

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

ZOUAD Mohamed Samir

&

MAHIEDDINE Mohamed

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

Thème

Etude et simulation d'une cellule solaire à multi-jonctions à base de InGaN

Proposé par : Mr. NACER Said

Année Universitaire 2013-2014

Remerciements

Je remercie tous ceux qui m'ont apporté leur aide de près ou de loin, m'ont poussé, encouragé, et m'ont permis d'arriver à terminer ce mémoire...

« Elhamde wa echoukr lil'lah », je remercie Dieu miséricordieux de m'avoir fait rencontrer des êtres bienveillants comme mon encadreur Mr NACER Said qui m'a stimulé, m'a redonné le goût du travail bien appliqué et figolé et m'a accompagné jusqu'à la fin. Une pensée reconnaissante lui est particulièrement adressée pour ses remarques pertinentes et constructives, et pour son aide. Je remercie beaucoup tous mes enseignants au cours de tout mon cursus universitaire. Un remerciement tout particulier au président du jury et à tous les membres du jury pour avoir accepté et pris la peine de juger, d'apprécier et d'évaluer ce travail...

ملخص :

تعتبر الكهرباء بالطاقة الشمسية كمصدر مهم للطاقة المتجددة. مولد الطاقة الضوئية هو مصدر يتميز بنقطة واحدة للتشغيل حيث تكون الطاقة المولدة في حدها الأقصى. والهدف من هذه الدراسة هو تصميم ومحاكاة لمفترق الخلايا الشمسية مفردة ومزدوجة استنادا إلى المادة InGaN. بعد التذكير بخصائص الخلايا الشمسية، قمنا بدراسة تأثير العوامل المختلفة على خصائص الخلية المدروسة. تظهر نتائج المحاكاة أن تركيز الإنديوم يؤثر بشكل كبير على أداء الخلية، كما تم الحصول على العائد الأمثل بنسبة 18% من تركيز الإنديوم بنسبة 60%. محاكاة الخلية المزدوجة المفروق In_{0.5}GaN/ In_{0.7}GaN توفر العائد بحوالي 25%.

كلمات المفاتيح: الطاقة الضوئية ؛ تقاطع المزدوج الخلايا الشمسية؛ InGaN.

Résumé : L'électricité solaire est vue comme étant une importante source d'énergie renouvelable. Le générateur photovoltaïque est une source caractérisée par un seul point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Le but de ce mémoire est l'étude et la simulation d'une cellule solaire simple et double jonction à base de matériau InGaN. Après avoir rappelé les caractéristiques d'une cellule solaire, l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule a été étudiée. Les résultats de simulation montrent que la concentration d'indium influe considérablement sur le rendement de la cellule, aussi un rendement optimal de 18% a été obtenu pour une concentration d'indium de 60%. La simulation d'une cellule à double jonction In_{0.5}GaN/ In_{0.7}GaN prévoit un rendement de l'ordre 25%.

Mots clés : photovoltaïque ; cellule solaire double jonction ; InGaN.

Abstract : Solar electricity is considered to be an important source of renewable energy. The PV generator is a source that is characterized by a single operating point where the generated power has to be of its maximum. The aim of this thesis is the design and simulation of a single and double junction solar cell based on InGaN material. A study was put forward in order to further explain the characteristics of a solar cell, as well as the influence of different parameters of its aspect. Simulation results show that the concentration of indium significantly affects the performance of the cell, as an optimal yield of 18% was obtained for an indium concentration of 60%. The simulation of a double-junction cell In_{0.5} GaN / GaN In_{0.7} provides a yield of about 25%.

Keywords : photovoltaic ; dual junction solar cell ; InGaN.

Listes des acronymes et abréviations

AM : Air mass (masse d'air)

h : Constant de Planck

λ : Longueur d'onde

H : La densité de puissance de photons

Φ : Flux des photons

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

E : l'énergie de photon incident

V : 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

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 accepteur ionisés dans le matériau P

N_c : 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

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 de surface des Trous en excès à la surface arrière

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 grand

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 électrons

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 porteur

N_{defaut} : La densité de défauts

n : La densité d'électrons Libres

$B_{radiatif}$: Constante qui dépend du matériau

B_{Auger} : Constante qui dépend du matériau

n_1 : Indice de réfraction de l'air

n_2 : Indice de réfraction du matériau $In_x Ga_{1-x} N$

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

I_n : Indium

Ga : Gallium

N : Azote

X : La concentration de l'indium

X_j : profondeur de la jonction

B_c : Bande de conduction

B_v : Bande de valence

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 : constant de Boltzmann

ZCE : Zone de charge d'espace

J_n : La densité de courant d'électrons

J_p : La densité de courant de trous

J_d : La densité de courant photoélectrique

J_{ph} : Le photo-courant

J_{tot} : La densité de courant totale

J_{obs} : Le courant d'obscurité

J_{cc} : Densité de courant-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 courant-circuit

FF : Facteur de Forme

$\eta = \text{Rendement}$

n_0 : La concentration d'électrons à l'équilibre

C : La vitesse de La lumière dans le vide

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Généralités	
1.1 Introduction	4
1.2 Histoire des cellules photovoltaïques	4
1.3 Le soleil.....	5
1.3.1 Caractéristiques générales	5
1.3.2 Son énergie	7
1.4 Le rayonnement solaire	8
1.5 Masse d'air	12
1.6 Radiation d'un corps noir	13
1.7 Dualité de la lumière	15
1.8 Description du niture de gallium-indium (InGaN).....	17
1.9 Propriétés cristallographiques.....	17
1.10 Propriétés électriques	18
A- Gap d'énergie interdite dans les nitures	21
B- Evaluation du gap d'énergie dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	21
1.11 Longueur de diffusion	22
1.12 Propriétés optiques	22
A- Indice de réfraction	23
B- Absorption	23
1.13 Etude du coefficient d'absorption	24
1.14 Conclusion	25

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

2.1 Introduction	26
2.2 La cellule photovoltaïque	27
2.3 Le principe de fonctionnement d'une cellule	28
2.3.1 La jonction PN	28
A- A l'équilibre thermodynamique	29
B- Hors l'équilibre thermodynamique.....	30
2.4 L'architecture d'une cellule photovoltaïque.....	31
2.5 Paramètre d'une cellule photovoltaïque	35
2.5.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	35
A- Courant de court-circuit I_{cc}	38
B- Tension à circuit ouvert V_{co}	39
C- Facteur de forme FF	39
2.6 Rendement de conversion d'énergie	40
2.7 Les cellules III-V multi-jonctions	41
2.8 Cellules photovoltaïques à base d'InGaN.....	42
A- Simple jonction	42
B- Multi-jonctions	43
2.9 Conclusion.....	45

Chapitre 3 Simulations

3.1 Introduction	46
3.2 Paramètres d'une cellule photovoltaïque à base de matériau InGaN	47
3.2 .1 Irradiation d'un corps noir	47
3.2 .2 L'absorption	48
3.3 Paramètre électrique d'une structure InGaN ensoleillée	49
3.3 .1 Caractéristique courant-tension	49
3.3.2 Courant de court-circuit	50
3.3.3 Tension de circuit ouvert	51
3.3.4 Puissance et puissance maximale délivrée	51
3.3.5 Facteur de forme	53
3.3.6 Le rendement	54
3.4 – Cellule solaire à double jonctions	55
3.5 Conclusion	59
Conclusion générale	60
Annexe	
Bibliographie	

