

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

التعليم
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

Présenté par

Makhtour Djamel

&

Gharbi Samir

Pour l'obtention du diplôme master en Électronique option Micro-optoélectronique

Thème

Etude et simulation d'une structure à base de InGaN pour le photovoltaïque

Proposé par : Mr.Nacer

Année Universitaire 2012-2013

Remerciements et Dedicaces

On remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le Courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur monsieur **Nacer.S**, pour son entière disposition, et ses judicieux conseils, sa patience et sa gentillesse, mais surtout pour son esprit paternel.

Mes sentiments de profonde gratitude vont à mes professeurs qui tout au long des années d'études nous ont transmis leur savoir sans réserve.

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de la présente mémoire.

Enfin, je tiens à remercier tous mes amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de cette préparation.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui n'ont pas cessé de m'encourager et me soutenir dans les moments difficiles et qui ont prié Dieu pour moi, et qui ont su m'entourer de toute leur affection et amour.

Tous ceux qui me sont chers

:
الخلايا الكهروضوئية تحويل الطاقة الضوء مباشرة إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية .
متطلبات، يمكن استخدام الكهرباء المولدة لتزويد الموقع أو العزلة التي تباع في كليا أو جزئيا إلى شبكة التوزيع. هذا
العمل يهدف خلية ضوئية مكونة InGaN . بعد تذكير لخصائص الخلية الضوئية،
تؤثرات مختلف المعلمات على خصائص الخلية الضوئية المدروسة. نتائج المحاكات تبين ان تركيز الانديوم له تأثير
كبير على مردود الخلية بالاضافة الى ان مردود مثالي قد تم التحصل عليه بتركيز الانديوم قدره 60%.

كلمات المفاتيح:الخلايا الشمسية، المحاكاة الضوئية، الفجوة، الانكسار والانعكاس والحصيلة.

Résumé :

L'énergie photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par des cellules solaires. Selon les besoins, l'électricité produite peut être utilisée pour l'alimentation d'un site isolé ou revendue en tout ou partie au réseau de Distribution. Ce travail consiste à étudier et simuler une cellule solaire à base du matériau InGaN. Après avoir rappelé les caractéristiques d'une cellule solaire, l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule étudiée. Les résultats de simulation montrent que la concentration d'indium influe considérablement sur le rendement de la cellule, aussi le rendement optimal a été obtenu pour une concentration d'indium de 60%.

Mots clés : photopile, photovoltaïque, simulation, gap, réfraction, réflexion, rendement.

Abstract :

Photovoltaic converts Light energy directly into electrical energy by solar cells. Depending on requirements, the electricity generated can be used to supply site isolation or sold in whole or in part to the distribution network. This work aim to study and simulate solar cell based on InGaN material .After having recalled the characteristics of a solar cell, the influence of different parameters on the characteristics of the studied cell. The simulation results show that the concentration of indium significantly affects the performance of the cell, as the optimum yield was obtained at an indium concentration of 60%.

Keywords: solar cell, photovoltaic simulation, gap, refraction, reflection, efficiency.

Listes des acronymes et abréviations

AM	Air mass (masse d'air)
h	Constante de Planck
λ	Longueur d'onde
H	La densité de puissance des photons
Φ	Flux de photons
$\Delta\lambda$	Les longueurs d'ondes du spectre
E	L'énergie de photon incident
ν	Fréquence de la lumière
R_s	Rayon du soleil
d	Distance soleil – terre
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
V_n	Potentiel dans le matériau N
V_p	Potentiel dans le matériau P
K	La constante de Boltzmann
T	La température

Listes des acronymes et abréviations

n_i	La concentration de porteurs libres intrinsèques
p_0	La concentration de trous à l'équilibre
N_d	La concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N
N_a	La concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P
N_c	Densité d'états au bord de la bande de conduction
N_v	Densité d'états au bord de la bande de valence
V_0	Le potentiel de diffusion
V	Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction
I_0	Le courant de saturation
n	Le facteur d'idéalité
F	Flux des photons incidents
S_n	La vitesse de recombinaison de surface des électrons en excès à la surface avant
L_n	Longueur de diffusion des électrons dans le matériau P
D_n	Le coefficient de diffusion des électrons
S_p	La vitesse de recombinaison de surface des trous en excès à la surface arrière

Listes des acronymes et abréviations

L_p	Longueur de diffusion des trous dans le matériau N
D_p	Le coefficient de diffusion des trous
λ_{min}	La longueur d'onde la plus petite
λ_{max}	La longueur d'onde la plus grande
J_0	Courant de saturation
τ_n	Durée de vie des porteurs minoritaires pour les électrons
τ_p	Durée de vie des porteurs minoritaires pour les trous
P_i	Puissance d'éclairement reçue par unité de surface
S	La surface de la cellule PV
b	Le paramètre de courbure
μ	La mobilité des porteurs
σ	La section efficace de capture
\bar{v}	La vitesse moyenne des porteurs libres
$N_{défaut}$	La densité de défauts
n	La densité d'électrons libres
$B_{radiatif}$	Constante qui dépend du matériau

Listes des acronymes et abréviations

B_{Auger}	Constante qui dépend du matériau
n_1	Indice de réfraction de l'air
n_2	Indice de réfraction du matériau $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$
θ_1	Angle de rayon lumineux par rapport à la normale
θ_2	Angle de rayon lumineux par rapport à la normale
I_r	L'intensité réfléchie
I_i	L'intensité incidente
BSF	Back surface field
SRH	Shockley-Read-Hall
In	Indium
Ga	Gallium
N	Azote
x	La concentration de l'indium
x_j	Profondeur de la jonction
Bc	Bande de conduction
Bv	Bande de valence

Listes des acronymes et abréviations

E_g	Energie de la bande interdite
E_c	Energie de la bande de conduction
E_v	Energie de la bande de valence
ΔE_c	Décalage de bande de conduction
ΔE_v	Décalage de bande de valence
α	Coefficient d'absorption
n	Indice de réfraction
R	Coefficient de réflexion
q	Charge élémentaire
k	Constante de Boltzmann
ZCE	Zone de charge d'espace
J_n	La densité de courant d'électrons
J_p	La densité courant de trous
J_d	La densité de courant photoélectrique
J_{ph}	Le photo-courant
J_{tot}	La densité de courant totale

Listes des acronymes et abréviations

J_{obs}	Le courant d'obscurité
J_{cc}	Densité de court-circuit
V_{co}	Tension de circuit ouvert
V_m	Tension maximale correspondant à P_{max}
I_m	Courant maximale correspondant à P_{max}
I_{cc}	Courant de court-circuit
FF	Facteur de forme
η	Rendement
n_0	La cocentration d'électrons à l'équilibre
c	La vitesse de la lumière dans le vide

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur le photovoltaïque.....	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Le soleil.....	5
1.2.1 Caractéristiques générales du soleil.....	6
a. Les effets atmosphériques.....	6
b. Absorption dans l'atmosphère.....	7
c. Masse d'air.....	7
d. Le spectre solaire.....	10
e. Flux des photons.....	10
f. Irradiation spectrale.....	11
g. Radiation d'un corps noir.....	12
1.3 L'architecture d'une cellule photovoltaïque.....	15
1.4 Les différentes filières du photovoltaïque.....	18
1.5 Conclusion.....	20
Chapitre 2 : Physique de la cellule photovoltaïque.....	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule.....	22
2.2.1 La jonction PN.....	22
a. A l'équilibre thermodynamique.....	23
b. Hors équilibre thermodynamique.....	24

2.3 Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	25
2.3.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	25
2.3.2 Tension de circuit ouvert.....	29
2.3.3 La puissance maximale P_m	30
2.3.4 Facteur de forme.....	31
2.3.5 Rendement de conversion d'énergie.....	32
2.4 Rendement théorique maximum.....	34
2.5 Facteurs limitant le rendement.....	35
2.5.1 Pertes physiques.....	35
2.5.2 Pertes technologiques.....	36
2.6 Conclusion.....	38
Chapitre 3 : Etude du matériau InGaN.....	39
3.1 Introduction.....	39
3.2 Description du nitrure de gallium-indium (InGaN).....	40
3.2.1 Caractéristique structurelles.....	41
3.2.2 Propriétés électriques.....	42
a. Gap d'énergie interdite dans les nitrures.....	43
1. Evolution du gap d'énergie dans l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	44
b. Longueur de diffusion.....	45
c. Mécanismes de recombinaison.....	46
1. Recombinaisons Shockly-Read-Hall.....	46
2. Recombinaisons radiatives.....	47

3. Recombinaisons Auger.....	48
3.2.3 Propriétés optiques.....	48
a. Indice de réfraction.....	49
b. Absorption.....	50
1. Etudes du coefficient d'absorption.....	51
3.3 Conclusion.....	52
Chapitre 4 : Simulations et résultats.....	53
4.1 Introduction.....	53
4.2 Paramètres générales d'une cellule photovoltaïque à base de matériaux InGaN...54	
4.2.1 Irradiation d'un corps noir.....	54
4.2.2 L'absorption.....	55
4.2.3 L'énergie de la bande interdite (gap).....	56
4.2.4 Indice de réfraction.....	57
4.2.5 Coefficient de réflexion.....	58
4.3 Paramètres électriques essentiels d'une structure InGaN ensoleillée.....59	
4.3.1 Caractéristique courant-tension.....	59
4.3.2 Courant de court-circuit.....	60
4.3.3 Tension de circuit ouvert.....	61
4.3.4 Puissance et puissance maximal délivrée.....	62
4.3.5 Facteur de forme.....	64
4.3.6 Le rendement.....	65
4.4 Conclusion.....	66

Conclusion générale.....	67
Annexe.....	69
Bibliographie.....	71

Liste des figures

Introduction générale :

Figure 1: Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale TWh...2

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Rayon et dimension du soleil.....5

Figure 1.2 : Effet atmosphère sur les rayons solaires.....6

Figure 1.3 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....8

Figure 1.4 : Spectres extraterrestre (AM0), terrestre AM1 et AM1.5.....9

Figure 1.5 : Spectres électromagnétiques.....10

Figure 1.6 : L'irradiation spectrale d'une source lumineuse artificielle (axe de gauche) par rapport à l'éclairement spectral du soleil (axe de droite).....12

Figure 1.7 : L'irradiation spectrale sous (AM0, AM1.5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde.....13

Figure 1.8 : Variations du spectre d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde.....14

Figure 1.9 : Image MEB de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramides.....16

Figure 1.10 : Structure de la cellule PERL à base de silicium avec une texturation de pyramides inversées en face avant.....16

Figure 1.11 : Structure de la cellule HIT à base de silicium avec une texturation de toutes ses couches.....16

Figure 1.12 : Schéma d'une cellule solaire avec la jonction PN, les électrodes, la couche antireflets, et une charge électrique.....17

Figure 1.13 : Rendements record de cellules photovoltaïques dans les différentes filières.....19

Chapitre 2 :

Figure 2.1 : Création et diagramme de bande d'une jonction PN.....22

Figure 2.2 : Structure d'une jonction InGaN éclairée.....25

Figure 2.3 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque à l'obscurité (noir) et sous éclairage AM1.5 (rouge).....29

Figure 2.4 : Courbe I-V d'une cellule solaire.....30

Figure 2.5 : Le facteur de forme dans la courbe I-V.....31

Figure 2.6 : Le rendement en fonction du gap d'énergie.....33

Figure 2.7 : Spectre solaire AM1.5 et gap d'énergie des principaux semi-conducteurs. La double flèche en bas du graphique montre le recouvrement du spectre solaire par le gap de l'InGaN.....35

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : Structure wurtzite selon plusieurs directions, exemple du GaN : (a) [0001],(b)[11 $\bar{2}$ 0], (c) [10 $\bar{1}$ 0].....41

Figure 3.2 : Structure cubique zinc-blende selon différentes directions, exemple du GaN:(a) [100] , (b) [110] , (c) [111].....42

Figure 3.3 : Diagramme de bande du GaN.....43

Figure 3.4 : Diagramme de bande de l'InN.....44

Figure 3.5 : Schéma de la recombinaison Shockley-Read-Hall avec les coefficients d'émission et de capture des électrons et des trous.....	47
Figure 3.6 : Schéma de la recombinaison radiative.....	46
Figure 3.7 : Schéma de la recombinaison Auger.....	48
Figure 3.8 : Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.....	49

Chapitre 4 :

Figure 4.1 : Structure InGaN d'une cellule solaire uni-jonction.....	53
Figure 4.2 : Le Flux incident F en fonction de la longueur d'onde λ à T = 6000 K.....	54
Figure 4.3 : Variation du coefficient d'absorption α en fonction d'énergie de photon incident E.....	55
Figure 4.4 : Variation du gap d'énergie interdite en fonction de la concentration d'Indium.....	56
Figure 4.5 : Variation de l'indice de réfraction n en fonction de la concentration d'Indium.....	57
Figure 4.6 : Variation du coefficient de réflexion R en fonction de la concentration d'Indium x.....	58
Figure 4.7 : Caractéristique courant-tension de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pour plusieurs concentrations d'indium avec : ($x_j = 10^{-6}$ cm et $N_a = N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).....	59
Figure 4.8 : Variation de courant court-circuit J_{cc} en fonction de la concentration d'indium x.....	60
Figure 4.9 : Variation de la tension circuit ouvert V_{co} en fonction de concentration d'indium x avec : ($x_j = 10^{-6}$ cm et $N_a = N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).....	61
Figure 4.10 : Puissance délivrée par la cellule pour plusieurs concentrations d'indium de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ avec : ($x_j = 10^{-6}$ cm et $N_a = N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).....	62

Figure 4.11 : Variation de la puissance maximale P_m en fonction de la concentration d'indium x	63
Figure 4.12 : Variation du facteur de forme FF en fonction de la concentration d'indium x	64
Figure 4.13 : Représentation du rendement de la structure $In_xGa_{1-x}N$ en fonction de la concentration d'indium.....	65

Annexe :

Figure A.1 : Tableau périodique de Mendeleïev.....	70
--	-----------

Liste des tableaux

Introduction générale :

Tableau 1 : Potentiel solaire en Algérie.....	2
---	----------

Chapitre 3 :

Tableau 3.1 : Tableau de Mendeleïev ou tableau périodique des éléments .L'InGaN est composé des éléments de la colonne III et de l'azote N.....	40
---	-----------

Tableau 3.2 : Paramètres structuraux a , c et u pour le GaN et l'InN.....	41
---	-----------

Annexe :

Tableau A.1 : Paramètres physiques de la structure InGaN.....	70
---	-----------

Introduction générale

L'avenir énergétique mondial est l'une des questions majeures et d'actualité qui se pose sur la scène internationale. En effet les problèmes liés à la gestion de l'énergie dans le monde sont multiples. Il y a en premier lieu le danger de la radioactivité sur la vie humaine que causent les explosions des centrales nucléaires comme les accidents enregistrés à Tchernobyl en Ukraine en avril 1986 et à Fukushima au Japon en mars 2011. A cela s'ajoutent les effets néfastes liés à l'environnement engendrés par la difficulté de l'élimination des déchets nucléaires et les rejets du gaz du dioxyde de carbone CO₂ causé par l'utilisation des énergies fossiles comme le pétrole et le gaz naturel. Par ailleurs, les réserves des énergies fossiles ne sont pas inépuisables. Ces multiples raisons donnent un regain d'intérêt au développement et à l'utilisation des énergies renouvelables sous ces différentes formes : photovoltaïque, éolienne et thermique.

L'Algérie entreprend un engagement dans ce sens afin de préserver l'environnement et les ressources énergétiques d'origine fossile comme le pétrole et le gaz naturel. Vu le gisement solaire important dont dispose l'Algérie, le programme national des énergies renouvelables se concentre essentiellement sur le développement de l'énergie photovoltaïque. Le tableau 1 montre le potentiel solaire en Algérie.

Régions	Régions Côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heure/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau 1 : Potentiel solaire en Algérie [1].

L'objectif de la stratégie du développement de l'énergie photovoltaïque en Algérie est d'atteindre 37% de la production nationale d'électricité d'ici 2030 comme le montre la figure 1.

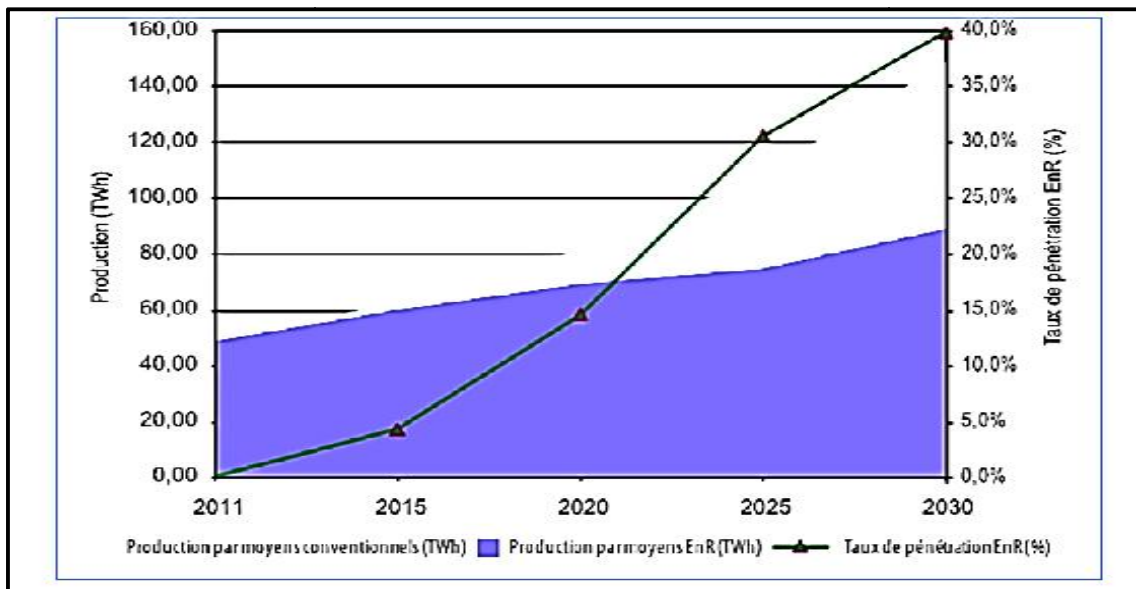


Figure 1 : Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale TWh [2].

L'obstacle que rencontre la production de l'électricité solaire est lié à l'augmentation de son prix de revient en comparaison aux sources des énergies conventionnelles. Le paramètre important qui maintient le coût élevé de l'électricité solaire est le prix de revient de la production des panneaux solaires dû au prix de revient de la fabrication des cellules solaires qui constituent ces panneaux.

En effet, le rapport rendement physique / rendement économique des cellules solaires est un paramètre qu'il faut augmenter afin de réduire le prix de revient de l'électricité solaire. Parmi les possibilités qui permettent d'augmenter ce rapport, la recherche de nouvelles structures et de nouveaux matériaux dans la conception des cellules solaires demandant un faible budget de fabrication est l'une des voies principales. Les nouvelles connaissances acquises dans le domaine des matériaux et des nouvelles structures permettent d'exploiter l'apport de chacun de ces deux paramètres à l'augmentation du rendement photovoltaïque tout en diminuant le prix de revient des nouvelles cellules solaires.

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans le processus de fabrication en faisant un bon choix pour la structure de la cellule.

L'objectif principal de ce mémoire est d'optimiser et simuler le rendement, le facteur de forme et la puissance délivrée d'une cellule solaire à base d'InGaN, en modulant les différents paramètres tels que le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, ainsi que la concentration d'indium.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les caractéristiques du soleil tels que le spectre solaire, le corps noir, le flux incident ainsi que le photovoltaïque dans le monde et l'architecture d'une cellule solaire.

Le deuxième chapitre présente les caractéristiques d'une cellule solaire ainsi que les équations nécessaires aux simulations.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du matériau InGaN et ses caractéristiques structurelles, électriques et optiques.

Le quatrième chapitre présente les résultats de simulation d'une structure à base de matériau InGaN.

1.1 Introduction

Pendant les dernières décennies, la consommation mondiale d'énergie a considérablement augmenté, en raison de l'augmentation de la population mondiale d'une part et l'explosion du développement industriel de pays industrialisés d'autre part. Actuellement la production de l'énergie est basée sur les énergies non renouvelables à savoir le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'uranium. En plus des deux sérieux problèmes posés par ces énergies, sur le plan écologique (la pollution et le réchauffement de la planète) et sur le plan politique entre les pays (les conflits entre les états pour commander les réservoirs de combustible fossile), ces ressources sont épuisables. Et suite à l'augmentation du taux de consommation mondiale de l'énergie, l'homme sera condamné à trouver d'autres sources pour satisfaire les besoins énergétiques des futures générations. Les énergies dites renouvelables sont la meilleure solution pour dépasser ces problèmes. La production de ces énergies est basée sur des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités.

1.2 Le soleil

Le soleil est une sphère de gaz chaud dont la température interne atteindra plus de 20 millions de degrés Kelvin en raison de réactions de fusion nucléaire au cœur du soleil qui convertissent l'hydrogène en hélium.

Le rayonnement émis par le noyau interne n'est pas visible car elle est fortement absorbée par une couche d'atomes d'hydrogène plus près de la surface du soleil.

La surface du Soleil, appelée la photosphère, a une température d'environ 6000K et se rapproche étroitement à un corps noir (Figure 1.1) [3].

