin, E. Yanmaz, M. Altunbaş *Materials Letters* 61 , (2007)5239–5242.
- [44] N. Fathy, M. Ichimura, « Photoelectrical properties of ZnS thin films deposited from aqueous solution using pulsed electrochemical deposition», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87, (2005) 747–756

- [45] W. Daranfed, M.S. Aida, A. Hafdallah, H. Lekiket, « Substrate temperature influence on ZnS thin films prepared by ultrasonic spray», *Thin Solid Films*, 518, (2009), 1082–1084
- [46] H.H. Afifi, S.A. Mahmoud, A. Ashour-*Thin Solid Films* 263, (1995)248-251.
- [47] M. Berginski, J.Hupkes, A.Gordijn, W.Reetz, T.Watjen, B.Rech, M. Wuttig, *Sol.EnergyMater.Sol.Cells*92 (2008)1037–1042.
- [48] H. Gopala Swamy, P. Rayarama Reddy, *Semicond. Sci. Technol.* 5 (1990) 980.
- [49] X. Li, J.P.Gao, L.J.Xue, Y.C.Han, *Adv.Funct.Mater.*20 (2010) 259–265.
- [50] S. Chhajed, M.F.Schubert, J.K.Kim, E.F.Schubert, *Appl.Phys. Lett.* 93(2008)251108.
- [51] S. Fay, J. Steinhauser, S. Nicolay, and C. Ballif, “Polycrystalline ZnO: B grown by LPCVD as TCO for thin film silicon solar cells,” *Thin Solid Films*, vol. 518, no. 11, pp. 2961–2966, 2010.
- [52] J.A. Anna Selvan, H. Keppner, A. Shah, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 426 (1996) 497.
- [53] J. Ma, S.Y. Li, *Thin Solid Films* 237 (1994) 16.
- [54] T. Frank, J. Smith, *Appl. Phys. Lett.* 43 (1983) 1108.
- [55] P. Souletie, S. Bethke, B.W. Wessels, H. Pan, *J. Crystal Growth* 86 (1988) 248.
- [56] J. I. Owen, J. Hüpkes, H. Zhu, E. Bunte, and S. E. Pust, “Novel etch process to tune crater size on magnetron sputtered ZnO:Al,” *Physica Status Solidi A*, vol. 208, no. 1, pp. 109–113, 2011
- [57] M.J. Brett, R.R. Parsons, *J. Vac. Sci. Technol. A*4 (3) (1986) 423.
- [58] J.A. Nobbs, F.C. Gillespie, *J. Phys. Chem. Solids* 31 (1970) 2353.
- [59] A.F. Aktaruzzaman, G.L. Sharna, L.K. Malhotra, *Thin Solid Films* 183 (1990) 67.
- [60] B. L. SOPORI and R. A. PRYOR, Design of antireflection coatings for textured silicon solar cells, *Solar Cells*, 8 (1983) 249 – 261.
- [61] D. Kanematsu, S. Yata, Y. Aya, A. Terakawa, and M. Iseki, Quantitative measurement and design of texture morphology for high-efficiency thin-film silicon solar cells, *Japanese Journal of Applied Physics* 53, 076501 (2014)
- [62] T. Markvart, Light harvesting for quantum solar energy conversion, *Prog. Quantum Electron.* 24 (2000) 107.
- [63] A. Benmir, M. S. Aida, Analytical modeling and simulation of CIGS solar cells, *Energy Procedia* 36 (2013) 618 – 627.
- [64] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, seventh ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1999, Section 1.6.