Liste des figures

Chapitre 1

Figure (1.1) : Spectre solaire haute résolution	6
Figure (1.2) : Le soleil.....	8
Figure (1.3) : Répartition spectrale du rayonnement solaire	9
Figure (1.4) : Variation du rayonnement solaire	9
Figure (1.5) : Composant du rayonnement solaire.....	10
Figure (1.6) : Variation de la durée du jour et de la hauteur du soleil... ..	11
Figure (1.7) : Définition de l'air mass... ..	12
Figure (1.9) : L'irradiation spectrale sous (AM0, AM1.5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde... ..	14
Figure (1.10) : Variations du spectre d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde	15
Figure (1.11) : trois types de cristallisation des semi-conducteurs du groupe III.....	17
Figure (1.11.a) : Diagramme des énergies pour un matériau	19

Chapitre 2

Figure (2.1) : Structure basique d'une cellule solaire	27
Figure (2.2) : Création et diagramme de bande d'une jonction PN	28

Figure (2.3.a) : Image MEB de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramide	32
Figure (2.3.b) : Structure de la cellule HIT à base de silicium avec une texturation de toutes ses couches	33
Figure (2.3.c) : Structure de cellule PERL à base de silicium avec une texturation de pyramide inversée en face avant	33
Figure (2.4) : Schéma d'une cellule solaire avec la jonction PN, Les électrodes, La couche antireflets, et une charge électrique	34
Figure (2.5) : Structure d'une jonction InGaN éclairée	35
Figure (2.6) : caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque	38
Figure (2.7) : Le rendement en fonction du gap d'énergie	41
Figure (2.8) : schéma de la cellule solaire PIN à double hétérojonctions	43
Figure (2.8.a) : Recouvrement du spectre solaire par une cellule triple-jonction	44
Figure (2.8.b) : Schéma d'une cellule triple-jonction	44

CHAPITRE 3

Figure (3.1) : Le flux incident F en fonction de la longueur d'onde	47
Figure (3.2) : Variation du coefficient d'absorption en fonction de l'énergie de photon incident	48
Figure (3.3) : Caractéristique courant tension de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	49
Figure (3.4) : Variation du courant court-circuit en fonction de la concentration d'indium	50
Figure (3.5) : Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la concentration d'indium.....	51

Figure (3.6) : Puissance délivrée par la cellule pour plusieurs concentrations d'indium de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	52
Figure (3.7) : Variation de la puissance maximale en fonction de la concentration d'indium	53
Figure (3.8) : Variation du facteur de forme en fonction de la concentration d'indium	54
Figure (3.9) : Représentation du rendement de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de la concentration d'indium.....	55
Figure (3.10) : Cellule solaire à double jonctions à base de InGaN	56
Figure (3.11) : caractéristique courant tension des deux jonctions d'une cellule à double jonctions.....	57

Liste des tableaux

Tableau (1-1) : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire	16
Tableau (2-2) : Paramètres de maille du GaN et InN en phase wurtzite	18
Tableau (2-3) : paramètres de réseau de GaN et InN	18
Tableau (3.1) : Rendement à double jonction	58

Les annexes

A-1 Paramètres physiques de la structure InGaN

Paramètre	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
$d (cm)$	3×10^{-4}
$X_j (cm)$	1×10^{-6}
$N_a (cm^{-3})$	5×10^{17}
$\tau n (ns)$	6,5
$\tau d (ns)$	6,5
$b (eV)$	1,43

Bibliographie

- [1] P.PAPET " Nouveaux concepts pour la realization de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats mince en silicium cristallin ". These de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [2] www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf.
- [3] H.REEVES , " Mal de Terre ", science ouverte, éditions du seuil, mars 2003.
- [4] OBSERV'ER, " Baromètre du Solaire Photovoltaïque ", Système Solaires, Avril 2004, N° 160, pp.68-83.
- [5] *BALDOMERO Garcia, "Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using Silvaco Atlas", Master's Thesis. Naval Post Graduate School, Monterey, California: 2007.*
- [6] [jcboulay.free.fr/astro/sommaire/astronomie/univers/galaxie/etoile/systeme_solaire/soleil/ page_soleil.htm.](http://jcboulay.free.fr/astro/sommaire/astronomie/univers/galaxie/etoile/systeme_solaire/soleil/page_soleil.htm)]
- [7] N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF
- [8] <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/images/Solar/Events/erupt2.jpg>
- [9] R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979
- [10] Anne Labouret , Michel Villos , Energie solaire photovoltaïque .Edition Dunod Paris, 2005.
- [11] Retscreen, Photovoltaic Background, International Renewable energy decision support centre, Resources Canada 2001-2002.

- [12] D.R. di Valdalbero : ‘La recherche énergétique européenne : pont de coopération sur la Méditerranée’. Liaison Énergie-Francophonie, N°71 (Énergie et développement durable en Méditerranée), 2e Trimestre 2006, Pages 71-76.
- [13] Energie solaire, les machines élévatoires, archives document FAO, dpt du développement durable.
- [14] V.GORGE, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012.
- [15] R Sekuler : Perception, New York, 1985.
- [16] S.R Wenham, M.A Green , M.E Watt Corkish : APPLIED PHOTOVOLTAICS Second Edition, page 04 , 2007.
- [17] Thibaut Desrues « développement cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière » . Thèse de doctorat, l’institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009
- [18] Pétibon Stéphane «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de l’énergie pour les applications photovoltaïques » .Thèse de doctorat, Université de Toulouse,2009 .
- [19] Gorczyca Svane, N.E Christensen: Theory of point defects in GaN, AlN, Physical Review, Vol. 60, 1999.
- [20] I. Vurgaftman et J.R. Meyer, *J. Appl. Phys.* 94, 3675 (2003)
- [21] X. Wang, A. Yoshikawa, *Crystal Growth and Characterization of Materials* 48/49, 42 (2004)
- [22] L. Liu et J.H. Edgar, *Mat. Sci. Eng. R* 37, 61 (2002)

- [23] V.GORGE, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012.
- [24] Pousse, A., Atkins, P. and Jones, L. Chimie molécules, matière, métamorphoses. 3ème édition. Paris : De Boeck Université, 1998. p. 255 à 257.
- [25] L.Vegard, *Z.Phys.* 5, 17 (1921)
- [26] J.C. Phillips, << *Bonds and bands in semiconductors* >>, Academic Press, New York and London (1973)
- [27] M.A Green : Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 65, 9, 2001
- [28] C. F. Klingshirn : *Energy Materials and Solar Cells*, 2001.
- [29] M.A Green : *Solar Energy Materials and Solar* , Vol 65, 2001
- [30] www.sanyosolar.eu/en/products/hit-nxxxse10/.
- [31] www.energie douce.com/conseils-faq-panneaux-solaires-photovoltaïques-faq.
- [32] Roshanak Radbeh « Réalisation et caractérisation des cellules solaire organiques à couche composites polymères incluant des nanotubes de carbones » Thés de Doctorat. Université de Limoges 2008.
- [33] Petibon Stéphane « Nouvelle architectures distribuées de gestion et de L'enrgie pour Les applications photovoltaïques » Thèse de doctorat .Université de Toulouse 2009.
- [34] www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/detailed-balance.