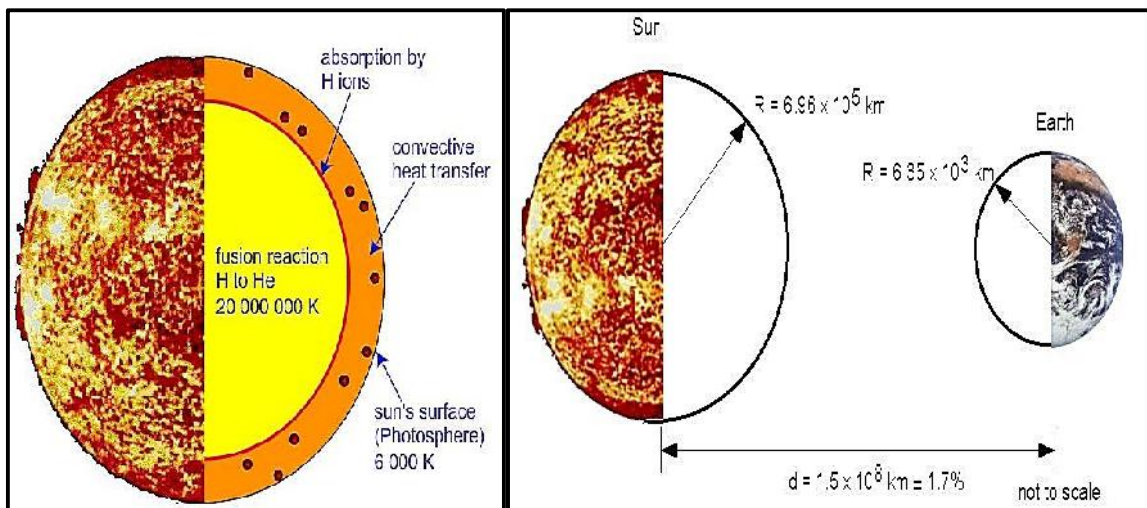


Figure 1.1 : Rayon et dimension du soleil [3].

1.2.1 Caractéristiques générales du soleil

a Les effets atmosphériques

Les effets atmosphériques ont plusieurs impacts sur le rayonnement solaire à la surface de la Terre. Les principaux effets pour les applications photovoltaïques sont:

- Une réduction de la puissance de la radiation solaire due à l'absorption, la diffusion et la réflexion dans l'atmosphère.
- Un changement dans le contenu spectral du rayonnement solaire en raison d'une plus grande absorption.
- Des variations locales de l'atmosphère (tels que la vapeur d'eau, des nuages et de la pollution) qui ont des effets complémentaires sur la puissance incidente.

Ces effets sont résumés dans la figure 1.2 :

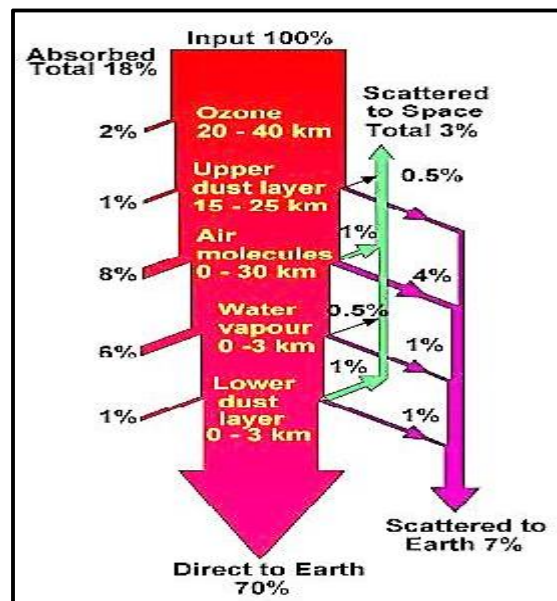


Figure 1.2 : Effet atmosphère sur les rayons solaires [4].

b Absorption dans l'atmosphère

Comme le rayonnement solaire passe à travers l'atmosphère, des gaz, et des poussières, gaz spécifiques, notamment l'ozone (O₃), le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O), ont une très grande absorption qui donne une fosse profonde de la courbe spectrale de rayonnement. Par exemple, une grande partie de la lumière infrarouge lointaine au-dessus de 2µm est absorbée par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone. De même, la lumière ultra-violette inférieure à 0,3µm est absorbée par l'ozone [5].

Le principal facteur de réduction de la puissance du rayonnement solaire est l'absorption et la diffusion de la lumière due à des molécules d'air et la poussière. Ce processus d'absorption ne produit pas les creux profonds dans l'éclairement énergétique spectral, mais provoque plutôt une fonction de réduction de la puissance sur la longueur du trajet à travers l'atmosphère. Lorsque le soleil est à son zénith, l'absorption due à ces éléments atmosphériques provoque une diminution relativement uniforme à travers le spectre visible, de sorte que la lumière incidente est blanche. Cependant, pour des longueurs de trajet plus long, la lumière de haute énergie (longueur d'onde inférieure) est plus efficacement absorbée et dispersée.

c Masse d'air

La masse d'air est la longueur du trajet de la lumière à travers l'atmosphère normalisée par rapport à la longueur du trajet le plus court possible. La masse d'air est définie comme suit:

$$AM = 1/\cos(\theta) \tag{1.1}$$

Où θ est l'angle de la verticale. Lorsque le soleil est au zénith, la masse d'air est de 1.

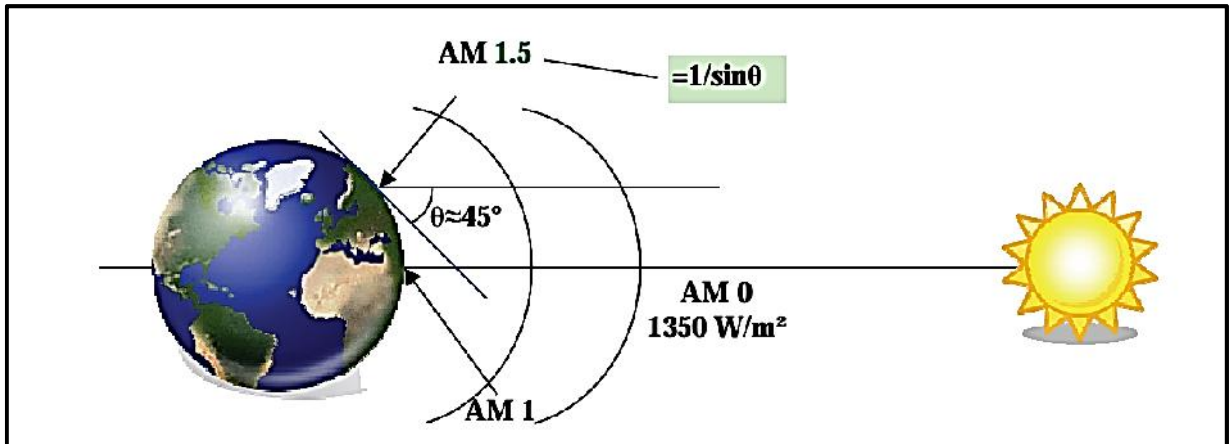


Figure 1.3 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [6].

Le soleil est constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes majoritairement comprises entre 0.2 μm et 3 μm .

Hors atmosphère le rayonnement émis par le soleil (AM0) est constitué de :

- 9% d'UV ($0.1 < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$)
- 43% de visible ($0.4 < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$)
- 48% d'infrarouges ($0.75 < \lambda < 5 \mu\text{m}$)

On représente le rayonnement par un spectre donnant l'irradiation en fonction de la longueur d'onde (Figure 1.4). Pour le soleil, ce spectre est comparable à celui d'un corps noir à une température d'environ 5800 K.

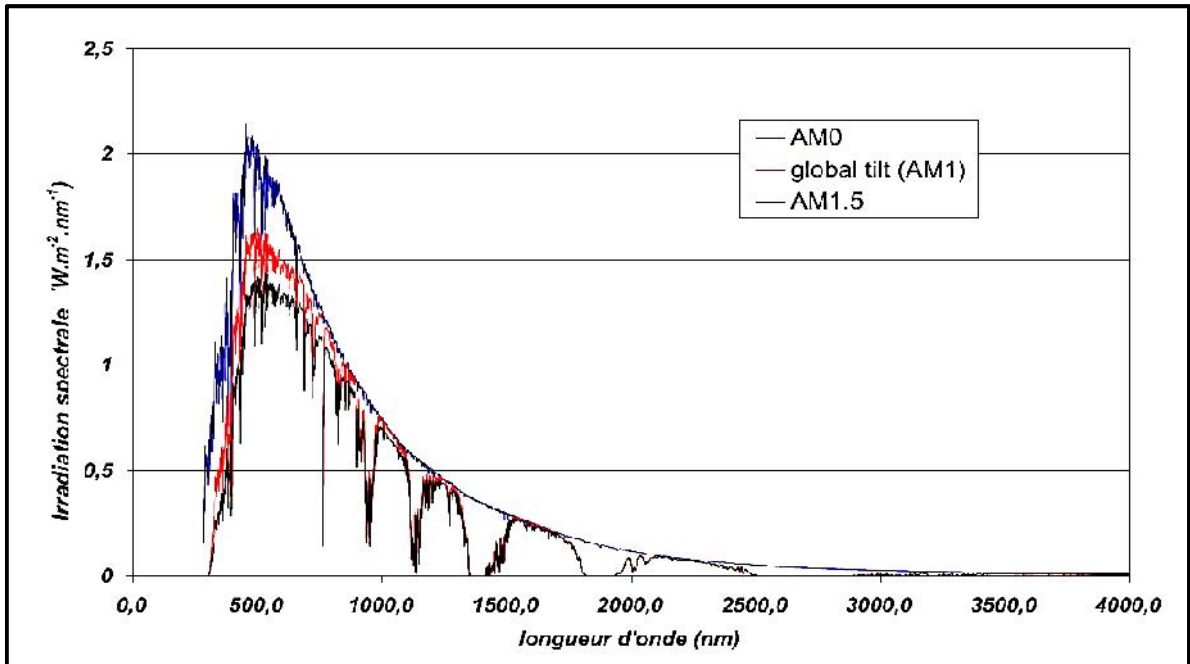


Figure1.4 : Spectres extraterrestres (AM0), terrestres AM1 et AM1.5 [7].

À la surface de la Terre, le spectre solaire n'est plus le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O₃, CO₂, H₂O, ...). Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre. Pour pouvoir comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, la notion d'air-masse (AM), ou « masse atmosphérique » a été créée. Sa valeur dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiation sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en W.m⁻²) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notations suivantes :

- AM0 : Hors atmosphère (applications spatiales). $P \approx 1.36 \text{ kW.m}^{-2}$
- AM1 : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- AM1.5G : Spectre standard, le soleil est à 45°. $P \approx 1 \text{ kW.m}^{-2}$

d Le spectre solaire

Le spectre électromagnétique décrit la lumière comme une onde avec une longueur d'onde particulière. La description de la lumière comme une onde a gagné une première acceptation au début des années 1800 lorsque les expériences de Thomas Young, François Arago et Augustin Fresnel Jean ont montré des effets d'interférence dans des faisceaux de lumière, ce qui indique que la lumière est faite d'ondes (Figure 1.5) [8].

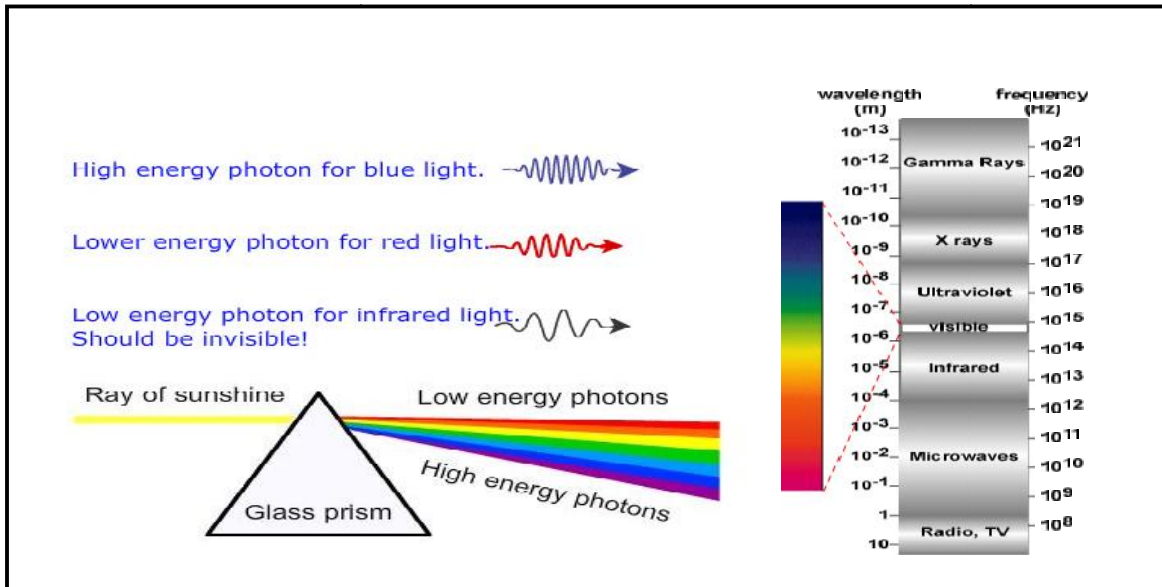


Figure 1.5 : Spectres électromagnétiques [8].

e flux des Photons

Le flux de photons est défini comme étant le nombre de photons (NB) par seconde et par unité de surface:

$$= \frac{NB}{s \times m^2} \quad (1.2)$$

Le flux de photons est important pour déterminer le nombre d'électrons générés, en le multipliant par l'énergie des photons, on obtient l'énergie frappant une surface par unité de temps, ce qui est équivalent à une densité de puissance.

$$H \left[\frac{w}{m^2} \right] = \phi \frac{hc}{\lambda} \quad (1.3)$$

Avec :

H : la densité de puissance des photons

h : la constante de Planck

c : la vitesse de la lumière dans le vide

λ : la longueur d'onde du photons

ϕ : Flux de photons

f Irradiation spectrale

L'irradiation spectrale en fonction de la longueur d'onde du photon notée F, est la façon la plus courante de caractériser une source de lumière.

$$F(\lambda) = \frac{E}{\Delta\lambda} \quad (1.4)$$

Avec :

F(λ) : L'irradiation spectrale

ϕ : Flux de photons

$\Delta\lambda$: Les longueurs d'ondes du spectre

E : L'énergie de photon incident

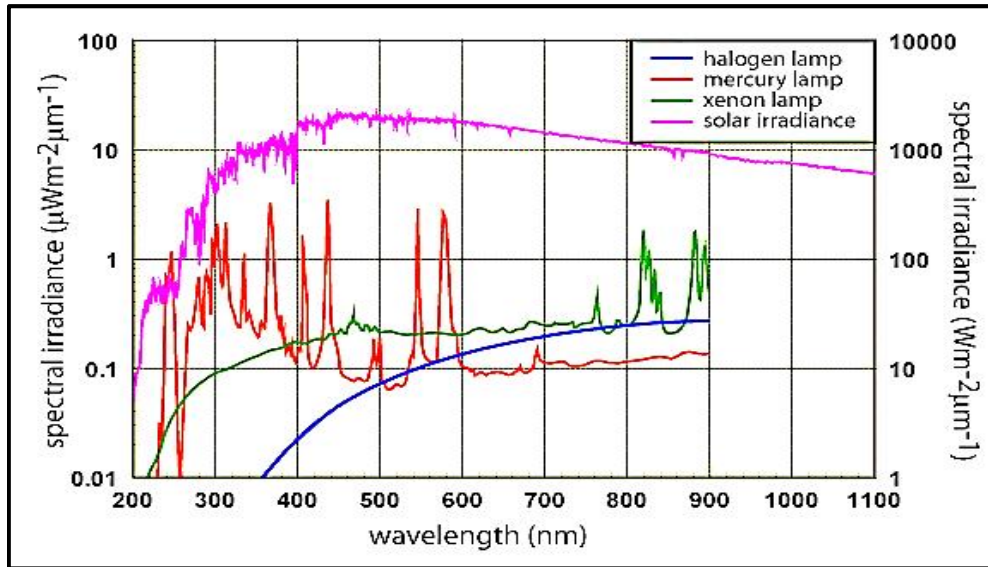


Figure 1.6 : L'irradiation spectrale d'une source lumineuse artificielle (axe de gauche) par rapport à l'éclairement spectral du soleil (axe de droite) [9].

La densité de puissance totale émise par une source de lumière peut être calculée par l'intégration de l'irradiation spectrale sur toutes les longueurs d'ondes.

$$H = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda \quad (1.5)$$

g Radiation d'un corps noir

Un corps noir absorbe toutes les radiations incidentes sur sa surface, et émet un rayonnement en fonction de sa température.

Les sources corps noirs qui sont d'intérêt pour le photovoltaïque, émettent de la lumière dans le domaine visible. L'irradiation spectrale d'un corps noir est donnée par la loi du Planck, montrée dans l'équation suivante:

$$F(\lambda) = 2\pi A \frac{c}{\lambda^4 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)} \quad (1.6)$$

Avec :

v : La fréquence de la lumière

K : La constante de Boltzmann

T : La température

$$A = \left(\frac{R_s}{d}\right)^2 \quad (1.7)$$

Rs : rayon du soleil ($R_s = 6,96 \cdot 10^5$ Km)

d : distance soleil – terre ($d = 1,5 \cdot 10^8$ Km)

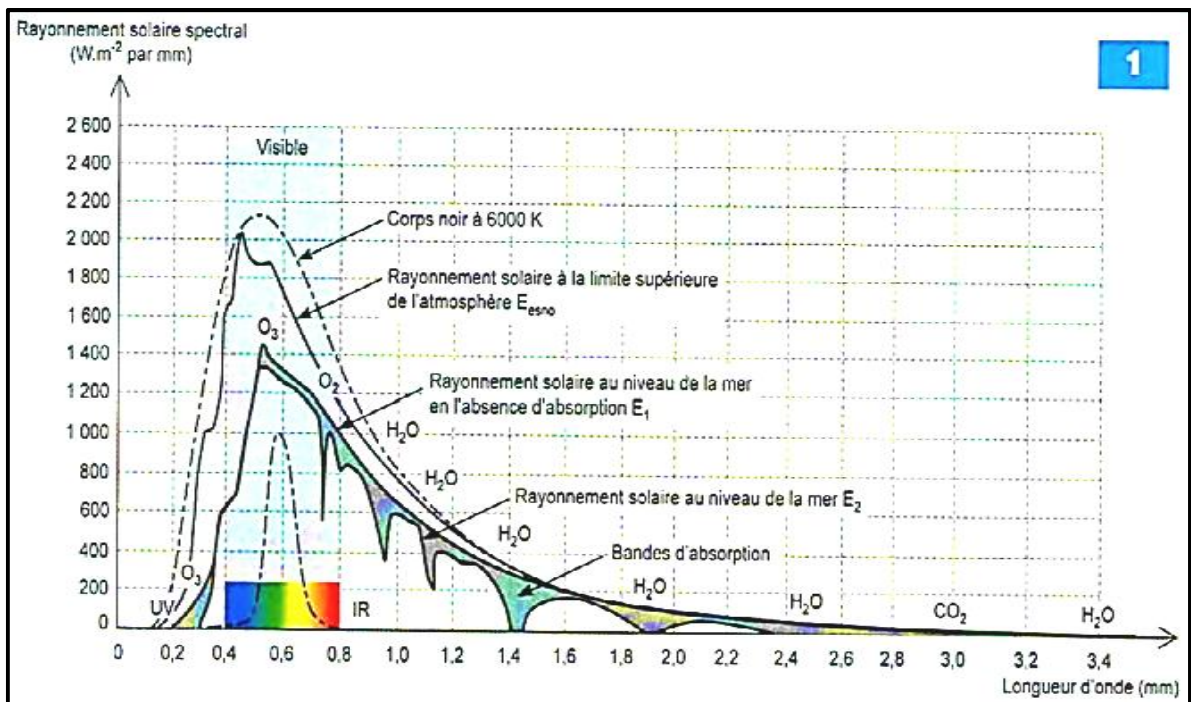


Figure 1.7 : L'irradiation spectrale sous (AM0, AM1.5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde [10].

La densité de puissance totale d'un corps noir est déterminée en intégrant l'irradiation spectrale sur toutes les longueurs d'onde qui donne:

$$H = \sigma T^4 \quad (1.8)$$

Avec :

σ : constante de Stefan-Boltzmann, elle égale $5.67 \times 10^{-8} \text{ J/m}^2\text{s K}^4$

Les équations ci-dessus et la figure 1.8 montrent que la distribution spectrale et la puissance de la lumière émise augmente en fonction de la température d'un corps noir. Par exemple, près de la température ambiante, un émetteur de corps noir va émettre un rayonnement de faible puissance à des longueurs d'onde en majorité supérieur à $1\mu\text{m}$, bien au-delà de la portée visuelle de l'observation humaine. Si le corps noir est chauffé à 3000 K, il s'allume en rouge car le spectre de la lumière émise se déplace vers des énergies plus élevées dans le spectre visible. Si la température du filament est en outre augmentée à 6000K, le rayonnement est émis à des longueurs d'onde dans le spectre visible allant du rouge au violet et la lumière apparaît blanche. Le graphique ci-dessous illustre plus clairement la variation du spectre de corps noir émis en fonction de la température.