- [35] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2008, 16, 61
- [36] Neufeld, C.J., et al. High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap. *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 93, 143502.
- [37] Dahal, R., et al. InGaN/GaN multiple quantum well solar cells with long operating wavelength *Applied Physics Letters*. 2009, Vol. 94, 063505
- [38] Yamamoto, A., et al. Recent advances in InN-based solar cells: status and challenges in InGaN and InAlN solar cells. *Physica Status Solidi C*. 2010, Vol. 7, 1309.
- [39] Yamaguchi, M., et al. Novel materials for high-efficiency III–V multi-junction solar cells. *Solar Energy*. 2008, Vol.82 :173

Dédicace

À mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donnés un magnifique modèle de labeur et de persévérance, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour me permettre de suivre mes études dans les meilleures conditions possibles et n'avoir jamais cessé de m'encourager tout au long de mes années d'étude. J'espère qu'ils trouvent dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour

À grand-mère en lui souhaitant une longue vie pleine de joie et de santé

À mon frère ABDESSALAM qui a été toujours à mes cotés.

À ma petite sœur LINDA DIDA et je lui souhaite une vie pleine de bonheur

Et de joie.

À mes cousins : RIAD, BILEL(P), RACHIDA, IHCEN, MERIEM et MARIA

À mes tantes et leurs maris.

À mon binôme M .MOHAMED pour l'expérience et les moments durs qu'on a partagé ensemble, pour sa patience, sa générosité, et sa largesse

Je dédie ce travail particulièrement à B. Wafa pour l'expérience et les conseils.

*À mes chères amies avec qui j'ai passé mes années d'études avec qui j'ai
partagé le tout M. MOHAMED, R. ABDOU, S. BILEL B. SOFIAN,
S. AHMED, K. ZAHRA, M. SARAH, M. AMIRA et ma sœur FZ.
BADAoui et sans oublier mon Ex binôme I. FARID*

Je termine par dédier ma future femme D. IBTISSEEM

*Merci ALLAH pour tous ce que tu m'as donné, merci ALLAH pour le chemin
que tu m'as fait traverser....*

ZOUAD Mohamed Samir

Dédicace

*À mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donnés
un magnifique modèle de labeur et de persévérance, pour tous les sacrifices
qu'ils ont consentis pour me permettre de suivre mes études dans les meilleures
conditions possibles et n'avoir jamais cessé de m'encourager tout au long de
mes années d'étude. J'espère qu'ils trouvent dans ce travail toute ma
reconnaissance et tout mon amour*

À mes frères : HICHEME et ZAKI et leurs femmes.

À mes nièces et neveux : TASNIME, HANAA, ANES et ABDERRAHME.

*À mes chers cousins : KHIRO, OUSSAMA et OMAR, je leur souhaite une
Belle vie pleine de joie et d'amour.*

*À mes meilleurs amies LYES, ACHIOU, CHEG et BOUALEM pour les bons
Moments, les beaux souvenirs qu'on a vécus ensemble, pour leurs fidélités,
Leurs conseils, leurs supports et leurs sincérités.*

*À mon binôme et mon frère : ZOUAD SAMIR qui m'a fait voir le vrai sens
de la vie.*

*À tous mes camarades de l'option MOP promo 2013-2014 avec qui j'ai passé
mes années d'études avec, qui j'ai partagé le tout M. MOHAMED, R. ABDOU,*

*S.BILEL B.SOFIAN, S.AHMED, K.ZAHRA, M.SARAH, M.AMIRA et surtout
FZ. BADAoui et Sans oublier mon Ex binôme de l'option R&T : B. YASSINE*

*Et la doctorante « inchalah » B. WAFA. je n'ai jamais vu une personne qui
pose des questions difficiles comme elle.*

*Merci **ALLAH** de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force
d'y croire pour sa patience, sa générosité la patience d'aller jusqu'au bout du
rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire*

« EL HAMDO WA CHOKRO LAK »

MAHIEDDINE Mohamed

Conclusion générale

La production d'électricité photovoltaïque est largement dominée par le silicium avec 95 % des panneaux photovoltaïques installés. Cependant, ces panneaux souffrent d'un faible rendement moyen, environ. C'est pourquoi de nombreuses recherches se tournent sur l'augmentation de l'efficacité des panneaux photovoltaïques et sur des matériaux alternatifs possédant un meilleur rendement.

Parmi les nouveaux matériaux considérés prometteurs pour le photovoltaïque, l'alliage InGaN étudié intensément depuis plus d'une dizaine d'années.

Ce travail nous a permis de mieux appréhender les propriétés de ce matériau et de participer à l'optimisation d'une cellule solaire à base d'InGaN. Le rendement de 18% a été obtenu pour une concentration d'indium de 60 %.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les caractéristiques du spectre solaire, ainsi que les propriétés du matériau InGaN.

Dans le deuxième chapitre, l'architecture, le principe de fonctionnement et les caractéristiques des cellules solaires simples et multi jonctions ont été présentés.

Dans le dernier chapitre des simulations ont été réalisées et un rendement de conversion de l'ordre de 25 % a été obtenu pour une cellule à double jonctions.

Ce travail peut être poursuivi par l'étude de cellules à plus de deux jonctions ce qui permettra une absorption plus importante du spectre solaire conduisant à une amélioration du rendement de conversion.

Introduction générale

Selon la majorité des prévisionnistes, la consommation d'énergie primaire commerciale devrait doubler d'ici 2030, puis tripler aux environs de 2050 [1]. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables [2]. De plus, ce type de production d'électricité est principalement responsable de la production de CO₂ rejet dans l'atmosphère engendrant le phénomène de l'effet de serre qui confronte la planète aux phénomènes de réchauffement climatique [3].

L'épuisement de ces ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants: énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Le rayonnement solaire constitue une ressource énergétique non polluante, la mieux partagée sur la terre et la plus abondante : La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité: c'est l'énergie solaire photovoltaïque. Ce mode de production ne nécessite pas forcément de réseau de distribution. En effet on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme : Villages, maisons isolées (un tiers de la population mondiale n'a pas accès à l'énergie électrique), Relais de communication, Pompage de l'eau, Eclairage des routes [4].

L'industrie des cellules solaires s'est développée autour du silicium, le matériau le plus couramment utilisé pour les applications terrestres en raison de son faible coût. Cependant, depuis quelques années, cette même industrie s'intéresse à d'autres matériaux répondant aux normes de rendement élevé, de poids et de durées de vie importantes exigées par les applications spatiales. Les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps (sur au moins 20 ans). De nouveaux matériaux ont vu le jour, tel que le Nitrure d'Indium Gallium « InGaN » qui a subi des recherches approfondies depuis 2002 en tant que matériau photovoltaïque. En faisant varier la composition de nitrure d'indium et de nitrure de gallium au sein de l'InGaN, la bande interdite de ce matériau semi-conducteur peut être changée. La gamme de bande interdite de l'InGaN coïncide avec la partie visible du spectre solaire. Ainsi, une cellule solaire à haut rendement peut être développée par l'utilisation de multicouches de l'InGaN [5].

L'objectif de notre travail est l'étude et la simulation d'une cellule solaire multi jonctions à base de nitrure d'Indium Gallium InGaN, par le logiciel MATHCAD.

Ce manuscrit est constitué de trois chapitres, il est organisé comme suit :

- ❖ Le premier chapitre présente des généralités sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, ainsi que les principales propriétés des nitrures de Gallium Indium InGaN.
- ❖ Dans le deuxième chapitre nous présentons la physique des cellules photovoltaïques à simple jonction et à multi jonctions, ainsi que les différents paramètres caractérisant une cellule solaire.

- ❖ Et dans le dernier chapitre nous allons simuler les différents paramètres externes des cellules solaire multi jonction InGaN.

1.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique au moyen des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologique et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. En effet le mot " photovoltaïque "vient du grec" photo "qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité »

1.2 Histoire des cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de produire l'électricité à partir de l'énergie solaire. L'effet photovoltaïque, qui transforme directement l'énergie solaire en électricité, a été découvert par Becquerel en 1839. Après cette importante découverte, il a fallu plus de trente ans pour découvrir la photoconductivité du sélénium sous illumination et en 1877, la première photopile de rendement de conversion de 1% a été décrite. En 1905, Einstein donnait l'explication de la nature physique de ce phénomène : l'extraction de charge électrique de la matière sous l'effet lumineux est l'effet photoélectrique. Par la suite, l'effet photovoltaïque a été observé avec plusieurs autres matériaux tels que l'anthracène, le premier matériau organique photoconducteur.

En 1953, les chercheurs de « Bell Laboratoires » ont découvert au travers de leurs études sur les transistors au silicium, que ce matériau présentait de nouveaux intérêts pour les cellules solaires. Après un an de recherche et développement, ils ont préparé les premières cellules solaires capables de produire des quantités utiles de puissance. Le rendement de conversion était d'environ 6% (60 watts par mètre carré). Cet événement a fait la première page du magazine New York Times. Toutefois, la commercialisation de cellules photovoltaïques pour la vie quotidienne a échoué en raison de leur coût prohibitif. À cette époque, les cellules solaires au silicium ont attiré l'attention du

Pentagone. En 1955, le gouvernement américain a annoncé son projet de lancer un satellite spécial : son prototype comportait des cellules solaires au silicium pour ses centrales électriques. Jusque-là, les satellites étaient équipés de piles, dont la puissance décroissante dans le temps rendait les coûts excessifs. En avril 1958, le satellite Vanguard-1 fut le premier équipé de cellules solaires, source d'électricité autonome et fiable à long terme, preuve de leur valeur exceptionnelle. Aujourd'hui, la technologie la plus répandue dans le domaine du photovoltaïque utilise le silicium comme matériau actif. Les cellules produites industriellement donnent des rendements de conversion de 15% en moyenne (11-12% pour les modules). En laboratoire, les meilleurs prototypes atteignent environ 25% de rendement avec du silicium monocristallin. Toutefois, la purification du silicium et l'utilisation de produits hautement toxiques constituent aujourd'hui un obstacle majeur au développement de l'énergie photovoltaïque.

1.3 Le soleil

1.3.1 Caractéristiques générales [6]

Le Soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1391 000Km, et qui est placée à 150 000 000 km de nous (périhélie : 147,1 millions de km et aphélie :152,1 millions de km). Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8minutes après avoir été émise. N'oublions pas qu'elle voyage à la vitesse de 300 000 km/s, c'est-à dire qu'elle fait 7 fois le tour de la Terre en 1 seconde.

Quant à son volume, il pourrait contenir 1 300 000 Terre. Avec une densité de 1,41(contre 5,5 pour la Terre), sa masse est de 330 000 fois celle de la Terre ($1,99 \cdot 10^{30}$ kg ou 2milliards de milliards de milliards de tonnes). Il représente 99,867 % de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du Soleil.

Il a déjà effectué 20 tours de la Galaxie en traversant des densités variables de poussières qui interceptent une partie du rayonnement qu'il nous envoie. Cela a dû certainement avoir des conséquences sur le climat terrestre.

Chapitre 1 Généralités

Bien que sa lumière soit 600 000 fois plus élevée que celle de la Lune (son miroir), il n'est visible qu'à une distance de 60 al (année-lumière). Notre Soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Il ne faut pas oublier non plus que les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers, à partir de l'hydrogène. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel OH (radical hydroxyle), CH (radical méthylque) et aussi du titane, du plomb, du mercure, du chlore, du silicium, cuivre, calcium, indium, antimoine, zirconium, rhodium, etc... On trouve, par exemple, 9 atomes d'or pour 1 000 milliards d'atomes d'hydrogène, soit la bagatelle de 10 millions de milliards de tonnes d'or (1.10^{16} Tonnes). Outre les atomes, l'analyse du spectre solaire a permis de découvrir des molécules complexes (figure 1.1).

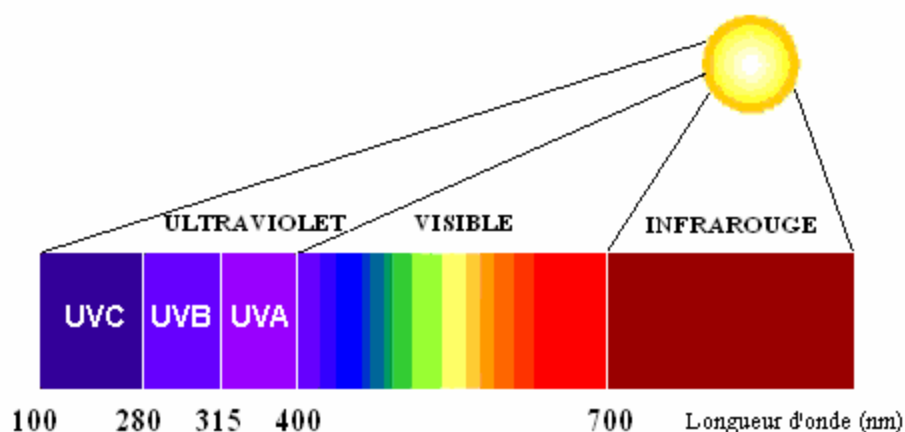


Figure (1.1) : Spectre solaire haute résolution [7]

Il n'a pas de surface à proprement parler, mais la température de radiation, si on assimile le Soleil à un corps noir, est de 5 700 K selon la loi de Stephan, ce qui lui donne sa couleur jaune. La couleur est en relation directe avec la longueur d'onde, laquelle est liée à la température. Ainsi en analysant la couleur, nous pouvons obtenir facilement sa température de radiation. Au centre, il règne une pression 220 millions de fois plus grande que la pression atmosphérique de notre Terre (soit un gros pétrolier sur le bout du doigt !) qui est de 1033 hectopascal au niveau de la mer, entraînant une température de 15 millions K, et plusieurs millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère (> 10 000 km à plusieurs millions de km).

1.3.2 Son énergie : Energie « humainement » inépuisable

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable: $3,82 \cdot 10^{26}$ Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque cm^2 de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliard nièmes ($5 \cdot 10^{-9}$) de cette puissance.

Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25 000 mégawatts par gramme et par seconde (100 milliards de bombes à hydrogène de 1 mégatonne).