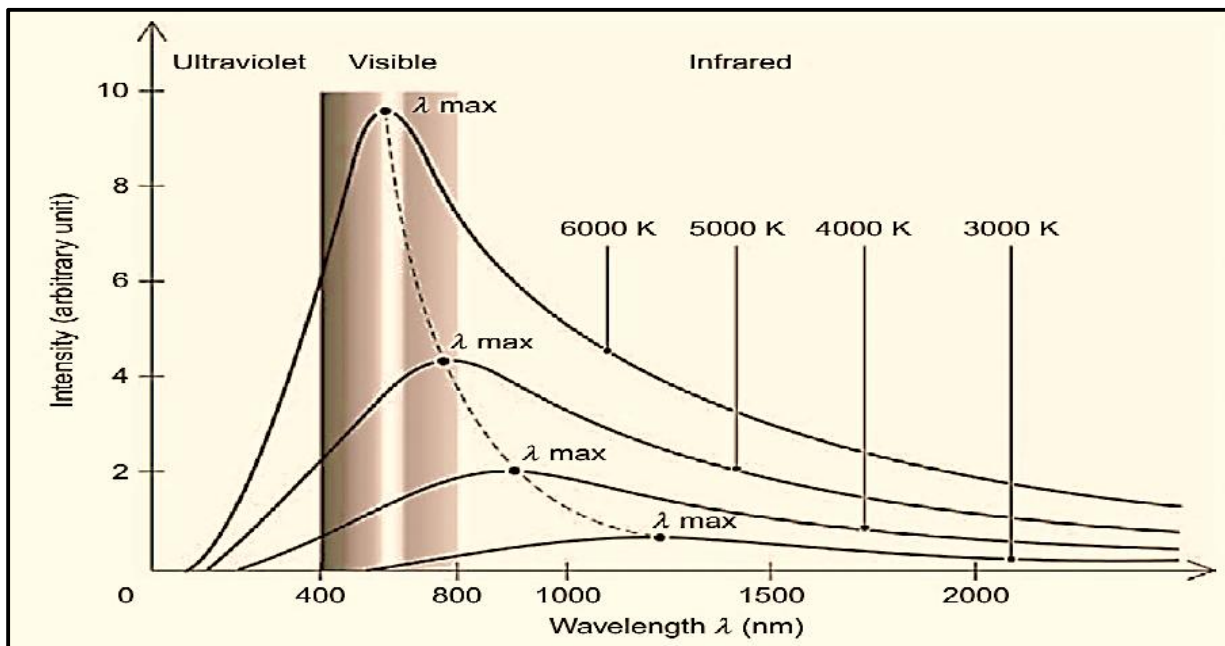


Figure 1.8 : Variations du spectre d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde [11].

1.3 L'architecture d'une cellule photovoltaïque

De chaque côté de la jonction PN, on dépose des électrodes métalliques afin de collecter les charges photogénérées. Sur, la face avant, celle qui reçoit la lumière, l'électrode a une forme de grille afin d'optimiser la collecte des porteurs tout en laissant passer la lumière. Si la grille est trop espacée, la lumière pourra passer facilement, de nombreuses charges seront créées, néanmoins, une partie des porteurs n'aura pas le temps d'être collectée avant de se recombiner. A l'opposé, si la grille est trop resserrée, tous les porteurs pourront être collectés, cependant moins de lumière pourra passer et être absorbée par le matériau créant ainsi moins de charges.

Pour certaines technologies, il est possible d'utiliser des électrodes transparentes comme l'ITO (oxyde d'indium-étain) ou le ZnO. Dans ce cas, le problème de la grille ne se pose plus puisque cette couche recouvre toute la cellule.

Sur la face arrière, un contact métallique «plein» est déposé. Cette couche sert également de couche réfléchissante pour les photons qui n'ont pas été absorbés à leur premier passage.

Pour l'InGaN et le GaN, les contacts sont des alliages de métaux. Pour l'InGaN type N, on utilise généralement l'alliage titane-aluminium-or et pour l'InGaN de type P, l'alliage nickel-or.

Afin de minimiser les pertes liées à la réflexion de rayons lumineux à la surface de la cellule, une couche antireflet est le plus souvent déposée sur la face avant. La technique la plus utilisée est une texturation de la surface en forme de pyramides (Figure 1.9) ou de pyramides inversées (Figure 1.11) [12].

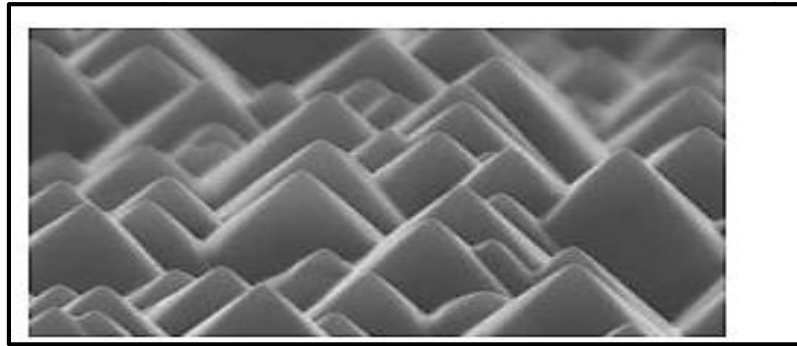


Figure 1.9 : Image MEB de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramides [13].

Cette texturation peut se faire au niveau du substrat (Figure 1.11), dans ce cas toutes les couches déposées ensuite présentent la même texturation, ou bien seulement sur la dernière couche déposée (Figure 1.10). Le but de cette structure est double, premièrement, elle permet de minimiser les réflexions directes à la surface grâce aux facettes, et deuxièmement, elle piège la lumière à l'intérieur du composant à l'aide de réflexions totales internes.

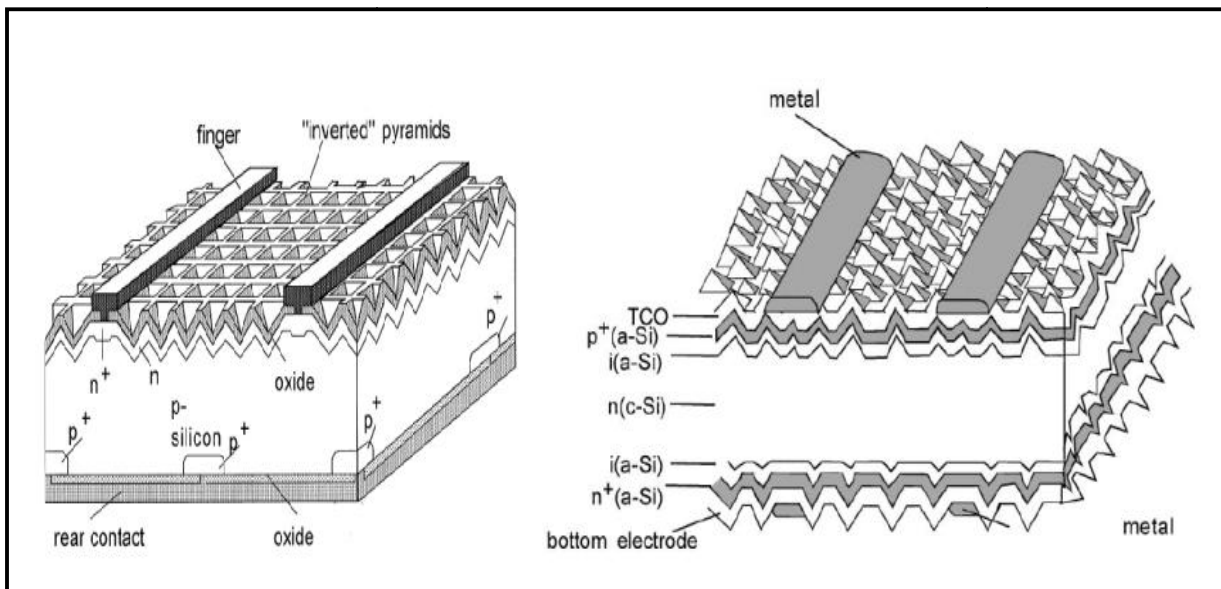


Figure 1.10 : Structure de la cellule PERL à base de silicium avec une texturation de pyramides inversées en face avant [14].

Figure 1.11 : Structure de la cellule HIT à base de silicium avec une texturation de toutes ses couches [14].

La Figure 1.12 montre l'architecture d'une cellule photovoltaïque typique avec la jonction PN, la couche antireflet, les électrodes sur les faces avant et arrière.

Les cellules photovoltaïques industrielles en silicium sont généralement dimensionnées par carrés de 10 ou 15 cm de côté. Cependant, ces dimensions dépendent de la filière. Par exemple, dans la filière III-V à concentration, les cellules sont beaucoup plus petites, de l'ordre du centimètre carré. Plusieurs sont ensuite connectées les unes aux autres en série, afin d'augmenter la tension de sortie, et en parallèle, afin d'augmenter le courant. Les cellules photovoltaïques forment alors un module photovoltaïque. Par exemple, le module HIT-N235SE10 de Sanyo présente une puissance maximale de 235 W avec 72 cellules (6 x 12). Les cellules sont des hétérojonctions de silicium composées de silicium monocristallin mince et de couches ultrafines de silicium amorphe sur les faces avant et arrière. Ce panneau produit une tension maximale de sortie de 43V et un courant maximum de sortie de 5,48 A [15].

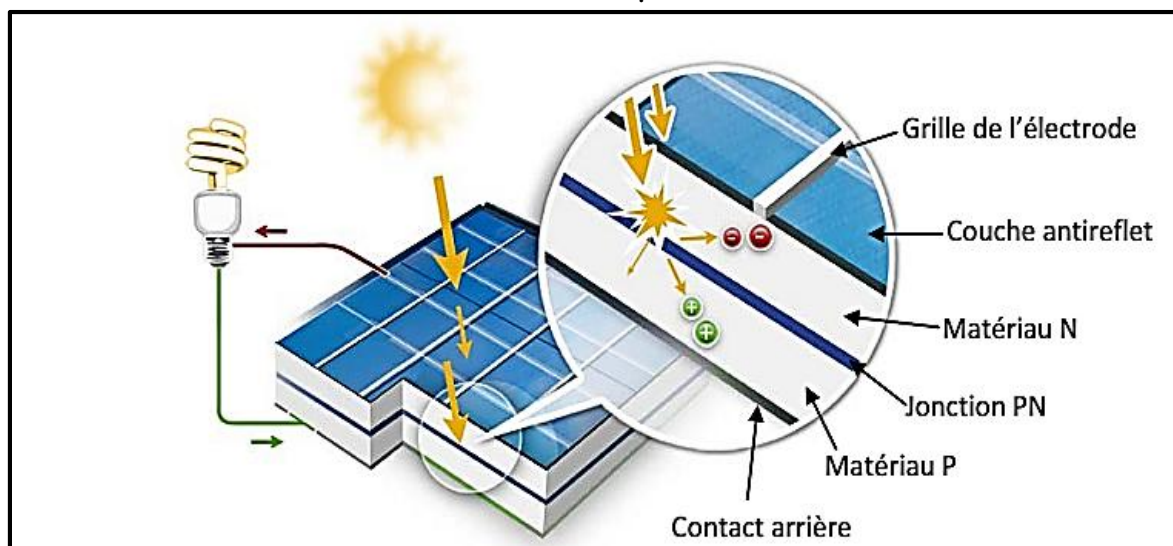


Figure 1.12 : Schéma d'une cellule solaire avec la jonction PN, les électrodes, la couche antireflets, et une charge électrique [16].

1.4 Les différentes filières du photovoltaïque

La Figure 1.13 présente les rendements record dans les différentes filières photovoltaïques. A ce jour, le plus haut rendement obtenu est de 43,5 % avec une cellule triple-jonction accordée en maille, sous concentrateur (x418 soleils), par l'entreprise Solar Junction [17]. Cette technologie de cellules multi-jonctions à base de matériaux III-V présente depuis longtemps les plus hauts rendements. C'est pourquoi elle est aujourd'hui principalement utilisée pour l'alimentation des satellites. Néanmoins, son coût reste très élevé, rendant impossible son utilisation pour des applications terrestres. Si on ne regarde que les simples jonctions en matériau III-V, le plus haut rendement a été présenté avec du GaAs par l'institut pour les systèmes à énergie solaire de Fraunhofer (FhG-ISE), avec 29,1 % sous 117 soleils.

Le silicium sous toutes ses formes domine le marché des applications terrestres. La filière du silicium monocristallin a l'avantage de présenter les plus hauts rendements de conversion avec un record à 27,6 %, par l'entreprise Amonix, sous concentrateur (x92 soleils). Les modules commerciaux présentent des rendements entre 12 et 18 %. Cependant, cette filière est la plus coûteuse des filières silicium.

Le silicium polycristallin est le matériau le plus répandu pour les panneaux solaires commerciaux grâce à son faible coût et son rendement intéressant. Les rendements des modules commerciaux se situent entre 12 et 15 %. Au niveau de la recherche, le FhG-ISE a rapporté un rendement de 20,4 %.

La filière du silicium en couche mince est celle qui possède les rendements les plus bas de la filière silicium avec 12,5 % en recherche, obtenu par United Solar et entre 6 et 9 % pour les modules commerciaux. Le silicium en couche mince est un film très fin (quelques centaines de nanomètres) de silicium amorphe hydrogéné formant une jonction P-i-N déposée sur un substrat de verre ou céramique. Malgré son faible rendement, cette technologie possède les coûts de fabrication les plus bas grâce à la faible quantité de matériau nécessaire et à son procédé de fabrication basse température.

La filière des matériaux en couche mince est dominée par le Cu (In, Ga) Se₂, ou CIGS, avec un record à 20,3 % obtenu par le centre pour la recherche sur l'énergie solaire et l'hydrogène (Zentrumfür Sonnenenergie- und Wasserstoff, ZSW). Depuis son arrivée sur le marché, cette filière est en pleine expansion. Elle présente, en effet, des performances équivalentes au silicium polycristallin avec un coût inférieur grâce à un dépôt rapide nécessitant peu d'énergie (par rapport au silicium polycristallin) et avec la possibilité de couvrir de grandes surfaces. Par ailleurs, les cellules en couches minces présentent un grand intérêt pour des applications photovoltaïques flexibles.

Enfin, les cellules photovoltaïques émergentes se caractérisent par la plus haute augmentation de rendement sur ces cinq dernières années. Elles sont composées des cellules solaires organiques, des cellules à nanostructures et des cellules à colorant. Ces dernières sont d'ailleurs les plus performantes de cette catégorie avec un rendement de 11,4% obtenu par l'institut national pour la science des matériaux au Japon (NIMS).

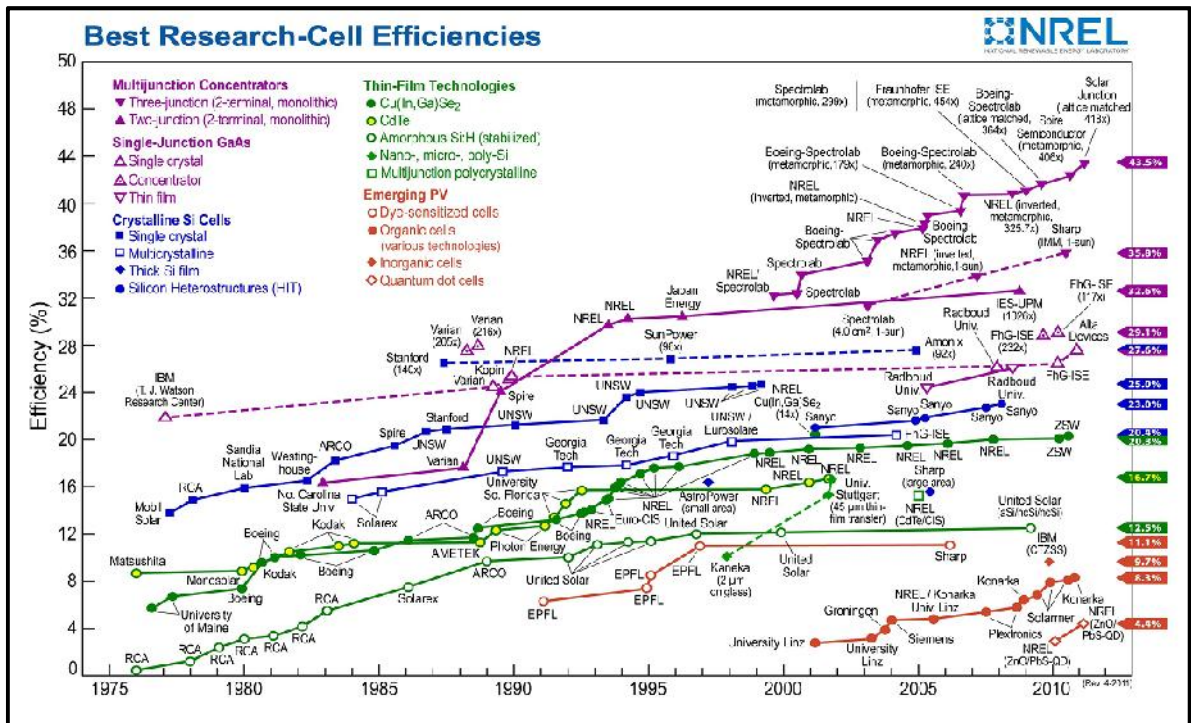


Figure 1.13 : Rendements record de cellules photovoltaïques dans les différentes filières [18].

1.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé les phénomènes physiques liés au soleil, tels que le spectre du soleil, le corps noir et le flux incident, ces connaissances sont indispensables dans les recherches d'énergies solaires et renouvelables.

Nous avons présenté les technologies photovoltaïques et leur architecture ainsi que les marchés mondiaux et les records d'efficacités.

La technologie photovoltaïque reste un domaine promoteur et un vaste champ de recherche scientifique, fascinant autant qu'une énergie renouvelable mais aussi qu'une projection dans le futur pour un environnement moins polluant.

Chapitre2 physique de la cellule photovoltaïque

2.1 Introduction

Les principaux matériaux présentant l'effet photovoltaïque sont les semiconducteurs. Ces matériaux ont la caractéristique d'être de mauvais conducteurs et de mauvais isolants, ils peuvent être caractérisés par leur gap d'énergie interdite (E_g) c'est-à-dire l'énergie à partir de laquelle ils deviennent absorbants et produisent de l'électricité quand ils sont éclairés par une lumière.

$$E_g = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

Avec :

h : la constante de Planck

v : fréquence du photon

c : la vitesse de la lumière dans le vide

λ : la longueur d'onde du photon

Si un photon arrive sur un semi-conducteur avec une énergie inférieure à son gap d'énergie, il ne sera pas absorbé. Le matériau sera transparent à cette longueur d'onde.

Si l'énergie du photon incident est supérieure au gap d'énergie, le photon sera absorbé et son énergie servira en partie à briser une liaison de valence pour créer une paire électron-trou. L'énergie excédentaire sera transformée en chaleur et transmise au réseau (phonons).

2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule

2.2.1 La jonction PN

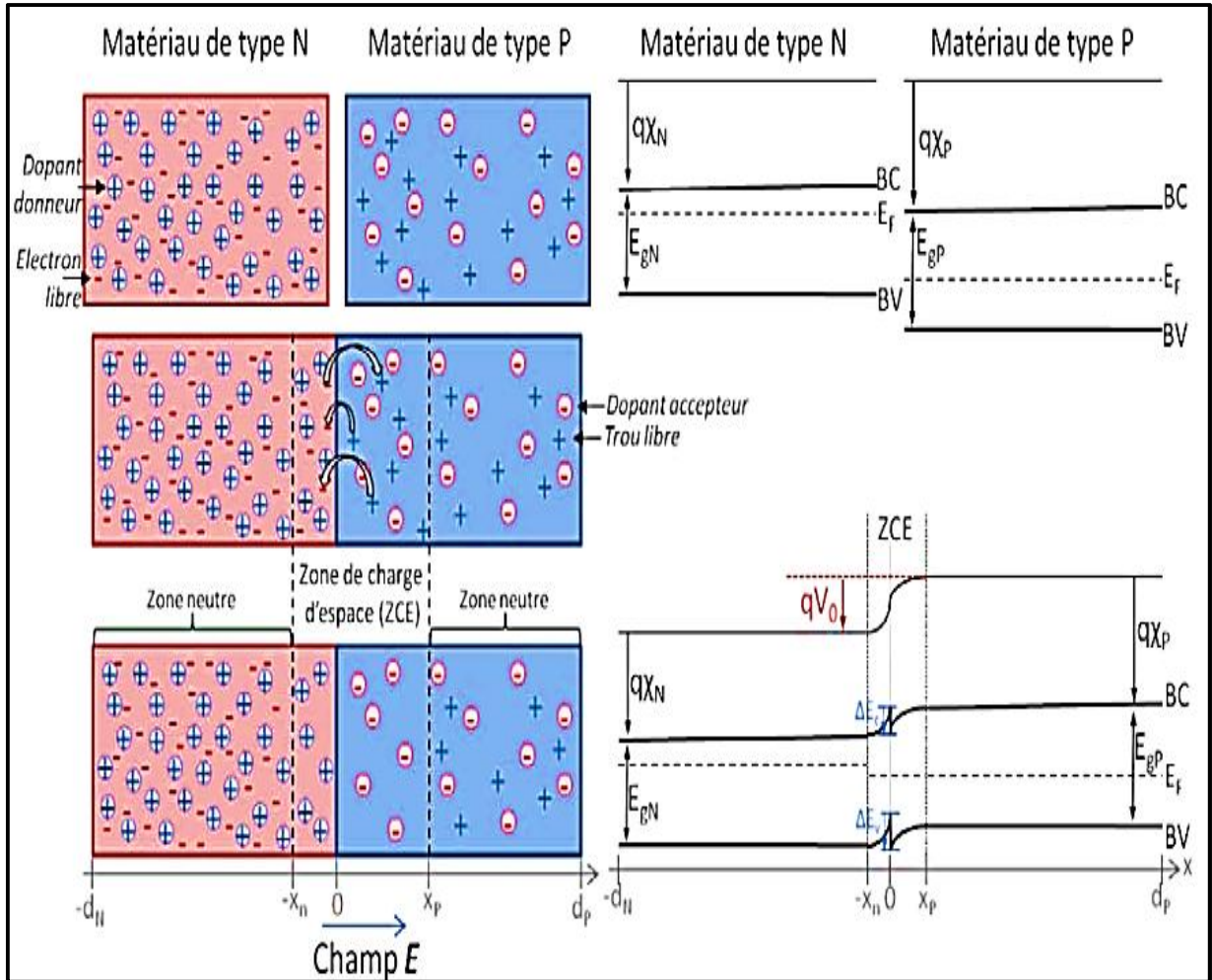


Figure 2.1 : Création et diagramme de bande d'une jonction PN.

Les matériaux N et P sont des matériaux dopés, ils possèdent un excès de porteurs libres, des électrons pour le matériau N et des trous pour le matériau P. Ces porteurs sont appelés majoritaires. A l'inverse, les trous dans le matériau N et les électrons dans le matériau P sont appelés les porteurs minoritaires. Les matériaux N et P sont électriquement neutres. Dans cet exemple, le matériau N est plus fortement dopé que le

matériau P. De plus, nous avons choisi un matériau P possédant une affinité électronique et un gap d'énergie plus grands que ceux du matériau N. Quand ces deux matériaux sont mis en contact les niveaux de Fermi s'équilibrent et les charges opposées s'attirent grâce au phénomène de diffusion (flèches dans la Figure 2.1).

Les électrons vont dans le matériau de type P (inversement, les trous vont dans le matériau de type N) et se recombinent avec un trou (électron). Les porteurs qui ont diffusé laissent donc des ions derrière eux qui ne sont plus compensés, des cations dans le type N et des anions dans le type P.

Ces ions créent un champ électrique qui s'oppose à la diffusion des porteurs. On atteindra alors un équilibre entre diffusion des porteurs libres et champ électrique décrivant une zone chargée électriquement, appelée zone de charge d'espace (ZCE) ou zone de déplétion. Sa largeur dépend du dopage et est délimitée dans le schéma par $-x_n$ et x_p . La chute de potentiel entre les matériaux N et P, (V_0) est appelée potentiel de diffusion. Du fait de la différence d'affinité électronique et de gap entre les deux matériaux, des discontinuités de bandes se créent à l'interface, ΔE_c et ΔE_v .

Ces dernières peuvent créer des barrières pour les porteurs et ainsi limiter les performances du composant.

a A l'équilibre thermodynamique

A l'équilibre thermodynamique, l'agitation thermique permet à des électrons de la bande de valence de passer dans la bande de conduction en laissant un trou dans la bande de valence. Le potentiel de diffusion de la jonction PN, (V_0) est défini par :

$$V_0 = V_n - V_p = \left(\frac{KT}{q}\right) \log\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (2.2)$$

La largeur de la zone de charge d'espace à l'équilibre (W) égale à : $W = x_n + x_p$, peut être définie par :

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon}{q}\right) V_0 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.3)$$

Avec :

V_n et V_p : les potentiels dans les matériaux N et P, respectivement

K : la constante de Boltzmann

T : la température

n_i : la concentration de porteurs libres intrinsèques

$$n_i = \sqrt{n_0 p_0} \quad (2.4)$$

N_d : la concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N

N_a : la concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P

q : la charge élémentaire

b Hors équilibre thermodynamique

On s'éloigne de l'équilibre thermodynamique lorsque la jonction est éclairée, ou lorsque l'on y applique une polarisation. L'équilibre entre les courants de diffusion et inverse est modifié.

Pour une excitation lumineuse, la tension d'excitation est appelée tension de circuit ouvert V_{co} .

Dans le cas d'une polarisation directe V_D aux bornes de la jonction, la barrière de potentiel qV_0 diminue. En conséquence, le courant des porteurs majoritaires augmente et l'intensité du champ électrique interne diminue. On a alors injection de porteurs

minoritaires dans les zones neutres, des électrons dans le matériau P et des trous dans le matériau N.

Les densités des porteurs minoritaires aux extrémités de la ZCE peuvent se déduire à partir du potentiel :

$$V_{\text{tot}} = V_0 - V = \left(\frac{KT}{q}\right) \log\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) - V \quad (2.5)$$

La largeur de la zone de charge d'espace sous polarisation (V) s'écrit alors :

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon}{q}\right) (V_0 - V) \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.6)$$

Avec :

V_0 : le potentiel de diffusion

V : le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction

V_n et V_p : les potentiels des matériaux N et P, respectivement

2.3 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

2.3.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

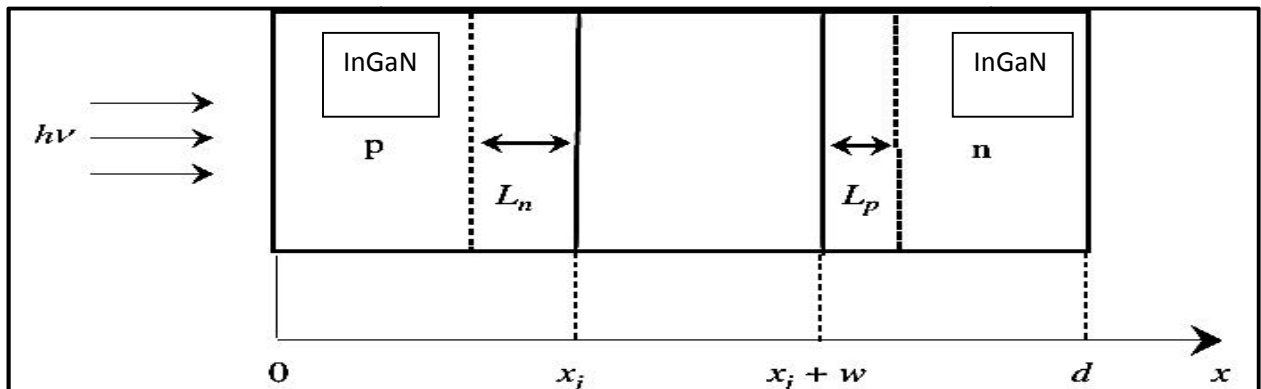


Figure 2.2 : Structure d'une jonction InGaN éclairée.

Lorsque la lumière entre par le côté de l'émetteur (Figure 2.2), un nombre d'électrons et de trous sont générés à une distance (x), avec un taux de génération qui s'écrit par la loi suivante :

$$G = \alpha F(1 - R)e^{-\alpha x} \quad (2.7)$$

Avec :

α : coefficient d'absorption de la lumière

R : coefficient de réflexion de la lumière sur la surface

F : Flux des photons incidents

Le photo-courant résultant dans la jonction P-N est l'intégrale de la somme de trois composantes (J_n , J_p , J_d) sur toutes les longueurs d'ondes.

Le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type p (J_p), le courant de photogénération dans la zone de charge d'espace (J_d) et le courant de diffusion des phototrous de la région de type n (J_n).

La densité de courant d'électrons dans l'émetteur est donnée par :

$$J_n = qF(1 - R) \cdot \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1} \cdot \left[\frac{\left(\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} + \alpha L_n \right)}{\left[\left(\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \right) \cdot \sinh \cdot \frac{x_j}{L_n} \right] + \cosh \cdot \frac{x_j}{L_n}} \right] - \left[\alpha L_n + \frac{\left[\left(\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \cdot \cosh \cdot \frac{x_j}{L_n} + \sinh \cdot \frac{x_j}{L_n} \right) \right]}{\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \cdot \left(\sinh \cdot \frac{x_j}{L_n} \right) + \cosh \cdot \frac{x_j}{L_n}} \right] \cdot e^{-\alpha x_j} \quad (2.8)$$

La densité courant de trous est donnée par :

$$J_p = \left[\alpha L_p - \frac{\left[\left(\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \cosh \cdot \frac{d}{L_p} + \sinh \cdot \frac{d}{L_p} \right) \right]}{\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \left(\sinh \cdot \frac{d}{L_p} \right) + \cosh \cdot \frac{d}{L_p}} \right] \cdot \left[\frac{\left(\frac{-S_p \cdot L_p}{D_n} + \alpha L_p \right) \cdot e^{\alpha d}}{\left[\left(\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \right) \cdot \sinh \cdot \frac{d}{L_p} \right] + \cosh \cdot \frac{d}{L_p}} \right] \cdot e^{-\alpha(x_j+w)} \cdot qF(1-R) \cdot \frac{\alpha L_p}{(\alpha L_p)^2 - 1} \quad (2.9)$$

Etant donné que le champ électrique dans la région de charge d'espace est élevé, les électrons et les trous générés dans ces régions sont accélérés vers les directions opposées. La densité de courant photoélectrique dans la région de charge d'espace est donnée par :

$$J_d = qF(1-R)(e^{-\alpha x_j} - e^{-\alpha(x_j+W)}) \quad (2.10)$$

Le photo-courant J_{ph} est calculé en intégrant sur l'ensemble du spectre solaire, de sorte que :

$$J_{ph} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (J_n + J_p + J_d) d\lambda \quad (2.11)$$

La densité de courant totale est donnée par :

$$J_{tot} = J_{ph} - J_{obs} \quad (2.12)$$

Avec J_{obs} : courant d'obscurité donné par :

$$J_{obs} = J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.13)$$

J_0 : courant de saturation

Avec :

S_n : la vitesse de recombinaison de surface des électrons en excès à la surface

$$\text{avant, avec :} \quad S_n = 70 \left(\frac{N_d}{7 \times 10^{17}} \right) \quad (2.14)$$

S_p : la vitesse de recombinaison de surface des trous en excès à la surface

arrière, avec :
$$S_p = 70 \left(\frac{N_a}{7 \times 10^{17}} \right) \quad (2.15)$$

L_n : Longueur de diffusion des électrons dans le matériau P, avec :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (2.16)$$

L_p : Longueur de diffusion des trous dans le matériau N, avec :

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.17)$$

τ_n et τ_p : les durées de vie des porteurs minoritaires pour les électrons et les trous, respectivement

D_n : le coefficient de diffusion des électrons

D_p : le coefficient de diffusion des trous

λ_{\min} : la longueur d'onde la plus petite

λ_{\max} : la longueur d'onde la plus grande

Le courant de court-circuit est le courant délivré par la cellule solaire pour une tension nulle :

$$J_{cc} = J_{\text{tot}}(0) \quad (2.18)$$

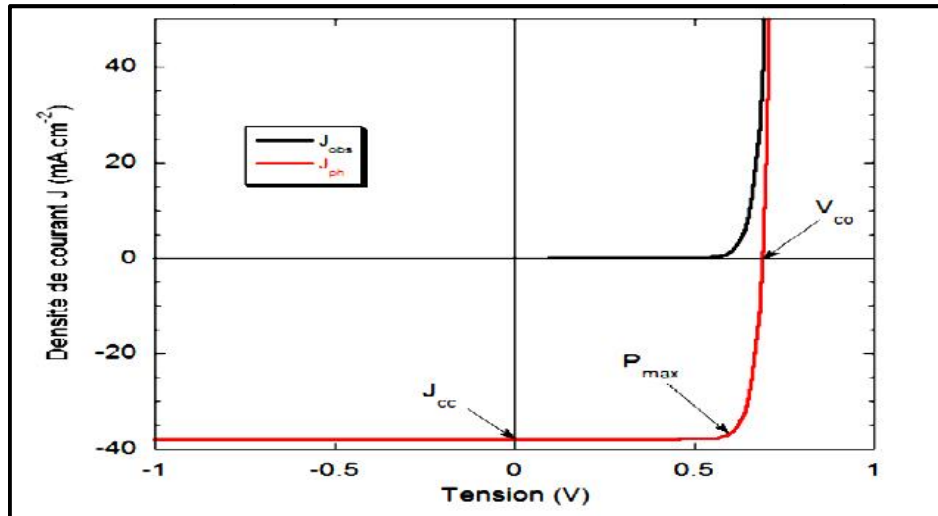


Figure 2.3 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque à l'obscurité (noir) et sous éclairement AM1.5 (rouge).

La figure 2.3 montre la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement, on distingue le courant de court-circuit pour une tension nulle, ainsi que la tension de circuit ouvert pour un courant nul.

2.3.2 Tension de circuit ouvert

La tension de circuit-ouvert de la cellule est la tension à ses bornes lorsque le courant est nul. La tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right) \quad (2.19)$$

Avec :

J_0 représente le courant de saturation

$$J_0 = q n i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) \quad (2.20)$$

2.3.3 La puissance maximale P_m

Suivant la formule $P = VI$, pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit VI est maximal : c'est le point de charge idéal de la cellule, ou point de puissance maximale P_m (figure 2.4), elle est donnée par la relation suivante :

$$P_m = I_m V_m \quad (2.21)$$

Avec :

I_m : C'est le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

V_m : C'est la tension correspondante à la puissance maximale fournie.

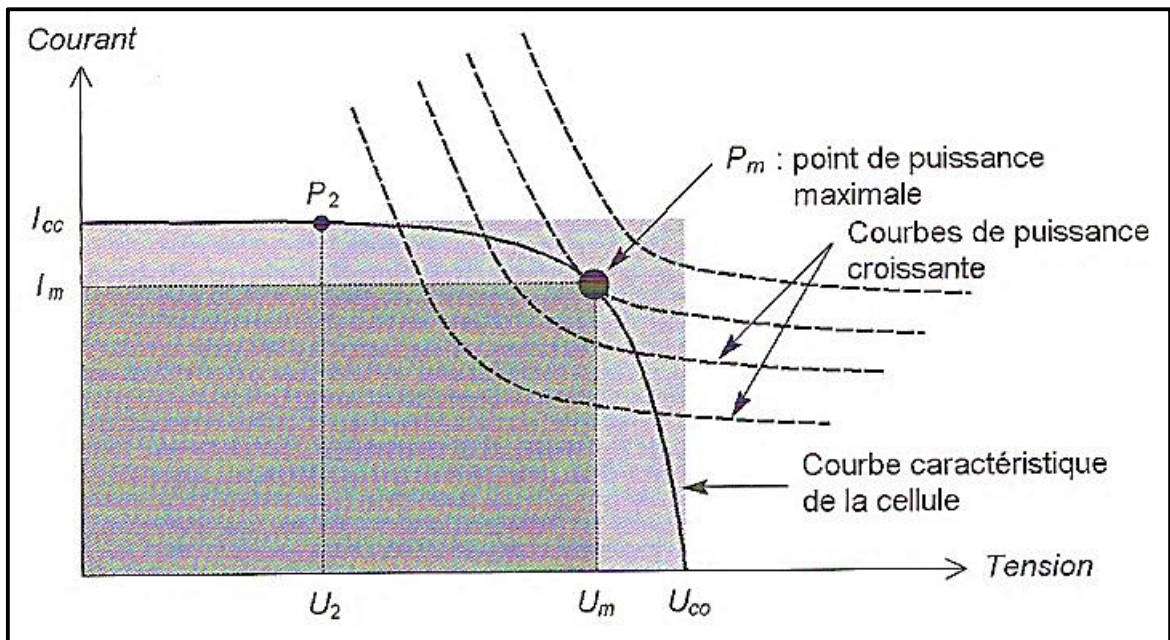


Figure 2.4 : Courbe I-V d'une cellule solaire.

Le point de fonctionnement optimum d'une cellule solaire est donc en Pmax, où le produit I.V est maximum. Sous un spectre AM1.5 à 25°C, cette puissance maximale est aussi appelée puissance crête et sert de référence pour comparer différentes cellules.

2.3.4 Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée $V_m I_m$ et la puissance idéale $V_{CO} I_{CC}$, on le note :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{CO} I_{CC}} \quad (2.22)$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

Si on obtient une forme plutôt carrée, le facteur de forme sera élevé. Si au contraire, on a plutôt une forme triangulaire (Figure 2.5), le facteur de forme sera petit et le rendement sera donc faible. Physiquement, ce paramètre rend compte des pertes, notamment du coefficient d'idéalité et des résistances série et parallèle.

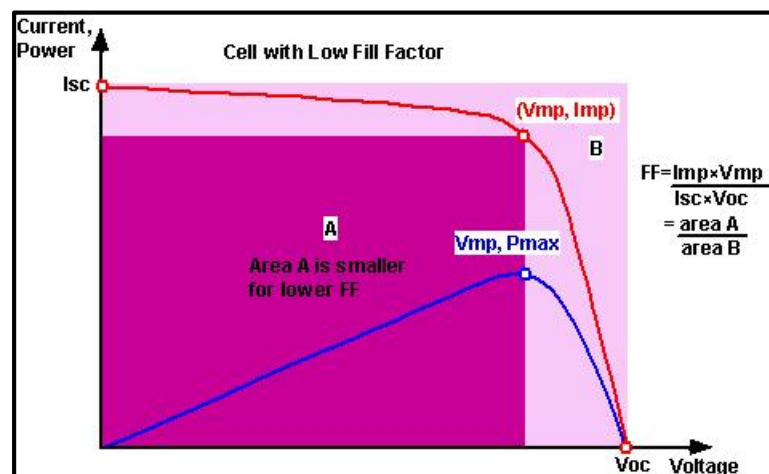


Figure 2.5 : Le facteur de forme dans la courbe I-V [19].

Les performances des cellules photovoltaïques sont déterminées à partir de leur caractéristique courant-tension sous l'éclairement AM1.5 et dépendent fortement de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit, mais aussi du facteur de forme (FF). Le facteur de forme d'une cellule idéale vaut 100 %, alors qu'en réalité les valeurs obtenues pour les meilleures cellules sont de l'ordre de 82 %. On s'éloigne du cas idéal lorsque la résistance série est trop élevée, ou encore quand la résistance parallèle est faible.

2.3.5 Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_o .

Le rendement est donné par l'équation ci-dessous :

$$\eta = \frac{U_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{CO} I_{CC}}{P_i S} \quad (2.23)$$

Avec :

P_i : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface

S : La surface de la cellule PV

FF : Facteur de Forme.

L'efficacité de la cellule solaire est déterminée comme étant la fraction de la puissance incidente, qui est convertie en électricité est définie dans la figure 2-6.

Le rendement est lié de manière indirecte avec le gap d'énergie, selon les matériaux utilisés et les applications souhaitées, les matériaux à semi-conducteurs couvrent une large bande de gap d'énergie qui permet de couvrir toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire.

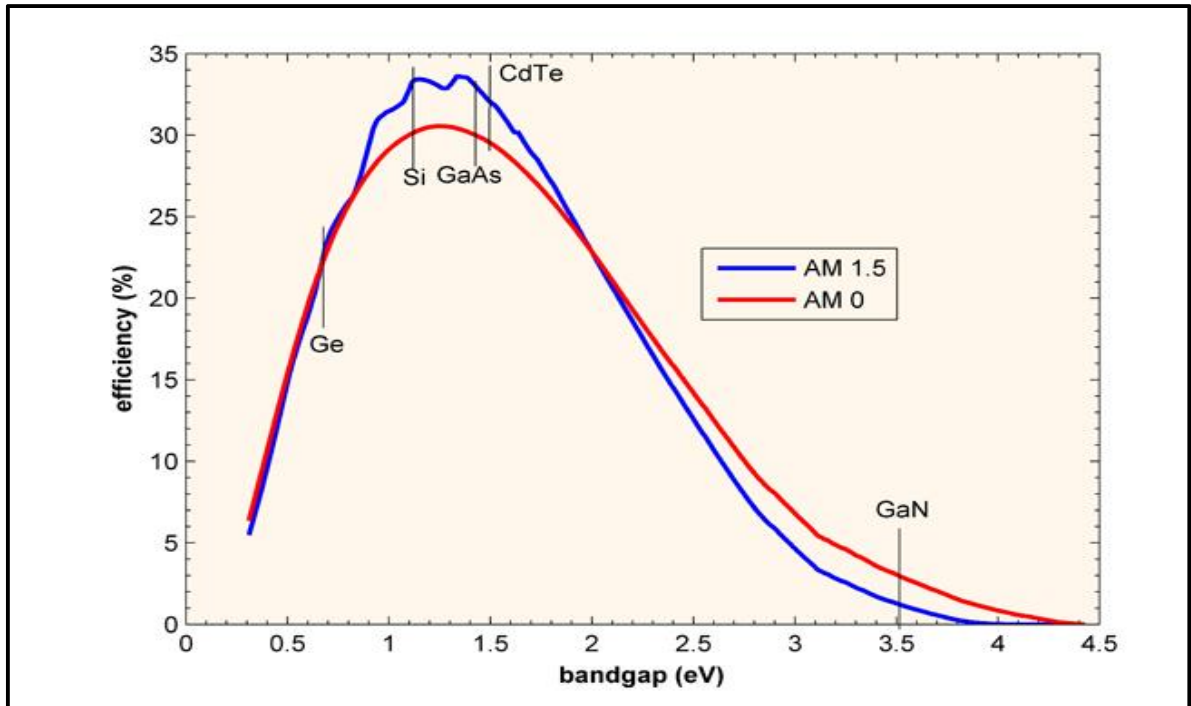


Figure 2.6 : Le rendement en fonction du gap d'énergie [20].

Pour obtenir une cellule photovoltaïque avec un rendement élevé, il faut donc optimiser l'absorption de la lumière par rapport au spectre incident et le transport des porteurs de charge au sein des matériaux constitutifs. Un autre moyen d'augmenter le rendement d'une cellule sans en modifier la composition consiste à concentrer le flux lumineux incident.

2.4 Rendement théorique maximum

Le rendement théorique maximum est déterminé à partir du spectre solaire et du calcul du courant d'une cellule idéale en tenant compte des pertes dues, d'une part à l'absorption incomplète des photons dans l'infrarouge (due au gap d'énergie), et d'autre part à l'excès d'énergie des photons dans l'ultraviolet (thermalisation).