Cette énergie provient du centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. Il ne faut pas confondre la fusion avec la fission, qui casse les noyaux dans une bombe atomique. La fusion d'un gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un gramme d'eau de 15°C à 16°C . Cela correspond à $0,14 \text{ W/cm}^2$. Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de 200 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle. Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection. La taille d'une granule peut dépasser celle de la France et la durée de vie peut aller de 10 minutes à plus de 10 heures, selon la taille (figure 1.2)

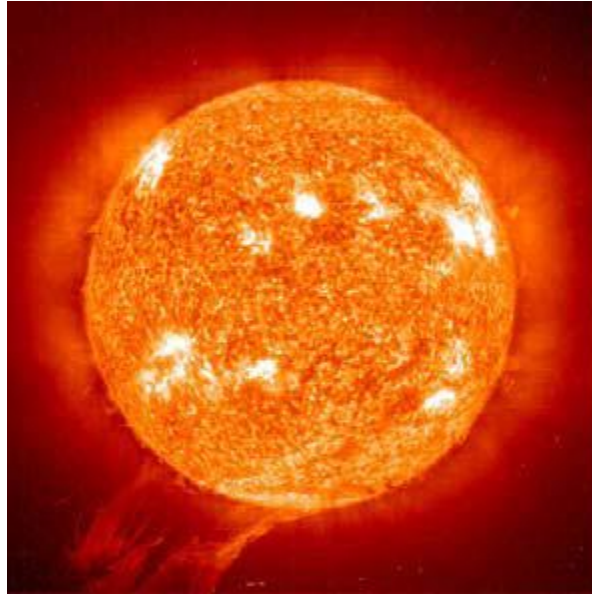


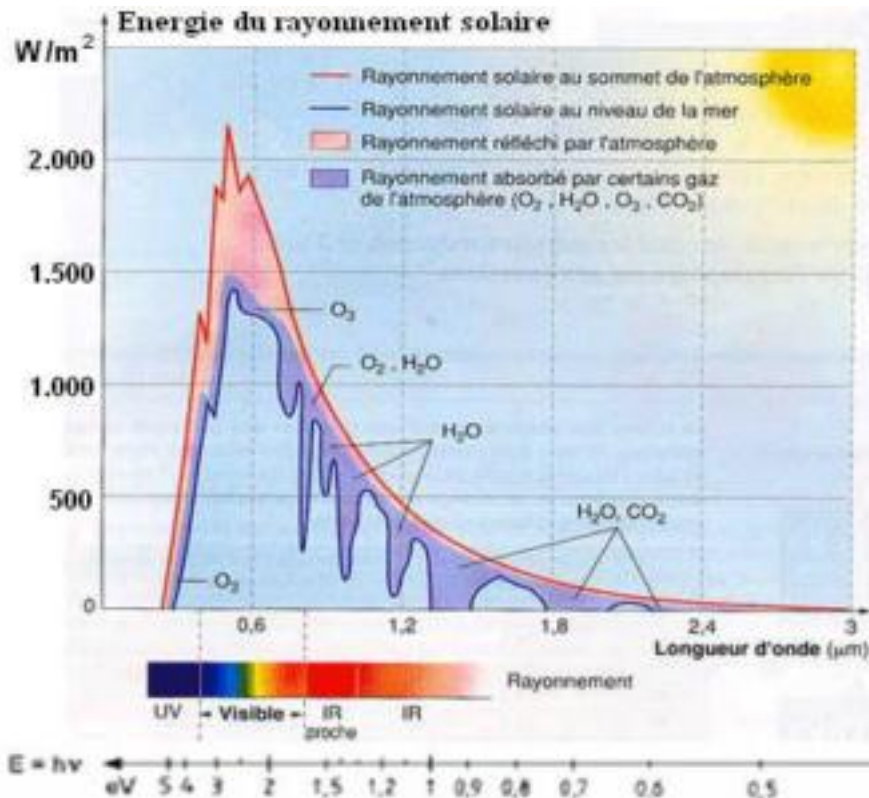
Figure (1.2) : le soleil [8]

Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du Soleil, tandis qu'il leur faut 8 minutes pour arriver sur Terre. Quant aux neutrinos, fabriqués en même temps, ils sortent instantanément. Absolument rien, n'est capable de les arrêter. Par conséquent, il est très difficile de les étudier. Ainsi, la recherche des neutrinos nous renseigne sur la lumière qui sortira dans 2 millions d'années du Soleil. Aujourd'hui, le taux est inférieur à ce que l'on attendait. Cela peut signifier que dans 2 millions d'années, la température sera plus basse avec des conséquences très importantes sur l'environnement terrestre.

1.4 Le rayonnement solaire

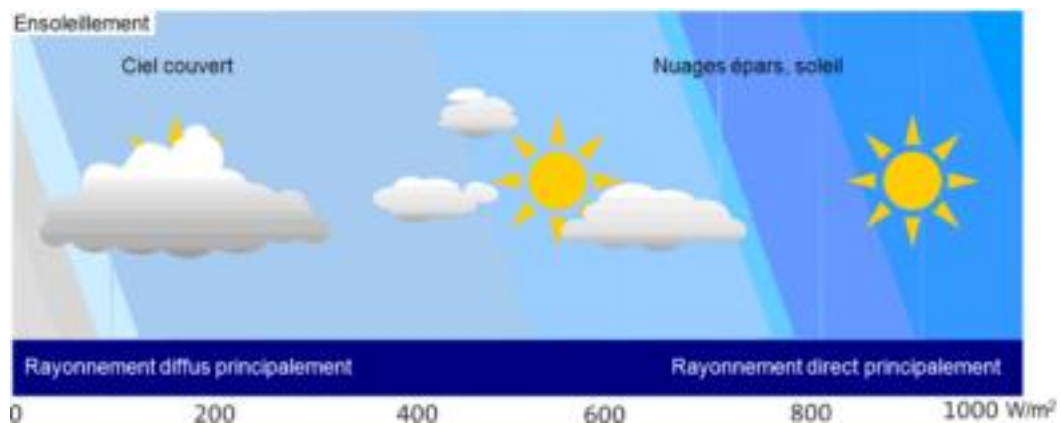
Les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquent l'émission d'onde électromagnétique de très forte puissance ou rayonnement thermique solaire.

L'énergie solaire reçue par la terre en dehors de l'atmosphère est environ $1\,370\text{ W/m}^2$. Cette grandeur est appelée constante solaire. [9]



Le domaine de longueur d'onde utile pour les applications solaires est situé entre $0.25\mu\text{m}$ et $2.5\mu\text{m}$, l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95% environ du total .

Mais en traversant l'atmosphère l'énergie radiative solaire est atténuée par absorption et diffusion, et l'énergie enregistrée au niveau de la mer est à l'ordre de $1000\text{W}/\text{m}^2$. [11]



Ce chiffre variera ensuite en fonction de l'angle d'incidence sur le récepteur de l'intensité et de la durée d'ensoleillement.

Le rayonnement solaire est ainsi composé de deux types de rayonnement (la proportion du rayonnement dû à l'albédo étant très faible) :

le rayonnement solaire direct définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

Et le rayonnement solaire diffus correspondant au rayonnement dispersé dans l'atmosphère par la brume, le ciel lui même, et les nuages. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.

Le rayonnement solaire global est alors la somme des deux types de rayonnements direct et diffus et dont l'intensité est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre. [12]

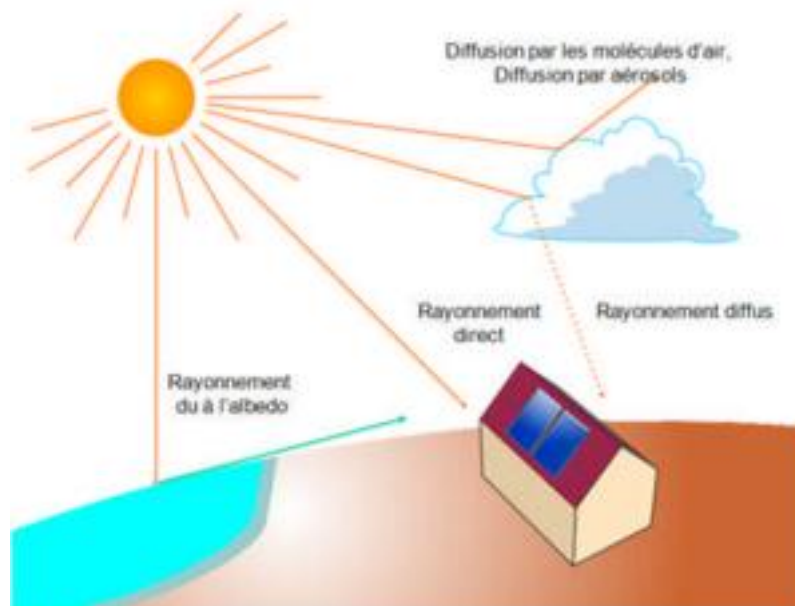


Figure (1.5) : Composantes du rayonnement solaire.

Mais la concentration optique, dont il est question dans notre mémoire, ne concerne que le rayonnement direct, provenant du soleil par temps clair.

Les concentrateurs sont alors dotés de dispositifs de suivi de la course du soleil, en hauteur ou en hauteur et en azimut.

Pour cette

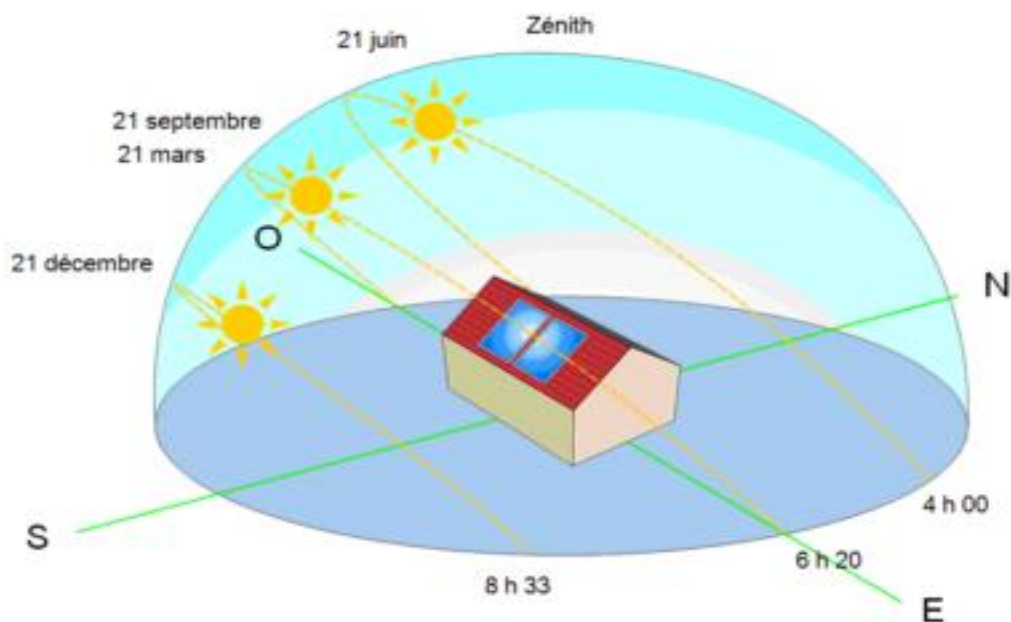


Figure (1.6) : Variations de la durée du jour et de la hauteur du soleil.

[13]

Evidemment, par temps couvert le rayonnement solaire au sol peut tomber pratiquement à zéro. En revanche, pour une journée ensoleillée et un ciel parfaitement dégagé, le rayonnement solaire diffus tombant au sol peut atteindre 15 à 20% du rayonnement global, mais avec un ciel couvert, le rayonnement parvenant au sol est en totalité un rayonnement diffus .

1.5 Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformations.

On appelle « masse d'air », AM, ou *Air Mass* en anglais, la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer.

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m^2 , la correspondant à nos latitudes.

Soleil au zénith (au niveau de la mer) : AM 1 ;

Soleil à 48° : AM 1.5.

Rayonnement solaire hors atmosphère : AM 0

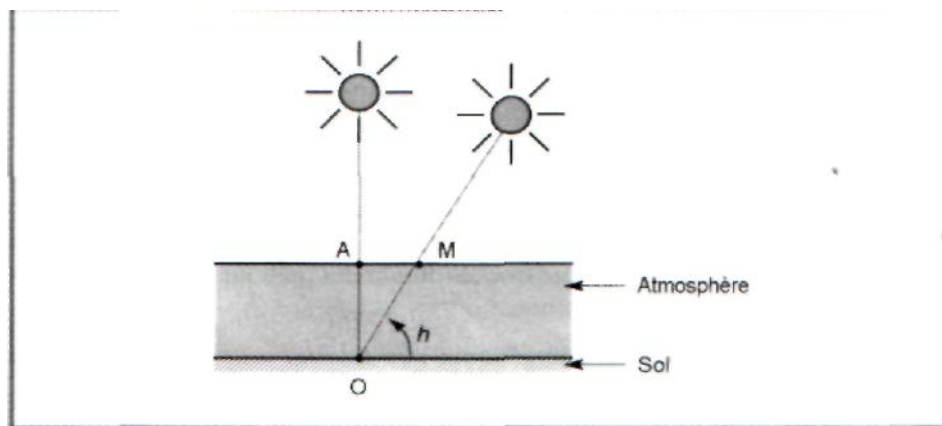


Figure (1.7) : Définition de l'air mass. [14]

1.6 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 de Planck, montrée dans l'équation suivante:

$$F(\lambda) = 2\pi A \left(\frac{c}{\lambda^4 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \right) \quad (1.1)$$

Avec :

ν : La fréquence de la lumière.

K : La constante de Boltzmann.

T : La température.

c : vitesse de la lumière dans le vide.