Le premier élément pour obtenir le rendement maximum d'une cellule photovoltaïque est le choix d'un matériau adapté au rayonnement incident. Nous avons vu que le maximum d'énergie solaire se situe entre 500 et 700 nm (entre 2,5 et 1,5 eV). Il faut donc utiliser un semiconducteur possédant un gap d'énergie proche de cette gamme d'énergie. La Figure 2.7 présente le spectre solaire AM1.5 et les gaps d'énergie des principaux semi-conducteurs, ainsi que le recouvrement du spectre solaire par l'InGaN. On rappelle que les semi-conducteurs peuvent absorber une partie de l'énergie au-dessus de leur gap (longueurs d'onde plus petites). Toutefois, une partie de cette énergie est perdue en chaleur. D'après cette figure, on observe que l'alliage CIGS, le silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H), le CdTe et l'GaAs possèdent des gaps d'énergie intéressants pour la conversion photovoltaïque en utilisant une simple jonction. Pour l'application de multi-jonctions, l'InGaN est le matériau qui possède la plus large gamme spectrale.

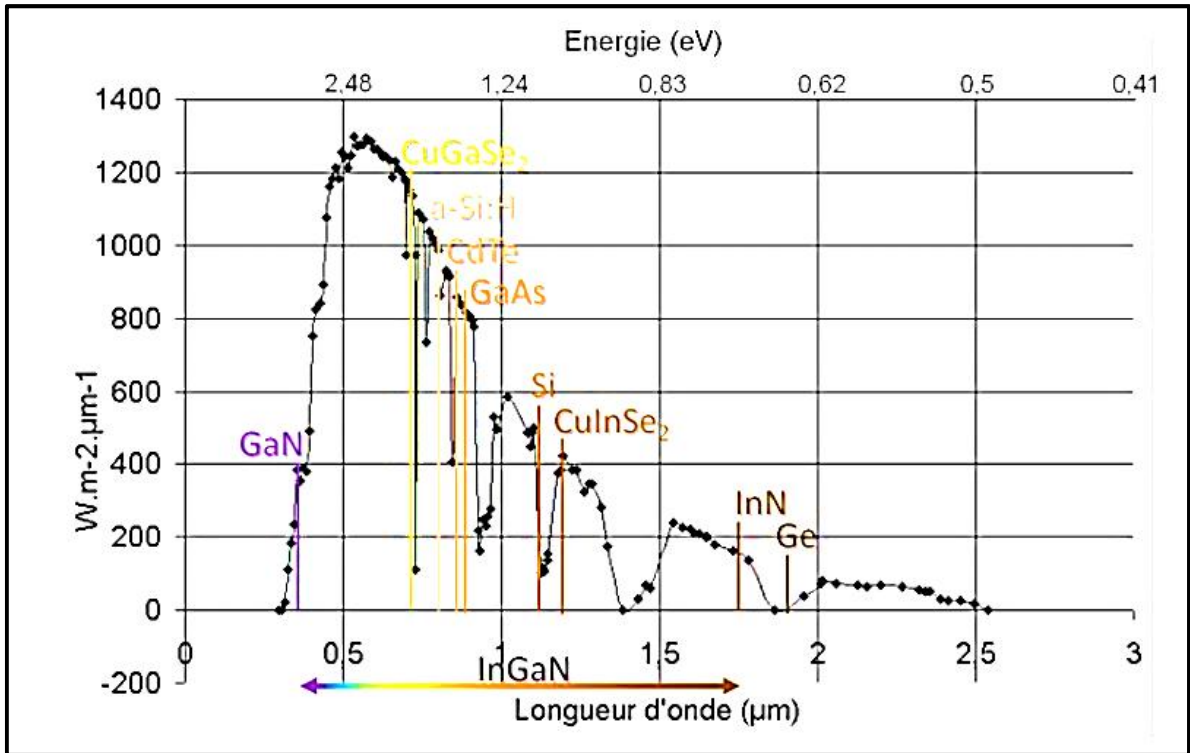


Figure 2.7 : Spectre solaire AM1.5 et gap d'énergie des principaux semi-conducteurs. La double flèche en bas du graphique montre le recouvrement du spectre solaire par le gap de l'InGaN [21].

2.5 Facteurs limitant le rendement

Les différents facteurs de pertes, sont dus soit aux bornes purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Des choix de technologies appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur la limitation intrinsèque du matériau [22].

2.5.1 Pertes physiques

Les photons qui possèdent une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ($\lambda_{ph} > \lambda_{Eg}$), ne peuvent pas générer des paires électrons-trous et sont donc perdus.

Les photons d'énergie supérieure au gap, ne peuvent générer qu'une seule paire électron-trou, l'excès d'énergie supérieure à la largeur de la bande interdite, est dissipé sous forme de chaleur (thermalisation).

Le facteur de tension ($\frac{qV_{oc}}{E_g}$) est le rapport de l'énergie maximale développée par la cellule par l'énergie de gap. La tension aux bornes de la cellule n'est qu'une fraction de l'énergie de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction.

Le facteur de forme, ne peut dépasser 0,86, car les courbes courant-tension sont générées par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle ($\exp(qV/kT)$), donc il n'existe pas des courbes $I(V)$ de forme rectangulaire, même dans le cas d'une cellule idéale. Ce paramètre dépend également de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction des matériaux utilisés, de la résistivité des contacts métalliques, etc.

Ces facteurs physiques étant considérés comme limitatifs pour une structure donnée de cellule photovoltaïque, les facteurs technologiques sont les seuls acteurs qui peuvent améliorer le rendement de la cellule.

2.5.2 Pertes technologiques

Le rendement de la cellule photovoltaïque dépend à la base du nombre de photons incidents. Cette quantité d'énergie est limitée par le coefficient de réflexion de la surface de la cellule R , qui pondère toutes les équations de photocourant de génération par un facteur $(1 - R)$, le coefficient de réflexion peut être optimisé par la mise en œuvre des traitements de surface appropriés et de couche antireflet.

Les contacts métalliques présents sur la face avant de la cellule afin de collecter les porteurs, entraînent des pertes de puissance car ils couvrent des parties de la surface réceptrice de la cellule (effet d'ombre). La largeur de métal, engendre un compromis

entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur et les pertes de facteur de forme FF provoquées par la résistance série (liée à la largeur de la métallisation).

Il y a des photons, ayant l'énergie nécessaire pour créer une paire électron-trou, mais traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés. Ce nombre de photons devient important surtout dans les cellules minces d'épaisseur ($< 100 \mu\text{m}$). Ce phénomène réduit le rendement d'absorption, et peut être diminué en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (appelé réflecteur arrière ou miroir arrière « BSR »).

Le rendement de collecte, c'est le rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés, et le nombre des porteurs photogénérés. En effet, certains porteurs se recombinent à la surface ou dans le volume de la cellule photovoltaïque. Ce phénomène est lié directement à la durée de vie τ des porteurs minoritaires (le temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur minoritaire). Egalement ; il est possible d'améliorer la collecte par l'utilisation (diffusion) d'un champ arrière P^+ dans le cas de la structure NP (BSF).

Ces phénomènes peuvent être optimisés à l'aide des technologies de fabrication des cellules photovoltaïques [22].

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la physique fondamentale et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Aussi on a déduit les caractéristiques principales ainsi que les paramètres essentiels (I_{cc} , V_{co} , FF , P_m , η).

Enfin on a abordé les facteurs limitants le rendement de conversion et les pertes physiques et technologiques pour une cellule photovoltaïque.

3.1 Introduction

Le développement de la technologie des semi-conducteurs à base des matériaux III-V au cours de ces dernières années a révolutionné l'électronique et l'optoélectronique. Ce qui a abouti à l'apparition des structures à couches semi-conductrices très fines et de très bonne qualité (pureté) et à l'avènement de nouveaux produits (diode, transistor, circuit intégrés, diode laser à semi-conducteurs) ainsi que les nanostructures (puits, et boîtes quantiques).

La recherche sur les matériaux semi-conducteurs a commencé au début du 19^{ème} siècle. Au fil des années de nombreux semi-conducteurs ont été étudiés. Parmi les plus célèbres, nous trouvons le silicium (Si) et le germanium (Ge) de la colonne IV du tableau périodique. Ces deux semi-conducteurs sont composés d'atomes identiques, mais d'autres, comme le nitrure de gallium GaN (III-V) sont composés d'atomes d'éléments différents : Ga (III) et N (V). La composition de semi-conducteurs permet d'accéder à des propriétés électriques et optiques que n'ont pas les semi-conducteurs purs.

3.2 Description du nitrure de gallium-indium (InGaN)

Ce troisième chapitre présente le matériau de nitrure de gallium-indium (InGaN) qui est au centre de ce travail. Ce matériau est un semiconducteur faisant partie de la catégorie des nitrures-III c'est-à-dire, composé d'azote et d'éléments de la colonne III du tableau de Mendeleïev, à savoir le bore, l'aluminium, le gallium, l'indium et le thallium, voir le tableau 3.1. Le nitrure de gallium-indium est un alliage entre le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN). C'est pourquoi, nous allons principalement décrire dans ce chapitre les propriétés structurelles, électriques et optiques de ces deux alliages binaires, pour ensuite décrire les propriétés de l'InGaN qui en découlent.

Ces matériaux nitrures-III sont activement étudiés parce qu'ils représentent une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques : un large gap d'énergie interdite, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique qui les rendent très intéressants pour l'optoélectronique à haute température et grande puissance [23]. Dans les sections suivantes, nous présentons la structure cristalline du GaN, de l'InN et de l'InGaN, ainsi que leurs caractéristiques électriques et optiques.

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Tableau 3.1 : Tableau de Mendeleïev ou tableau périodique des éléments.

L'InGaN est composé des éléments de la colonne III et de l'azote N.

3.2.1 Caractéristiques structurales

Dans les conditions ambiantes, la structure des nitrures-III est la wurtzite, une structure hexagonale. Cette structure est définie par trois paramètres, la largeur d'un côté hexagonale a , la hauteur de la maille élémentaire c , et le paramètre interne u décrivant la séparation des sous-réseaux des anions (N^{3-}) et des cations (Ga^{+3}) selon l'axe c [24]. Ce dernier est défini comme étant la longueur de la liaison cation-anion divisée par c . Il est égal à 0,375 pour un cristal wurtzite idéal. Le tableau 3.2 présente ces paramètres pour le GaN et l'InN.

	a (Å)	c (Å)	u
GaN	3,189	5,185	0,377
InN	3,54	5,70	0,378

Tableau 3.2 : Paramètres structuraux a , c et u pour le GaN et l'InN [25].

A noter que ces valeurs sont celles des matériaux massifs et qu'elles peuvent différer pour des couches épitaxiées à cause, notamment, de contraintes, de défauts et d'impuretés.

La figure 3.1 illustre la structure wurtzite en prenant l'exemple du GaN selon les directions $[0001]$, $[11\bar{2}0]$, $[10\bar{1}0]$, où les grosses sphères représentent les atomes de gallium et les plus petites les atomes d'azote.

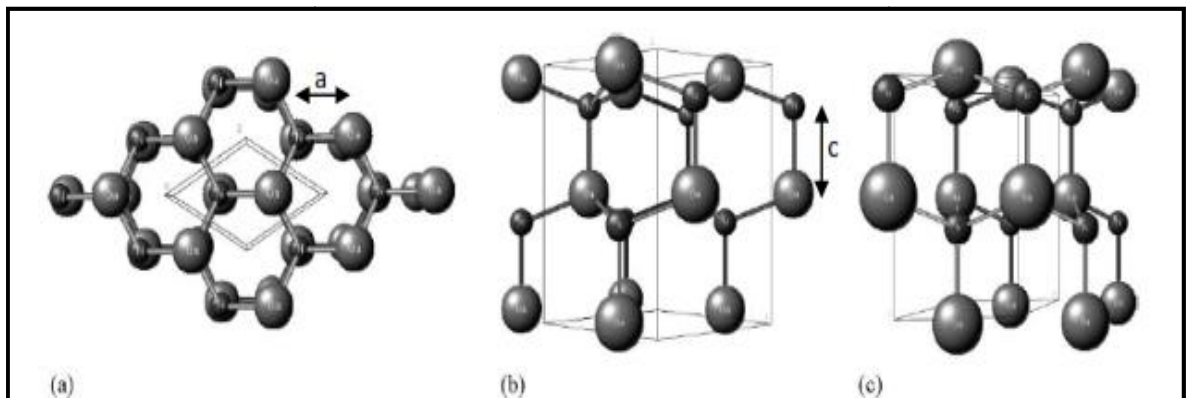


Figure 3.1 : Structure wurtzite selon plusieurs directions, exemple du GaN : (a) $[0001]$, (b) $[11\bar{2}0]$, (c) $[10\bar{1}0]$ [26].

Sous certaines conditions de pression et de température et sur un substrat cubique, il est possible de faire croître les nitrures-III en structure cubique, sous forme de zinc-blende.

La structure zinc-blende, en prenant l'exemple du GaN, est présentée dans la figure 3.2 selon différentes directions.

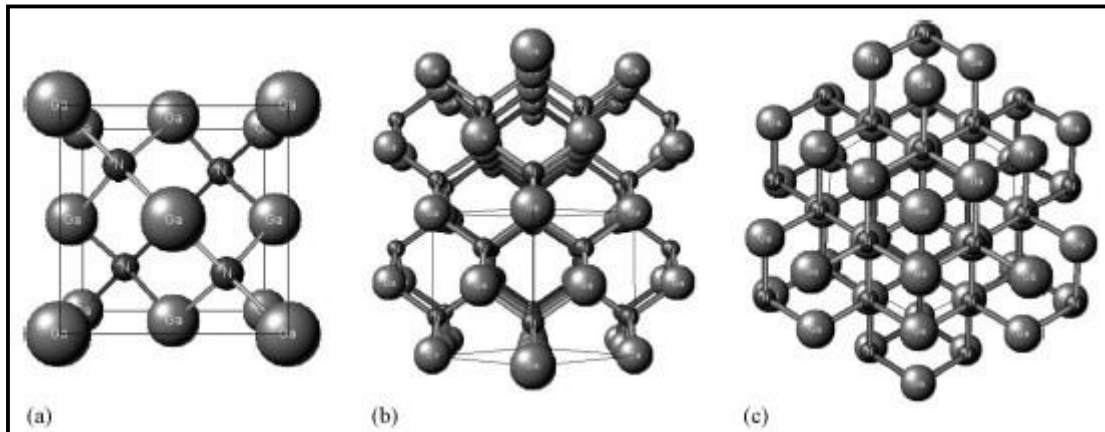


Figure 3.2 : Structure cubique zinc-blende selon différentes directions, exemple du GaN:(a) [100], (b) [110], (c) [111] [26].

Il existe théoriquement une troisième structure cristalline pour les nitrures-III, la structure cubique à face centrée (CFC) ou NaCl. Comme son nom l'indique, c'est une structure cubique, avec un atome à chaque sommet du cube, plus un atome au centre de chacune des 6 faces [25].

Pour résumer, les nitrures-III peuvent se présenter sous trois formes cristallines (wurtzite, zinc blende et NaCl), mais la plus stable est la wurtzite.

3.2.2 Propriétés électriques

Les bandes de valence et de conduction sont composées de niveaux énergétiques continus, on parle aussi d'états. Le nombre de ces niveaux n'est cependant pas constant à cause des différents niveaux électroniques des atomes. On parle alors de densité d'état. Ces dernières dépendent des caractéristiques du matériau et de la température. Pour la structure InGaN, la densité d'état aux bords des bandes de conduction et de valence (N_c) et (N_v) respectivement, est donnée par :

$$N_c = [0,9x + (1 - x) \times 2,3] \times 10^{18} \text{ [cm}^{-3}\text{]} \quad (3.1)$$

$$N_v = [5,3x + (1 - x) \times 1,8] \times 10^{19} \text{ [cm}^{-3}\text{]} \quad (3.2)$$

Avec :

x : concentration d'indium

a Gap d'énergie interdite dans les nitrures

La caractéristique principale pour laquelle les nitrures sont tant étudiés est leur gap d'énergie interdite direct, y compris à travers leurs alliages [27]. Ceci permet d'avoir de meilleurs rendements de conversion ou d'émission de lumière, pour le photovoltaïque ou pour les LEDs, par exemple. De plus, leurs alliages permettent de couvrir quasiment tout le spectre solaire, de l'infrarouge (IR) à l'ultraviolet (UV).

Le gap d'énergie interdite est de 3,39 eV (366 nm) pour le GaN et de 0,7 eV (1771 nm) pour l'InN à température ambiante (300 K) [28]. Le diagramme de bande du GaN est montré dans la Figure 3.3.

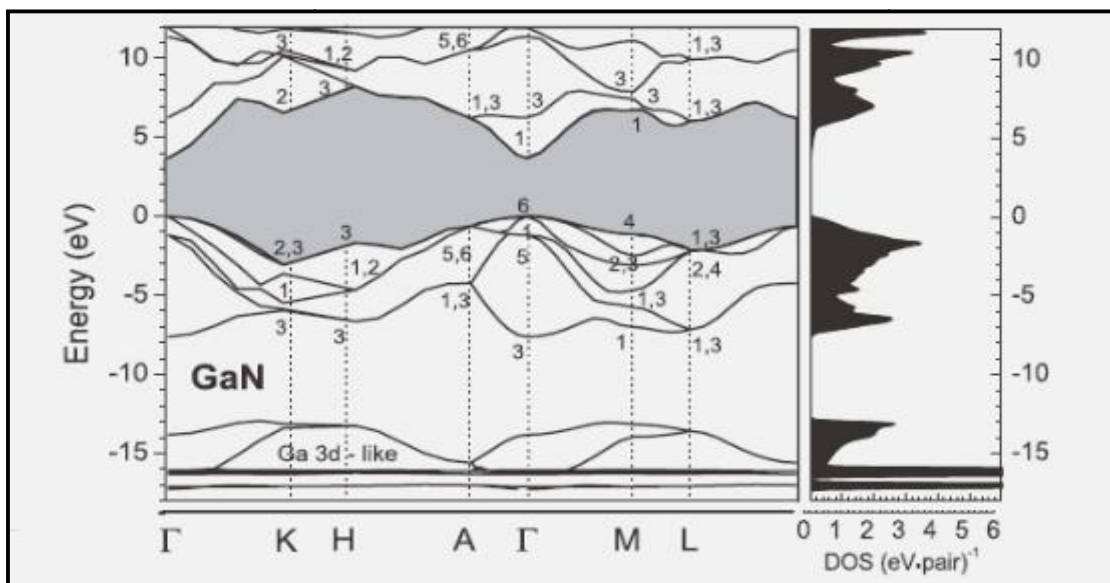


Figure 3.3 : Diagramme de bande du GaN [29].

Le GaN est un matériau à gap direct, le minimum de sa bande de conduction est donc aligné au maximum de sa bande de valence dans l'espace des vecteurs d'onde.

La Figure 3.4 présente le diagramme de bande de l'InN calculé avec la méthode empirique de pseudopotentiels. Comme pour le GaN, la bande de valence de l'InN est divisée en trois branches à cause des interactions spin-orbites et de la symétrie du cristal.

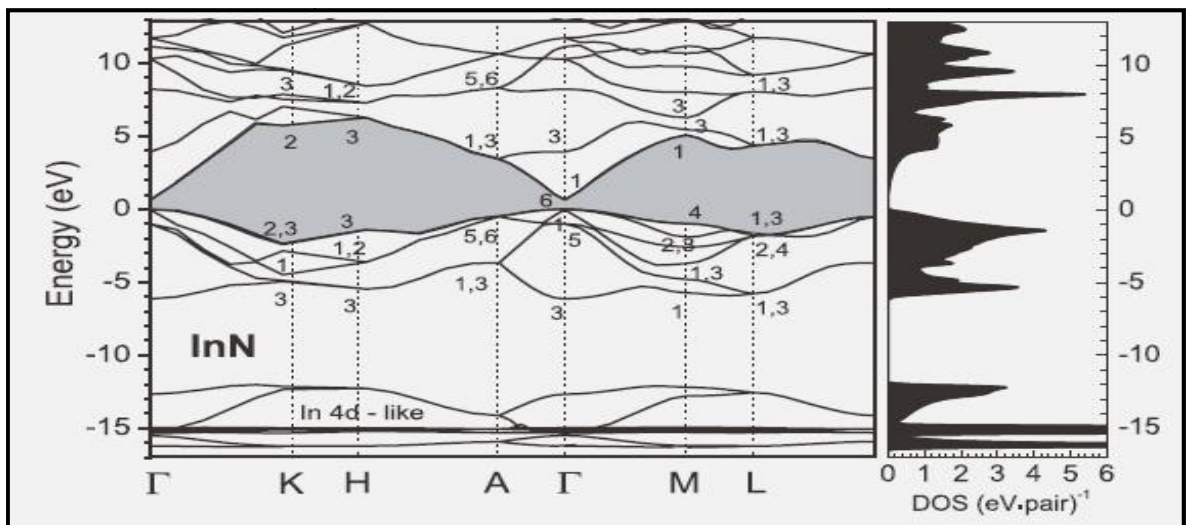


Figure 3.4 : Diagramme de bande de l'InN [29].

1 Evolution du gap d'énergie dans l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

A partir des gaps d'énergie interdite des composés binaires GaN et InN, il est possible de déterminer le gap d'énergie de l'InGaN en utilisant la loi de Vegard avec un paramètre de courbure. La loi de Vegard est une loi empirique indiquant que les valeurs des propriétés d'un alliage (gap d'énergie, paramètre de maille, constantes élastiques, etc.) peuvent être déterminées par une interpolation linéaire des valeurs des propriétés de ses composants [30]. Cependant, les valeurs mesurées peuvent dévier de l'interpolation linéaire à cause de la taille relative des constituants, du volume relatif par électron de valence, les effets de la zone de Brillouin, et des différences électrochimiques entre les éléments [31]. On doit alors introduire un

paramètre de courbure dans l'expression afin de suivre les données expérimentales. La loi de Vegard avec paramètre de courbure est définie par :

$$Eg(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = (1 - x) Eg(\text{GaN}) + xEg(\text{InN}) - bx(1 - x) \quad (3.3)$$

Avec :

x : la concentration d'indium dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

b : le paramètre de courbure

Eg(InGaN) : le gap d'énergie de l'InGaN

Eg(GaN) : le gap d'énergie du GaN

Eg(InN) : le gap d'énergie de l'InN

b Longueur de diffusion

La longueur de diffusion (L) est la distance moyenne sur laquelle les porteurs peuvent se déplacer par diffusion. Elle est définie par :

$$L = \sqrt{D \times \tau} \quad (3.4)$$

Avec :

τ : la durée de vie des porteurs

D : le coefficient de diffusion des porteurs, défini par :

$$D = \frac{kT}{q} \mu \quad (3.5)$$

Avec :

μ : la mobilité des porteurs

La longueur de diffusion est un paramètre à connaître lors de la conception d'un composant électronique, comme une cellule solaire. En effet, si les électrodes collectant le courant produit par la cellule sont éloignées d'une distance supérieure à la longueur de diffusion, alors les charges se recombineront avant d'être collectées.

c Mécanismes de recombinaison

Dans l'InN, les électrons et les trous photogénérés se recombinent principalement de trois manières : par l'intermédiaire de défauts de manière non-radiative, de manière radiative par des transitions interbandes, et par le phénomène de recombinaison Auger de manière non-radiative. Le taux de recombinaison total peut alors s'écrire :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{défaut}}} + \frac{1}{\tau_{\text{radiatif}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Auger}}} = \sigma \bar{v} N_{\text{défaut}} + B_{\text{radiatif}} n + B_{\text{Auger}} n^2 \quad (3.6)$$

Avec :

σ : la section efficace de capture

\bar{v} : la vitesse moyenne des porteurs libres

$N_{\text{défaut}}$: la densité de défauts

n : la densité d'électrons libres

B_{radiatif} et B_{Auger} : des constantes qui dépendent du matériau, respectivement

1 Recombinaisons Shockley-Read-Hall

Le mécanisme de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) se fait par l'intermédiaire d'un défaut dans le gap (défauts structuraux, impuretés, etc.) qui peut être un centre recombinant pour les porteurs libres. Selon le niveau énergétique introduit par le défaut dans le gap et la section efficace de capture de ce défaut, un type de porteur peut être plus facilement capturé qu'un autre. A noter que le phénomène inverse existe également où un trou ou un électron peuvent être émis. La Figure 3.5 présente ces phénomènes de recombinaison avec les coefficients d'émission et de capture des électrons et des trous. La probabilité d'occupation du défaut dépend du niveau de Fermi, E_F .

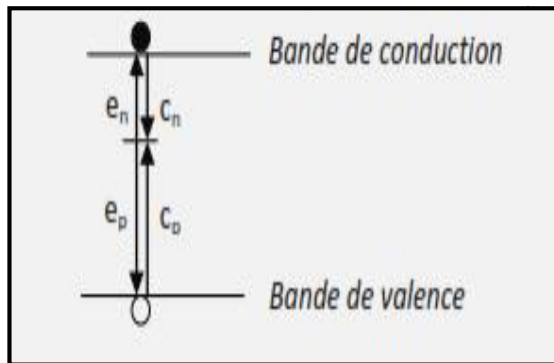


Figure 3.5 : Schéma de la recombinaison Shockley-Read-Hall avec les coefficients d'émission et de capture des électrons et des trous.

Ce type de recombinaison est très probable dans les matériaux possédant une forte densité de défauts, ce qui est le cas des nitrures.

2 Recombinaisons radiatives

La recombinaison radiative par transitions interbande, ou bande-à-bande, correspond à la transition d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence avec émission d'un photon, voir Figure 3.6. L'énergie du photon émis correspondra à l'énergie du gap d'énergie interdite du matériau.

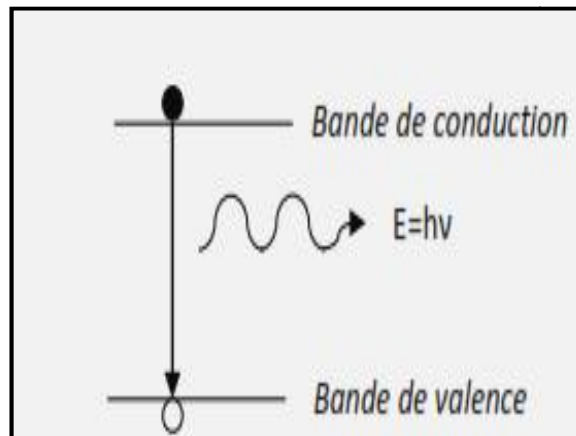


Figure 3.6 : Schéma de la recombinaison radiative.

Ce type de recombinaison est fréquent dans les matériaux à gap direct. A noter qu'il est à la base de la photoluminescence et des LEDs.

3 Recombinaisons Auger

Lors d'une recombinaison Auger, un électron et un trou se recombinent en transférant leur énergie cinétique à une autre charge libre (électron ou trou). La Figure 3.7 explique ce mécanisme de recombinaison dans le cas d'un transfert à un électron.

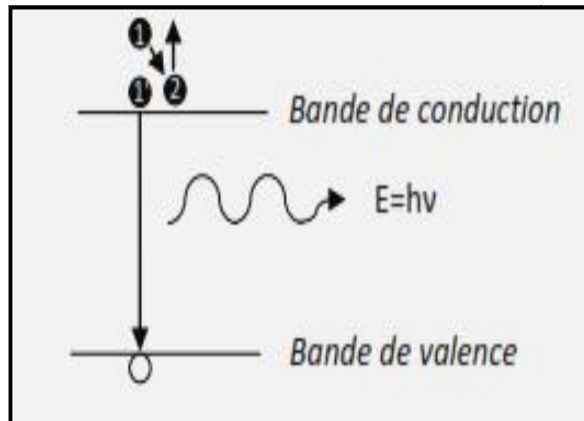


Figure 3.7 : Schéma de la recombinaison Auger.

- ❖ L'électron «1» transfère son énergie cinétique à l'électron «2», ce dernier a donc une énergie plus grande. L'électron «1» se trouve alors en position «1'» ou il va se recombiner avec un trou en émettant un photon d'énergie $h\nu$.

Ce type de recombinaison est peu probable dans les matériaux à grand gap tels que le GaN ou l'InGaN riche en gallium.

3.2.3 Propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant. Par exemple, dans un composant composé de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction. On peut alors confiner la lumière dans une couche particulière, comme dans les lasers. Cette propriété est aussi très intéressante pour les applications de cellules solaires afin d'augmenter les efficacités d'absorption de la lumière.

a Indice de réfraction

L'indice de réfraction d'un matériau est défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide (c) sur la vitesse de la lumière dans le matériau (v) par :

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.7)$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle change avec la longueur d'onde. L'indice de réfraction dans le cas du GaN, est égal à environ 2,3 [32]. Pour l'InN, il vaut environ 2,9 dans l'infrarouge [33].

L'indice de réfraction intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.8)$$

Avec :

n_1 et n_2 : les indices de réfractons de deux milieux

θ_1 et θ_2 : les angles des rayons lumineux par rapport à la normale

Voir Figure 3.8 :

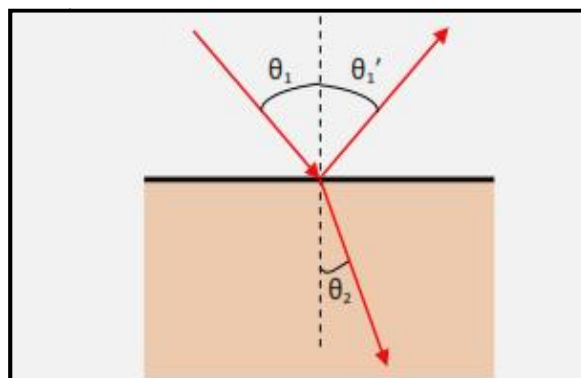


Figure 3.8 : Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptré plan.

- ❖ Le rayon incident arrive sur le dioptre avec un angle θ_1 par rapport à la normale. Une partie du rayon est réfléchié avec le même angle, appelé θ_1' , l'autre partie du rayon est transmise avec un angle θ_2 par rapport à la normale. Dans cet exemple, on a pris $n_1 < n_2$, donc $\theta_1 > \theta_2$.

Le coefficient de réflexion (R) est défini comme le rapport de l'intensité réfléchié (I_r) sur l'intensité incidente (I_i) :

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (3.9)$$

On a alors :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (3.10)$$

Avec :

n_1 : indice de réfraction de l'air ($n_1 = 1$)

n_2 : indice de réfraction du matériau $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

La loi de l'indice de réfraction du matériau $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ est donnée par :

$$n_2(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xn(\text{InN}) + (1-x)n(\text{GaN}) - bx(1-x) \quad (3.11)$$

b Absorption

Seule la lumière absorbée est restituée sous forme d'énergie électrique. Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau [34].

1 Etudes du coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption (α), est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par un matériau.

Les électrons dans la bande de valence d'un semi-conducteur peuvent absorber des photons dont l'énergie est plus grande que l'énergie de bande interdite (E_g), puis passer à la bande de conduction. Le coefficient d'absorption $\alpha(E)$, pour une énergie E supérieure à l'énergie de la bande interdite est donnée par :

$$\alpha = 2,2 \times 10^5 \sqrt{\left(\frac{1,24}{\lambda}\right) - E_g} \text{ [cm}^{-1}\text{]} \quad (3.12)$$

3.3 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les caractéristiques et les propriétés de l'InGaN tant sur le plan structurel, qu'électronique et optique. Nous avons montré ses propriétés (large gap direct selon toutes les compositions pouvant couvrir quasiment tout le spectre solaire).

4.1 Introduction

La simulation numérique est toujours utilisée pour l'optimisation des cellules solaires, et pour décrire le comportement des composants électroniques. Cette méthode nous permet de confronter les résultats avec l'expérience, de ce fait la simulation numérique est indispensable avant la réalisation des dispositifs. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques utilisant souvent la technique des éléments finis. Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé. Les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats des calculs par des images de synthèse. Dans notre travail, nous avons étudié et simulé la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ avec un gap variable entre 0,7 et 3,4 eV. Ce qui nous a permis de déterminer les paramètres qui optimisent cette structure illustrée dans la figure 4.1.

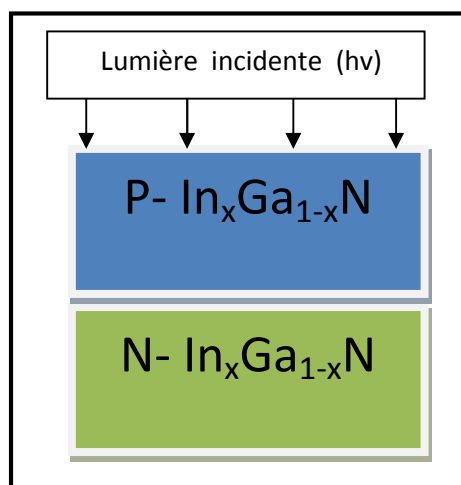


Figure 4.1 : Structure InGaN d'une cellule solaire uni-jonction.

4.2 Paramètres d'une cellule photovoltaïque à base de matériaux InGaN

4.2.1 Irradiation d'un corps noir

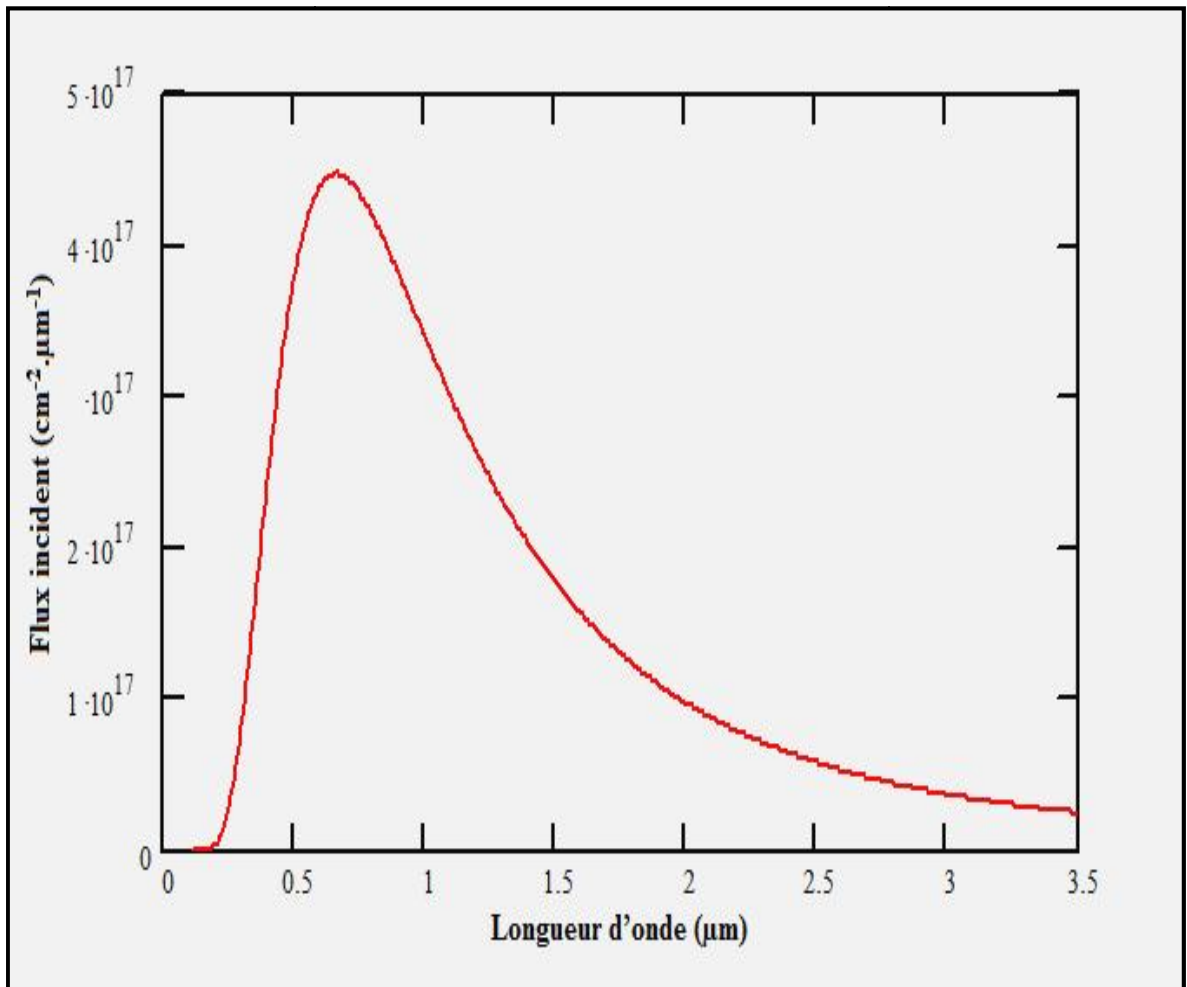


Figure 4.2 : Le Flux incident F en fonction de la longueur d'onde λ à $T = 6000$ K.

La figure 4.2 représente le flux d'un corps noir pour une température $T = 6000$ K. Ce flux varie avec la longueur d'onde λ et présente un maximum pour $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$.

Dans nos simulations nous avons utilisé l'irradiation d'un corps noir à $T = 6000$ K qui correspond à l'émission solaire hors atmosphère.

4.2.2 L'absorption

Sur la Figure 4.3, nous avons représenté la variation du coefficient d'absorption α en fonction de l'énergie des photons incidents pour différents valeurs de la concentration d'indium x . Le coefficient d'absorption augmente avec l'énergie de photon.

Pour une énergie de photon donnée, α augmente avec la concentration d'indium x (faibles gaps).

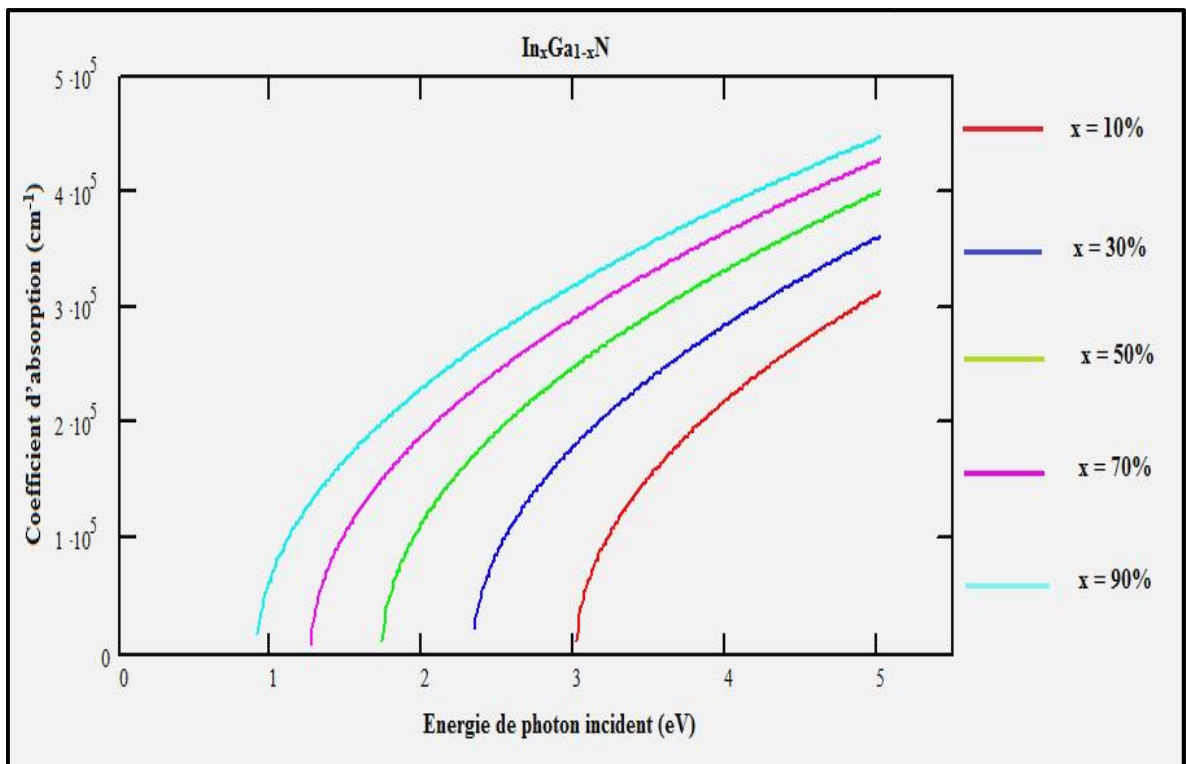


Figure 4.3 : Variation du coefficient d'absorption α en fonction de l'énergie de photon incident E .

4.2.3 L'énergie de la bande interdite (gap)

Sur la figure 4.4 est illustrée la variation du gap E_g en fonction de la concentration d'indium x . Le gap diminue avec la concentration x , et varie de 0,7 jusqu'à 3,4 eV.

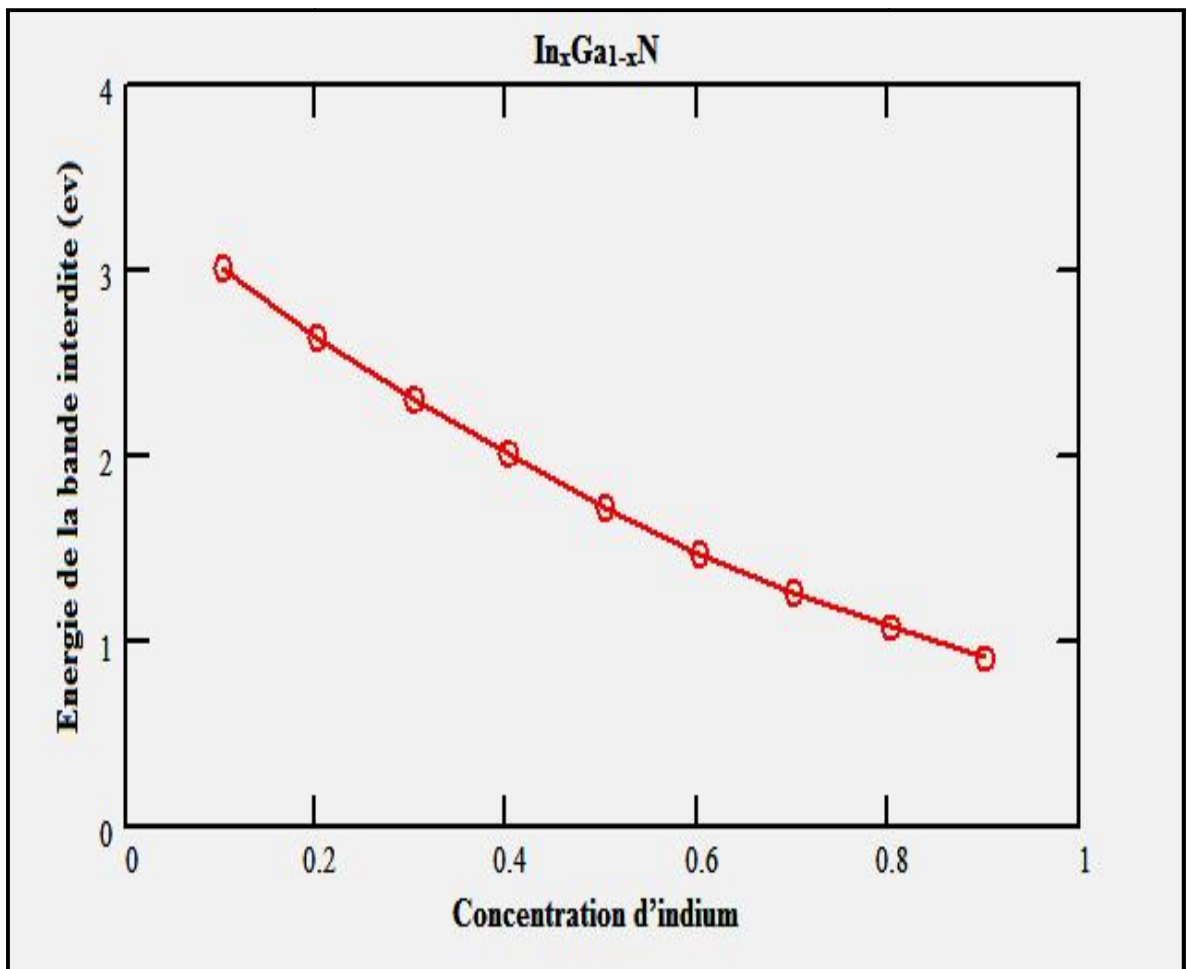


Figure 4.4 : Variation du gap d'énergie interdite en fonction de la concentration d'Indium.