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

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

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

λ : longueur d'onde de la lumière

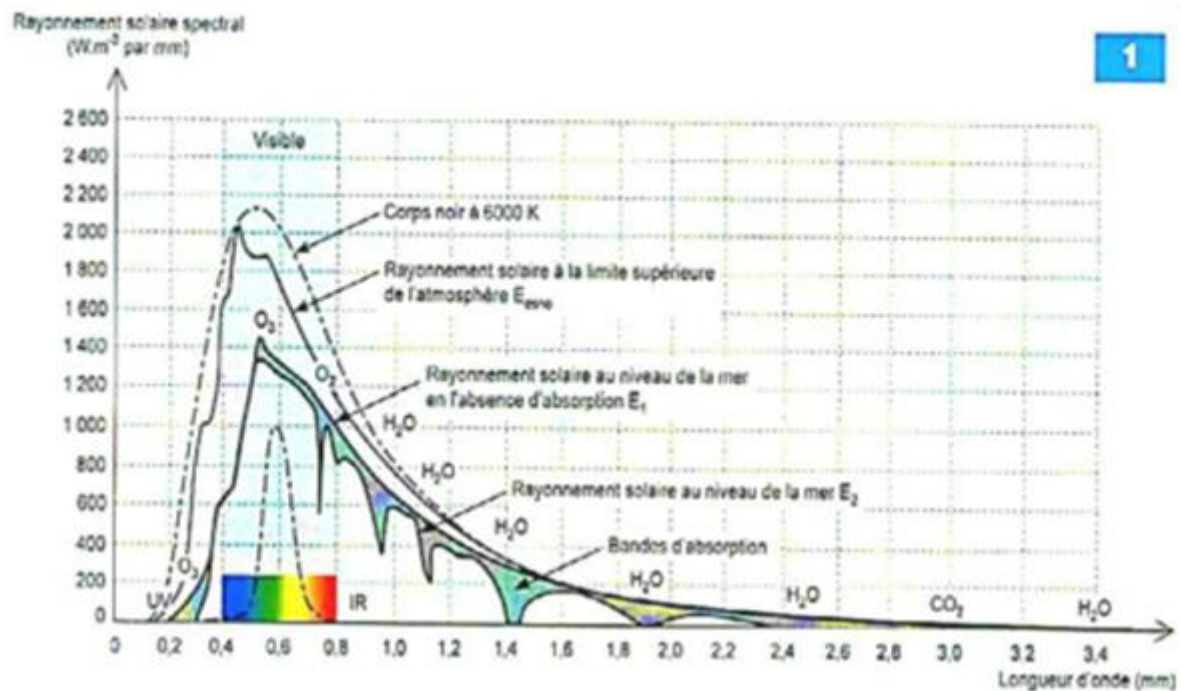


Figure (1.9) : L'irradiation spectrale (AM0,AM1.5G,corps noir) en fonction de la longueur d'onde. [15]

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

$$H = \sigma T^4 \quad (1.2)$$

Avec :

$$\sigma = \text{Constante de Stefan-Boltzmann, elle égale } 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J/m}^2 \text{ s K}^4$$

Les équations ci-dessus et la figure (1.9) montrent que la distribution spectrale et la puissance de la lumière émise augmentent en fonction de la température d'un corps noir. Par exemple, après la température ambiante, un émetteur de corps noir va émettre un rayonnement de faible puissance à des longueurs d'onde en majorité supérieures à $1 \mu\text{m}$, bien au-delà de la portée visuelle de l'observation humaine. Si le corps noir est chauffé à 3000K, 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.

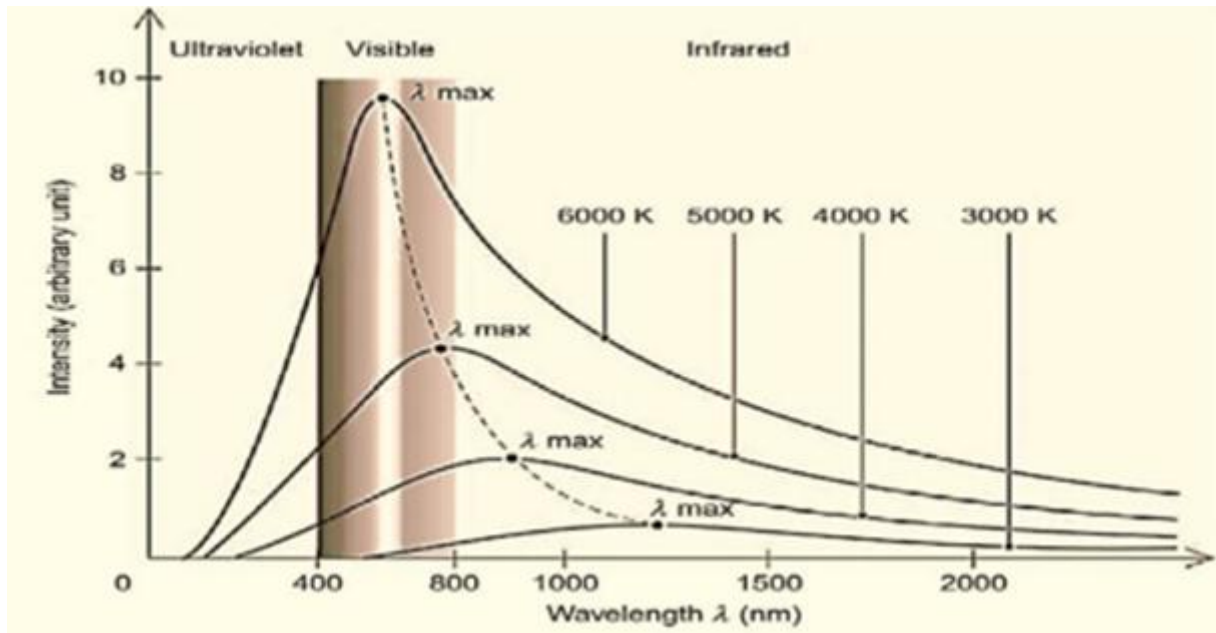


Figure (1.10) : Variations du spectre d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde . [1 6]

1.7 Dualité de la lumière

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E liée à λ par la relation suivante : [17]

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda \quad (1.3)$$

Avec :

h : constante de planck.

c : vitesse de la lumière dans le vide.

ν : fréquence.

λ : longueur d'onde.

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

Chapitre 1 Généralités

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre $0,2 \mu\text{m}$ (*ultra-violet*) et $4 \mu\text{m}$ (*infra-rouge*) avec un maximum d'énergie pour $0,5 \mu\text{m}$. 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre $0,2 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$. De $0,4 \mu\text{m}$ à $0,78 \mu\text{m}$, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Le tableau I-1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux. [18]

$\lambda (\mu\text{m})$	E(ev)	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Tableau I-1 Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde ces photons excitent des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

1.8 Description du nitrure d'Indium-Gallium (InGaN)

L'InGaN apparaît à l'heure actuelle comme le matériau le plus prometteur pour les applications photovoltaïques. Il est activement étudié parce qu'il représente une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques:

Un large gap d'énergie interdite direct, lui permettant une large couverture spectrale, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique. Son gap est modulable avec le taux de substitution de l'Indium dans l'alliage. Avant d'étudier le composé ternaire l'InGaN, il convient d'étudier les propriétés essentielles de ses composés binaires qui sont le nitrure d'indium (InN) et Le nitrure de gallium GaN. [19]

1.9 Propriétés cristallographiques

Les nitrures du groupe III peuvent cristalliser sous trois formes différentes : wurtzite (Figure (1.11)-a) notée habituellement α -XN ; zinc-blende (Figure (1.11)-b) qu'on écrit généralement β -XN ; la troisième, plus rare, est la cristallisation sel gemme (rocksalt) (Figure (1.11)-c).