4.2.4 Indice de réfraction

La figure 4.5 représente la variation de l'indice de réfraction n en fonction de la concentration x . Entre 0,1 et 0,4, n varie faiblement autour de 2,2 et croit de manière remarquable à partir d'une concentration d'indium de 40%, dans ce cas l'indice de réfraction peut atteindre des valeurs supérieures à 2,6.

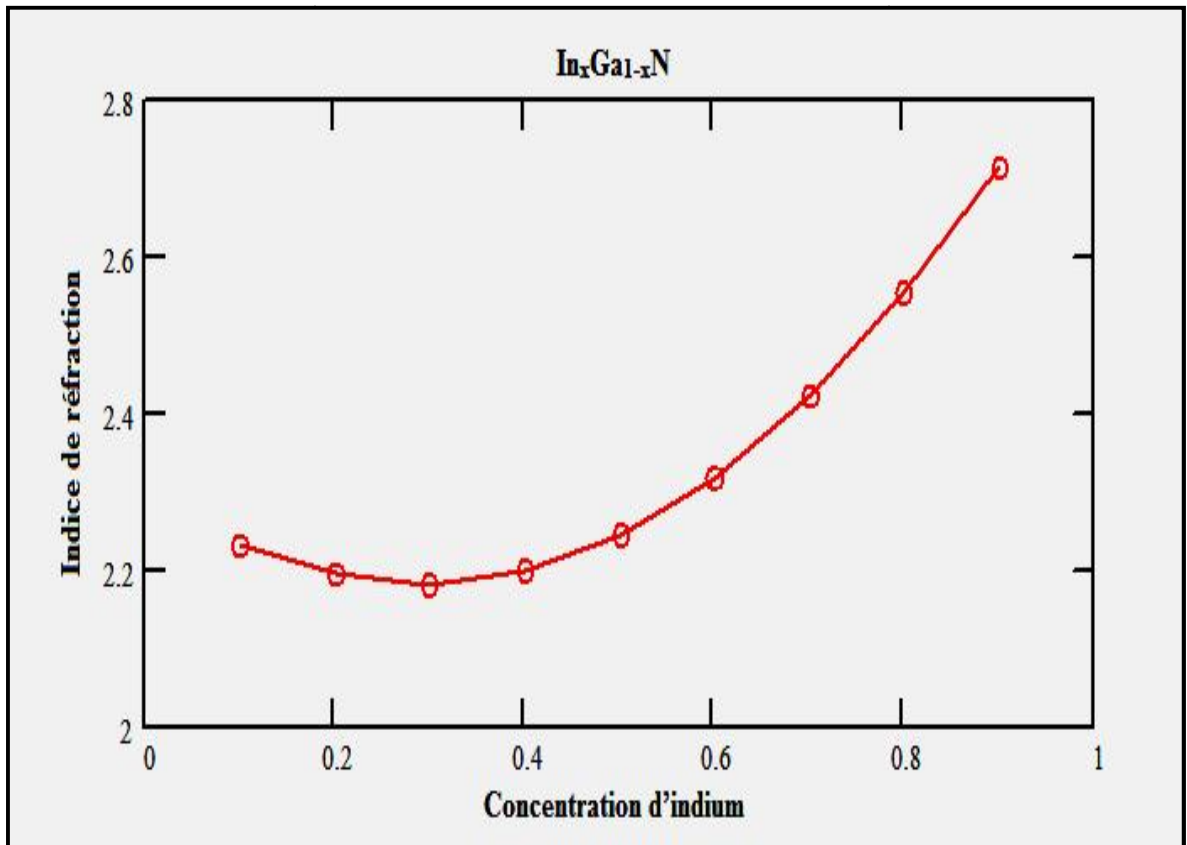


Figure 4.5 : Variation de l'indice de réfraction n en fonction de la concentration d'indium.

4.2.5 Coefficient de réflexion

La figure 4.6 présente la variation du coefficient de réflexion R en fonction de la concentration d'Indium x. Le coefficient de réflexion présente des valeurs faibles de l'ordre de 0,14 pour des concentrations d'indium autour de 0,2 à 0,3, ce qui permet d'avoir une meilleure absorption de la lumière.

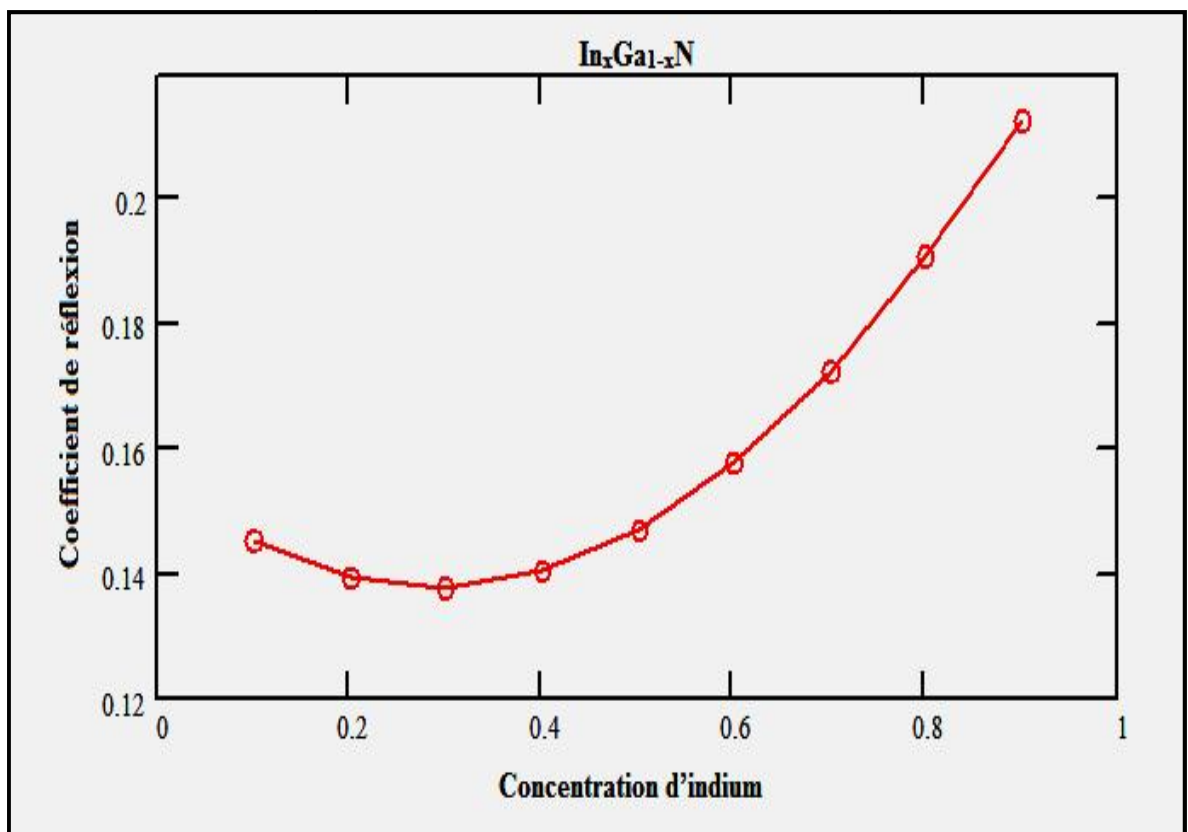


Figure 4.6 : Variation du coefficient de réflexion R en fonction de la concentration d'Indium x.

4.3 Paramètres électriques d'une structure InGaN ensoleillée

4.3.1 Caractéristiques courant-tension

Sur la figure 4.7 sont représentées les caractéristiques courant-tension pour différents concentrations d'indium x . On constate que le courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} varient en sens inverse, J_{cc} augmente avec la concentration d'indium x alors que V_{co} diminue avec x .

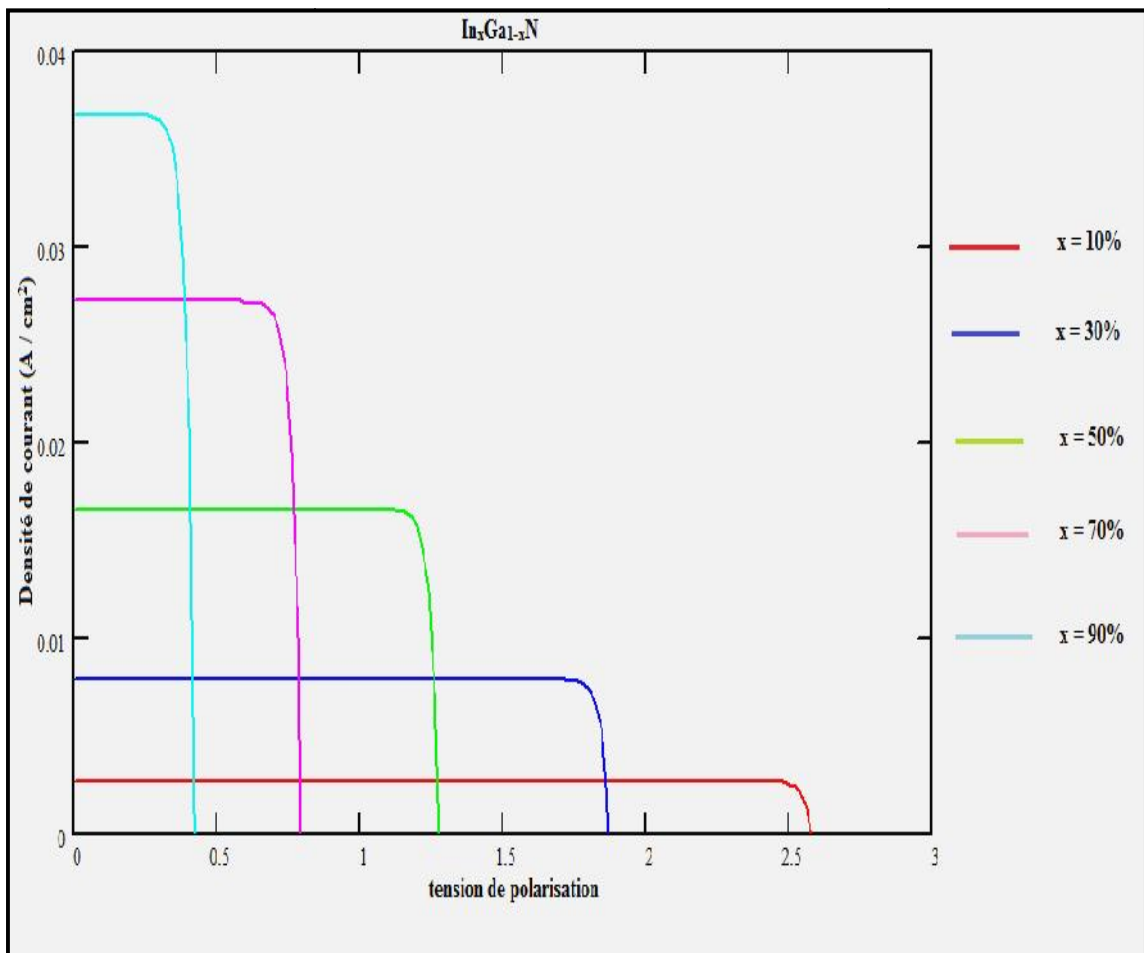


Figure 4.7 : Caractéristiques courant-tension de la structure $In_xGa_{1-x}N$ pour plusieurs concentrations d'indium avec : ($x_j = 10^{-6} cm$ et $N_a = N_d = 5. 10^{17} cm^{-3}$).

On constate que la concentration d'indium provoque un changement crucial dans les caractéristiques courant-tension. Pour des concentrations d'indium élevées, le courant augmente tangiblement, accompagné d'une chute de tension remarquable.

4.3.2 Courant de court-circuit

Dans notre simulation de la figure 4.8 nous avons fixé les densités d'accepteurs, les densités donneurs dans la jonction P-N à $N_a=N_d= 5. 10^{17}\text{cm}^{-3}$ respectivement, et pour une profondeur de jonction $x_j = 10^{-6}\text{cm}$.

Dans la structure InGaN le courant de court-circuit J_{cc} augmente avec la concentration d'indium, J_{cc} atteint des valeurs supérieures à $0,03 \text{ A/cm}^2$ pour des concentrations d'indium de 80-90 %.

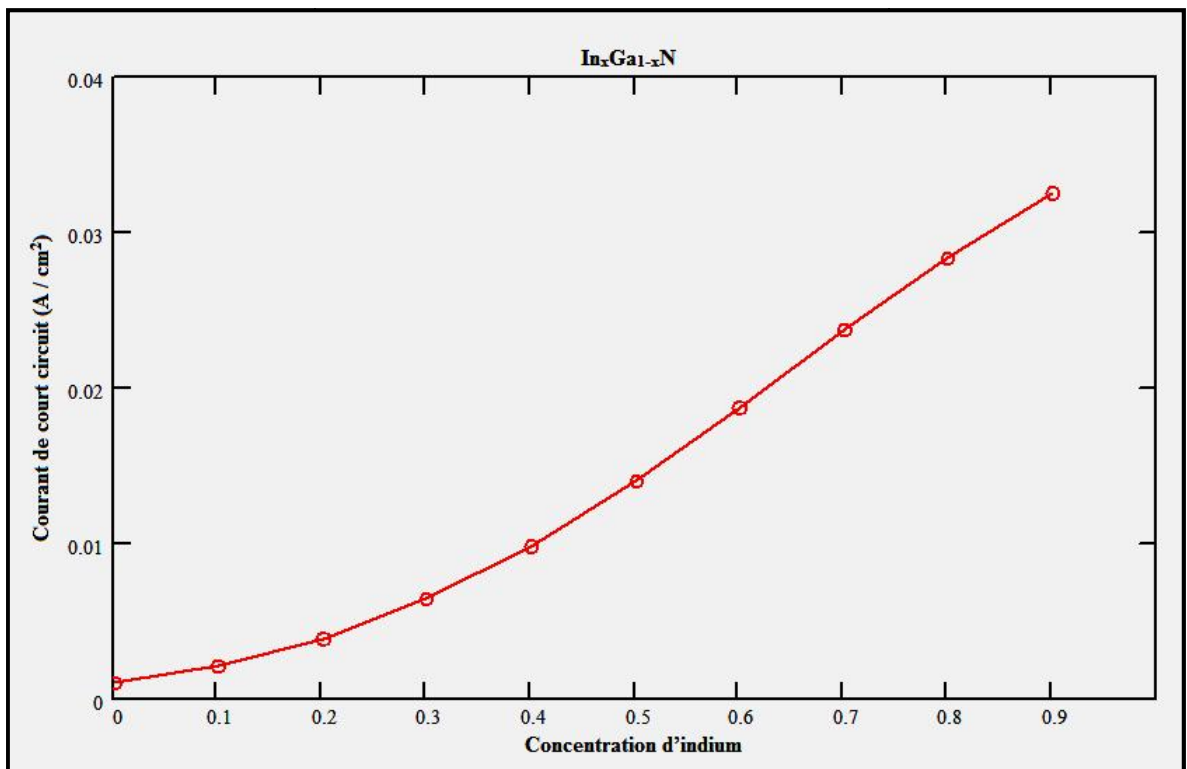


Figure 4.8 : Variation de courant court-circuit J_{cc} en fonction de la concentration d'indium x.

Avec l'augmentation d'indium dans la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, on observe une importante amélioration au niveau du courant de court-circuit, ce qui donne un large choix pour moduler les autres paramètres de notre cellule solaire.

4.3.3 Tension de circuit ouvert

La figure 4.9 représente la variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de la concentration d'indium x . La tension V_{co} diminue avec x .

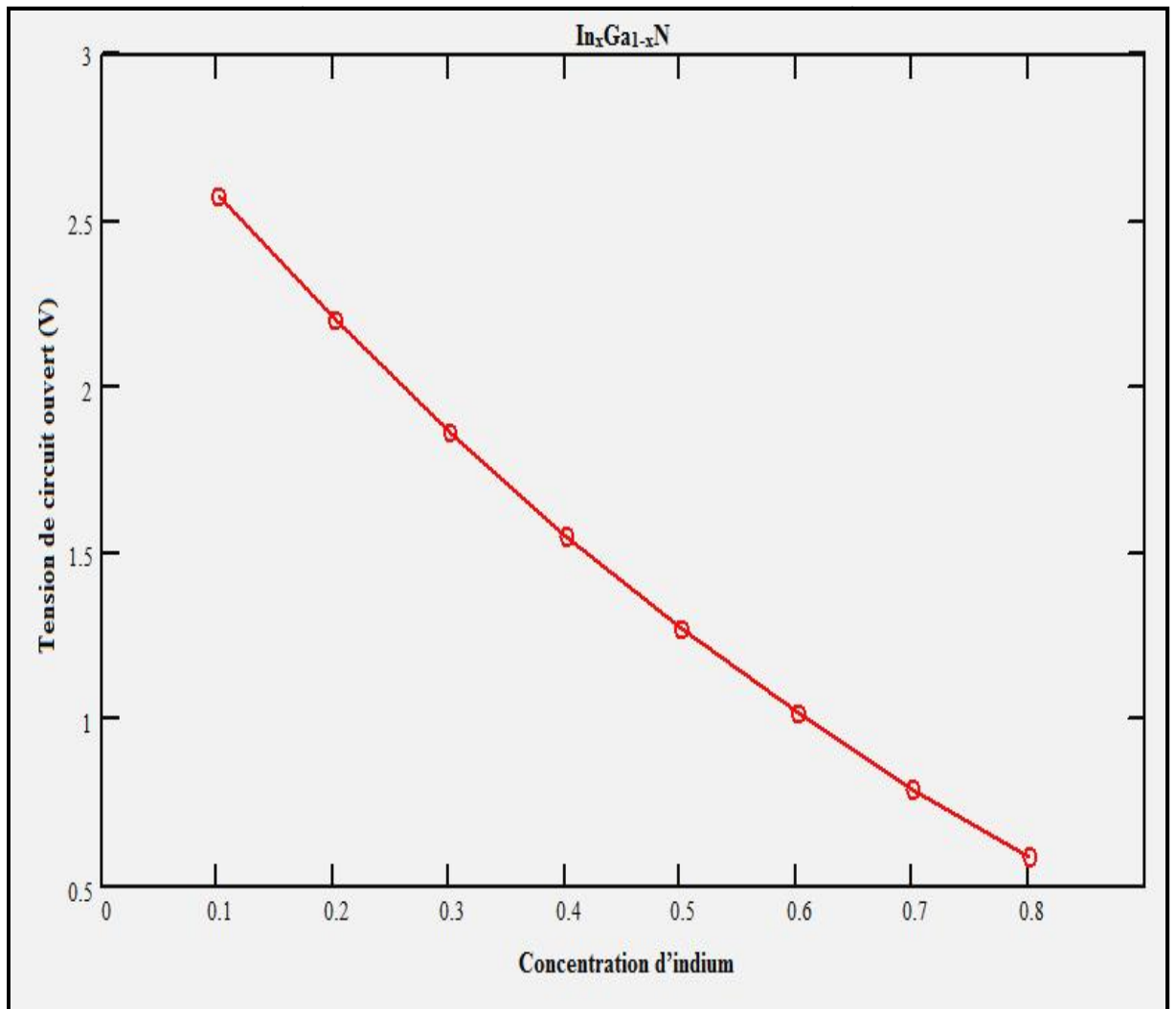


Figure 4.9 : Variation de la tension circuit ouvert V_{co} en fonction de concentration d'indium x avec : ($x_j = 10^{-6}$ cm et $N_a = N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).

4.3.4 Puissance et puissance maximal délivrée

Sur la figure 4.10 sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension pour différentes concentrations d'indium x . Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales P_{\max} .

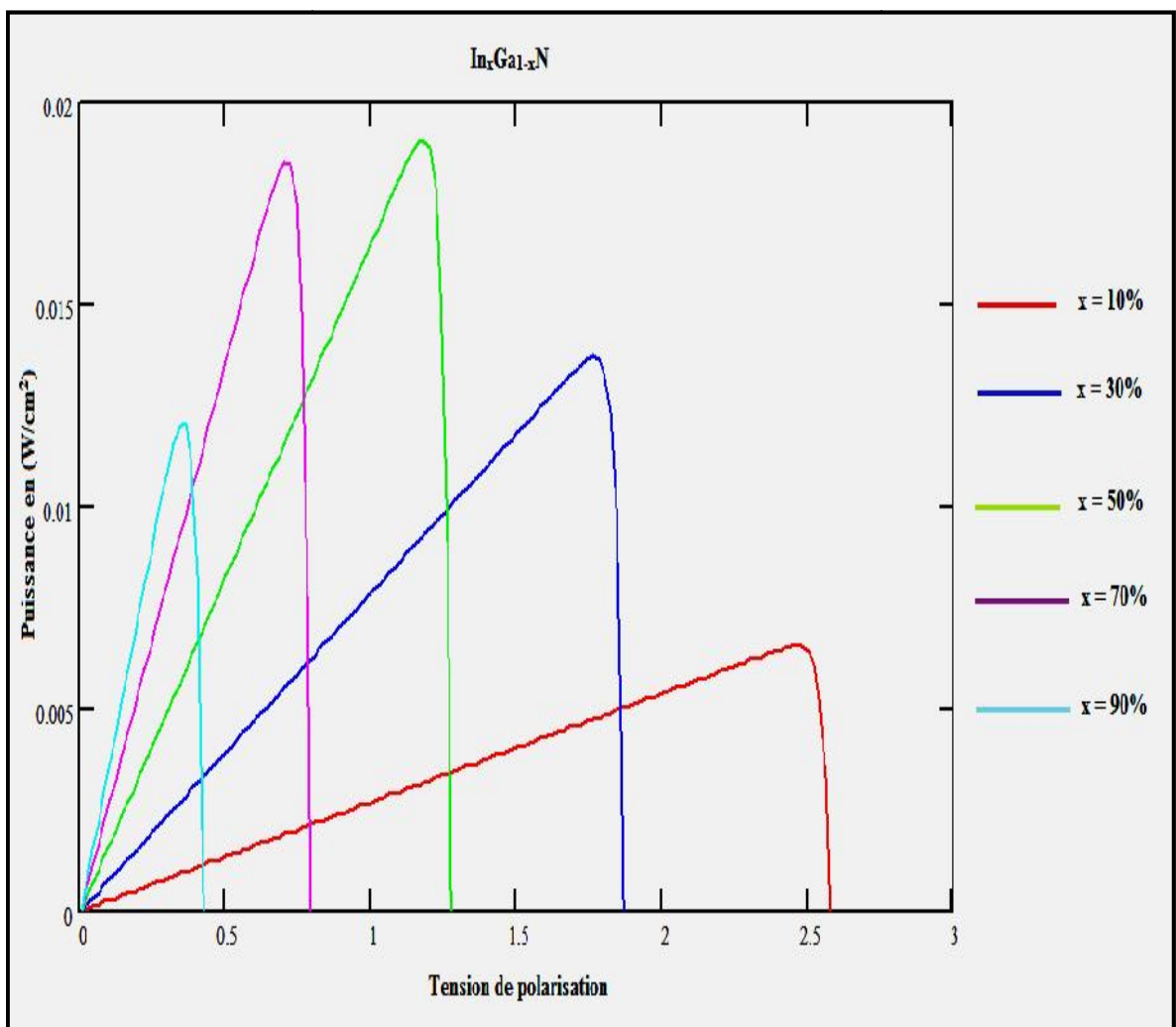


Figure 4.10 : Puissance délivrée par la cellule pour plusieurs concentrations d'indium de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ avec : ($x_j = 10^{-6}$ cm pour la et $N_a = N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$).

La variation de la puissance maximale P_{\max} en fonction de la concentration d'indium x , est représentée sur la figure 4.11. La puissance maximale atteint sa valeur optimale pour une concentration d'indium x de l'ordre de 60%.

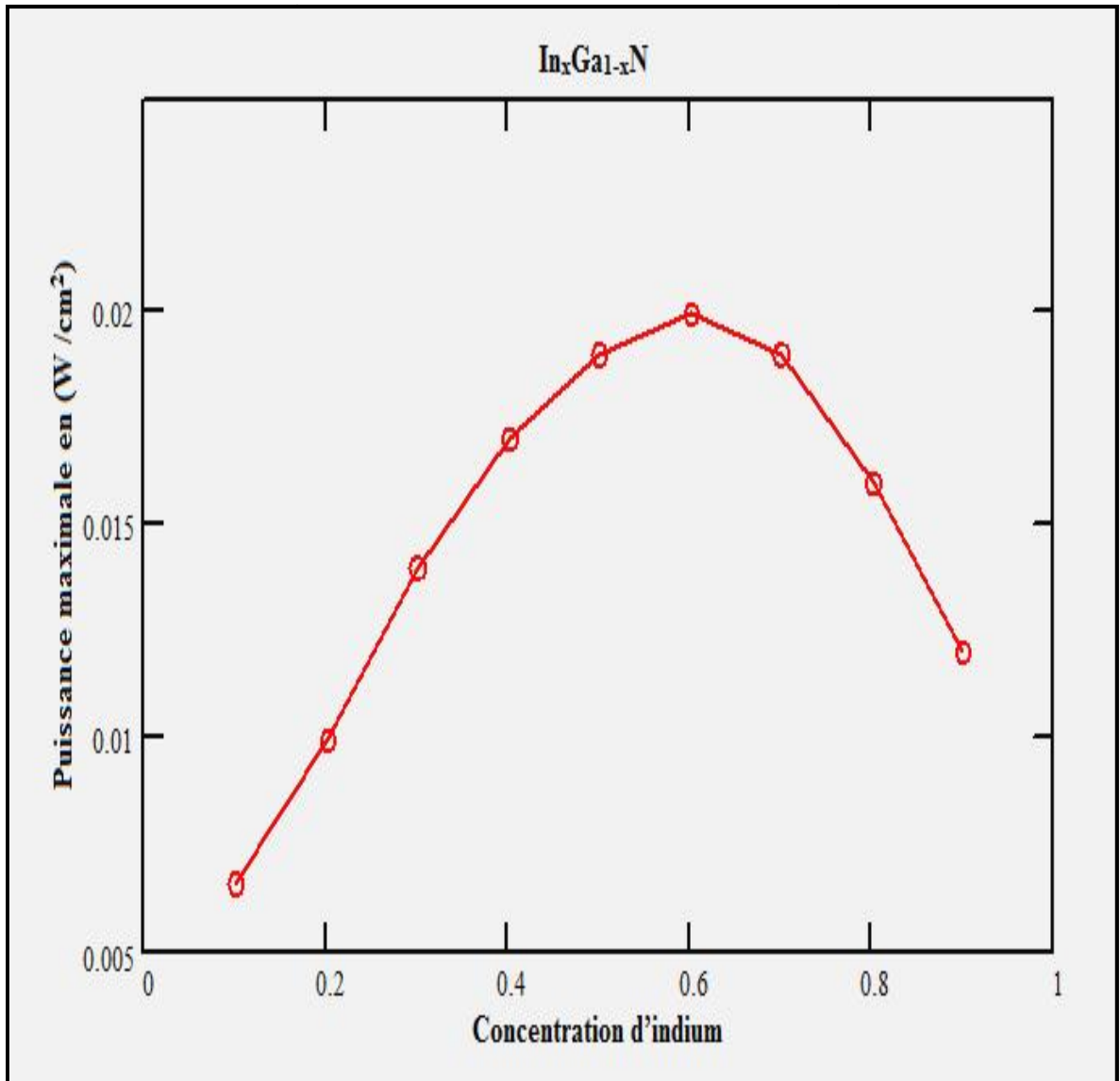


Figure 4.11 : Variation de la puissance maximale P_m en fonction de la concentration d'indium x .

4.3.5 Facteur de forme

C'est un paramètre important qui dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction PN, et du matériau utilisé.

La figure 4.12 illustre une simulation du facteur de forme en fonction de la concentration d'indium, on remarque qu'un pourcentage de presque 91% a été atteint avec 30 à 40% de concentration d'indium, mais des valeurs plus élevées de ce dernier provoque une diminution remarquable du facteur de forme.

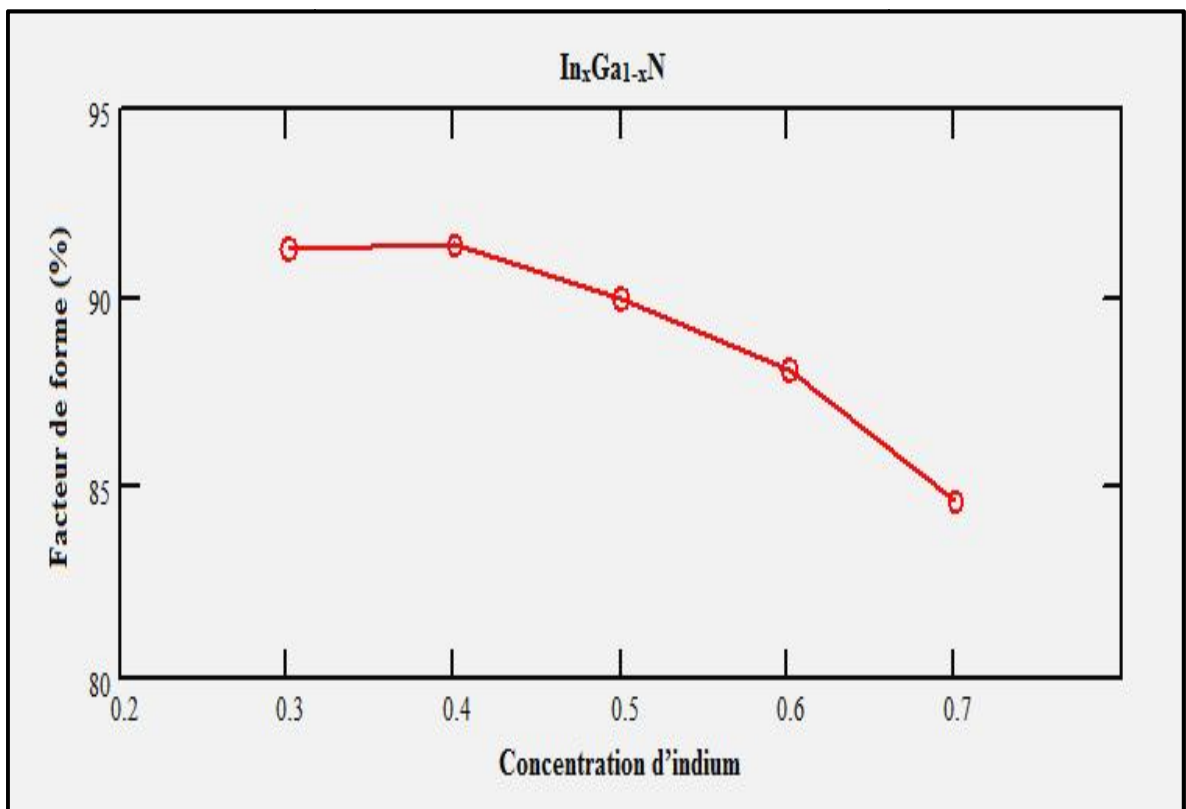


Figure 4.12 : Variation du facteur de forme FF en fonction de la concentration d'indium x.

4.3.6 Le rendement

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure 4.13 qui montre la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de la concentration d'indium. Le rendement atteint une valeur maximale de 17.5%, pour une concentration d'indium $x=60\%$.

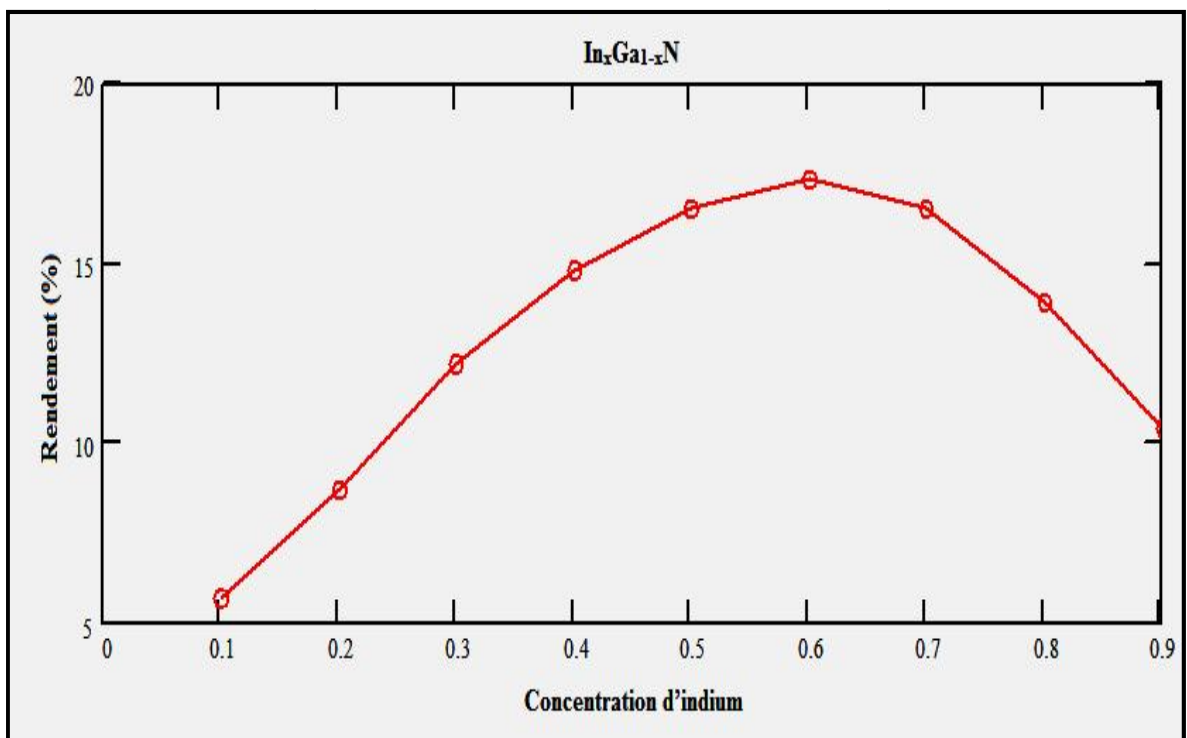


Figure 4.13 : Représentation du rendement de la structure $In_xGa_{1-x}N$ en fonction de la concentration d'indium.

Une jonction de structure $In_xGa_{1-x}N$ avec un rendement théorique de 17,5% est très optimale pour une seule cellule solaire, ce rendement résulte d'une unification de différents paramètres internes et externes, ainsi que les propriétés électriques et optiques du matériau InGaN qui couvre presque toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire.

4.4 Conclusion

Les performances optimales de la cellule solaire $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ont été simulées en calculant le rendement avec différents paramètres de la structure, y compris la concentration de dopage, l'épaisseur et la concentration d'indium.

Lorsque les concentrations de dopage dans les régions P et N de la jonction sont de l'ordre 5.10^{17}cm^{-3} et un pourcentage de concentration d'indium de 60%, on a calculé une puissance maximale délivrée de 0.02 W/cm^2 , un courant de court-circuit de 0.022 A/cm^2 et une tension de circuit ouvert de 1.019 V . Le rendement optimal est calculé à 17,5% (AM0) avec un facteur de forme de 91 %.

Cette simulation va contribuer à la conception et la fabrication des cellules solaires multi-jonction à base de matériau InGaN d'ultra-haute efficacité pour des applications extraterrestres et terrestres.

Conclusion générale

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée.

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paires électron-trou, et sont donc perdus. Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

Le spectre solaire est un spectre très large pour être exploité par un seul semi-conducteur, des vastes recherches sont fait afin de trouver des matériaux à moins coût et avec des rendements maximales pour les différents technologies des cellules photovoltaïques.

Les objectifs tracés dans le cadre de notre travail consistent à étudier et simuler une structure photovoltaïque à base de matériaux InGaN, a fin d'absorber le maximum du rayonnement solaire et de délivrer aussi un maximum d'énergie électrique.

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, ainsi que les principes de fonctionnement des cellules solaires.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la physique des cellules solaires à base des semi-conducteurs III-V afin de connaître leurs propriétés hors et en équilibres. Enfin nous avons abordé les différents facteurs de perte limitant le rendement de conversion.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié les caractéristiques cristallines, électriques et optiques du matériau InGaN.

Enfin on a simulé les différents paramètres externes tels que le flux, le coefficient d'absorption, et les paramètres électriques tels que la caractéristique courant-tension, la puissance délivrée, le facteur de forme et le rendement.

Pour une concentration d'indium de 60 %, nous avons obtenu un rendement optimal de 17,5 %. Ce qui est très intéressant pour une structure uni-jonction. La continuation de ce travail peut être envisagée dans la simulation de structure multi-jonction à base de matériau InGaN à différentes concentrations d'indium permettant d'atteindre de hauts rendements.

A.1 Paramètres de la structure InGaN

Paramètres	Valeurs
L_n (cm)	125×10^{-6}
L_p (cm)	79×10^{-6}
D_n (cm^2/s)	2,40
D_p (cm^2/s)	0,96
N_d (cm^{-3})	5×10^{17}
S_n (cm/s)	50
S_p (cm/s)	50
ϵ_0 ($\text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$8,85 \times 10^{-14}$
T(K)	300
d(cm)	3×10^{-4}
x_j (cm)	1×10^{-6}
N_a (cm^{-3})	5×10^{17}
τ_n (s)	6,5
τ_p (s)	6,5

$\frac{P}{\text{inc}(W/c^2)}$	0,121
q(C)	$1,6 \times 10^{-19}$
K (eV.K ⁻¹)	$8,617 \times 10^{-5}$
b (eV)	1,43
h (J.s)	$6,626 \times 10^{-34}$
c (cm/s)	3×10^{10}

Tableau A.1 : Les Consanstantes de la structure InGaN.

A.2 Tableau périodique de Mendeleïev

The figure shows a standard periodic table of elements. A legend in the upper center defines the notation for an element box: 'Z' is the atomic number, 'M' is the atomic mass (g/mol), 'X' is the atomic symbol, and 'Nom' is the element name. The table is color-coded by groups and includes the lanthanide and actinide series at the bottom.

Figure A.1 : Tableau périodique de Mendeleïev [35].

Bibliographie

- [1] A.Khelif : « Expérience, Potentiel et marché photovoltaïque Algérien » New EnergyAlgeria NEAL,2010.
- [2] SONEGAS : Programme national des énergies renouvelables, 2011.
- [3] SM Hanasoge : Anomalously weak solar convection ,Proceedings , 2012.
- [4] Hu C , White RM. Solar Cells: From Basic to Advanced Systems. 1983.
- [5] CEA : Le Soleil 2005.
- [6] M.PETIBON Stéphane : thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, janvier 2009.
- [7] United States Committee on Extension to the Standard Atmosphere: U.S. Standard Atmosphere, 1976.
- [8] M. Planck : Distribution of energy in the normal spectrum,1900.
- [9] www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/spectral-irradiance.
- [10] R Sekuler : Perception, New York, 1985.
- [11] S.R Wenham, M.A Green , M.E Watt Corkish : APPLIED PHOTOVOLTAICS Second Edition, page 04 , 2007.
- [12] M.A Green :Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 65, 9,2001.
- [13] C. FKlingshirn : Energy Materials and Solar Cells,2001.

- [14] M.A Green : Solar Energy Materials and Solar ,Vol65,2001.
- [15] www.sanyosolar.eu/en/products/hit-nxxxse10/.
- [16] www.energiesdouce.com/conseils-faq-panneaux-solaires-photovoltaïques-faq.
- [17] N Brown: Solar Junction Breaks Concentrated Solar World Record with 43.5% Efficiency, 2012.
- [18] National Renewable Energy Laboratory (NREL): 2011.
- [19] M.A Green : Solar cells fill factors, General graph and empirical expressions, 1981.
- [20] www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/detailed-balance.
- [21] Vanessa GORGE : Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V, thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS-SUD 11, page79, 2012.
- [22] Bestam Rachid : «Modélisation et Simulation d'une Structure à base de Semiconducteur III-V pour le Photovoltaïque », Université Saad dahleb de Blida, 2012.
- [23] Gorczyca Svane, N.E Christensen: Theory of point defects in GaN, AlN, Physical Review, Vol. 60, 1999.
- [24] Bernardini, F. Fiorentini, V. Vanderbilt : Spontaneous polarization and piezo electric constants of III-V nitrides. Physical Review, Vol. 56, 1997.
- [25] J. Hedger : Properties of Group III Nitrides, Institution of Electrical Engineers, London, 1994.
- [26] L. Liu, J.H Edgar: Substrates for gallium nitride epitaxial, Materials Science and Engineering, Vol. 37, 61, 2002.

[27] J.Wu: When group-III nitrides go infrared, new properties and perspectives, Journal of Applied Physics, Vol. 106, 2009.

[28] F.K Yam, Z. Hassan : InGaN An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms , Super lattices and Microstructures ,Vol. 43,2008.

[29] Clàudio de Carvalho, L.Schleife : Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN poly types ,Physical Review Vol. 84,2011.

[30] L. Z. Vegard : Phys, Vol. 5, 17,1921.

[31] M. Katsikini, Al. Raman : study of Mg, Si, O, and N implanted GaN, Journal of Applied Physics ,Vol. 94, 4389,2003.

[32] D. Loffe : GaN - Gallium nitride , Electronic archive , New Semiconductor Materials, Characteristics and Properties , Physyco-Technical Institutue,2011.

[33] D. Loffe : InN - Indium Nitride ,New Semiconductor Materials Characteristics and properties, Physico-Technical Institute, 2011.

[34] Bourouis Imen : « étude et simulation d'une structure a base de GaInNaS/GaAs pour le photovoltaïque », université de Blida ,2011.

[35] www.wikipedia.org/wiki/fichier:Mendeleïev.jpg.