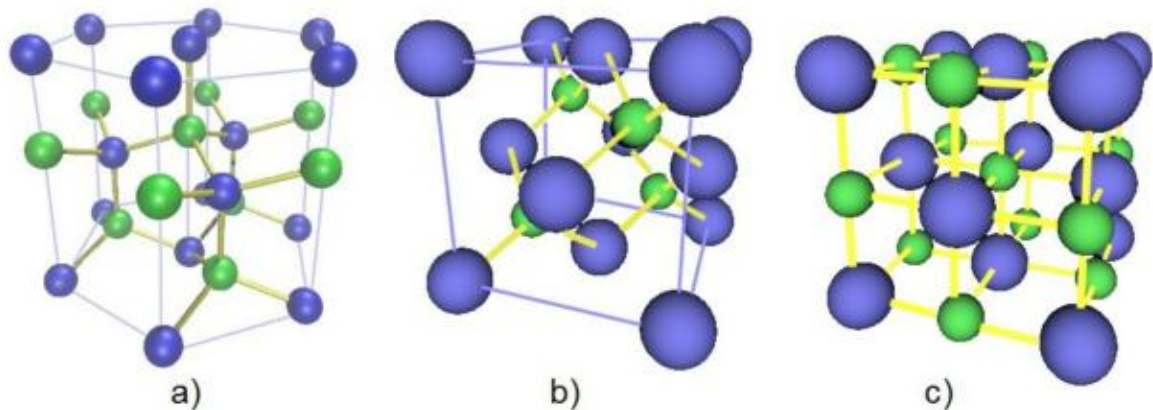


Figure (1.11): trois types de cristallisation des semi-conducteurs du groupe III

Parmi celles-ci à température et pression ambiante la wurtzite est thermodynamiquement la plus stable. La wurtzite est caractérisée par deux paramètres : a (pour le côté de l'hexagone) et c (correspondant à la hauteur du prisme), dont les valeurs sont données dans le Tableau (I.2) pour une température de 300K. [20]

	α –GaN	β –InN
a (Å)	3.189	3.54
c (Å)	5.185	5.70

Tableau (I.2): Paramètres de maille du GaN et InN en phase wurtzite

Comme nous le verrons ultérieurement, la croissance de ces matériaux ne se fait pas à température ambiante et il convient de savoir comment évoluent les paramètres de maille en fonction de la température. La variation des paramètres de réseau est donnée par le coefficient d'expansion thermique (Tableau I.3).

	GaN	InN
$\Delta a/a \cdot 10^{-6} K^{-1}$	5.59	3.8
$\Delta c/c \cdot 10^{-6} K^{-1}$	3.17	2.9

Tableau (I.3) : paramètres de réseau de GaN et InN. [21]

1.10 Propriétés électriques

Les propriétés électriques d'un matériau proviennent de son gap d'énergie interdite E_g et de sa densité de porteurs.

Avant de détailler ces valeurs pour l'InGaN, nous allons rappeler rapidement quelques notions essentielles de physique. Le gap d'énergie interdite est défini comme étant la différence d'énergie entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction.

✓ *Diagramme d'énergie*

Le diagramme d'énergie d'un matériau est présenté dans la figure (2.3.1).

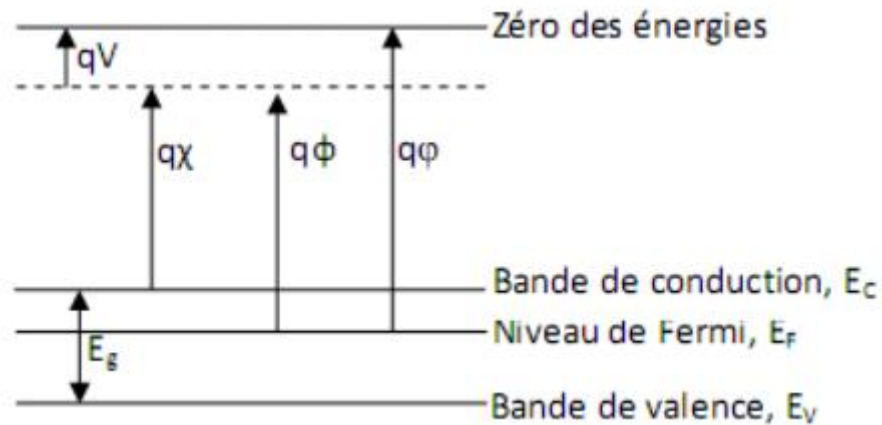


Figure (2.3.a) : Diagramme des énergies pour un matériau. [23]

Avec :

q : la charge élémentaire.

V : le potentiel électrostatique pouvant régner dans les matériaux.

χ : l'affinité électronique.

ϕ : le travail de sortie.

φ : le potentiel d'ionisation.

Le bas de la bande de conduction varie spatialement avec le potentiel électrostatique macroscopique V régnant à l'intérieur du matériau. L'affinité électronique χ peut être définie comme la quantité d'énergie dégagée suite à la capture d'un électron par un atome en phase gazeuse. Plus l'affinité électronique est grande plus la capture d'un électron par l'atome dégage de l'énergie et plus cette capture est stable. Le travail de sortie, ϕ correspond au travail à fournir pour extraire une particule du système sans l'emmener à l'infini, mais en la laissant à proximité immédiate du système où elle reste soumise au même potentiel électrostatique V . Enfin, le potentiel d'ionisation, φ est l'énergie nécessaire pour extraire une particule du système et la mettre à l'infini. [24]

✓ Niveau de Fermi

Le niveau de Fermi E_F , correspond au plus haut niveau énergétique occupé par un électron à OK. La probabilité d'occupation d'un niveau énergétique E , par un électron obéit à la statique de Fermi-Dirac, définie par l'équation ci-dessous. La probabilité d'occupation de l'énergie E par un trou est $1-F(E)$.

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{KT}\right)} \quad (1.5)$$

Avec :

E_F : le niveau de Fermi.

K : la constante de Boltzmann.

T : la température.

✓ Densité d'état

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.

La densité d'état aux borne des bandes de conduction et de valence, N_C et N_V respectivement, est donnée par :

$$N_C = [0,9x + (1-x). 2.3]. 10^{18} [\text{cm}^{-3}] \quad (1.6)$$

$$N_V = [3.5x + (1-x). 1,8]. 10^{19} [\text{cm}^{-3}] \quad (1.7)$$

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 . 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).

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

Certaines propriétés (Y) comme le paramètre de maille, la polarisation et les constantes piézoélectriques peuvent être déduites par interpolation linéaire suivant la loi de Vegard

$$Y(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = (x) \cdot Y(\text{InN}) + (1-x) Y(\text{GaN})$$

avec une erreur inférieure à 2% pour n'importe quelle valeur de x ($0 \leq x \leq 1$).

Pour l'énergie de bande interdite il faut utiliser la relation quadratique de J.C. Phillips :[25]

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = (1-x) E_g(\text{GaN}) + x E_g(\text{InN}) - bx(1-x) \quad (1.8)$$

Avec :

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

b : le paramètre de courbure [eV]

$E_g(\text{InGaN})$: le gap d'énergie de l'InGaN [eV]

$E_g(\text{GaN})$: le gap d'énergie du GaN [eV]

$E_g(\text{InN})$: le gap d'énergie de l'InN [eV]

1.11 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 :

$$L = \sqrt{D \times \tau} \quad (1.9)$$

Avec :

τ : la durée de vie des porteurs

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

$$D = \frac{kT}{q} \mu \quad (1.10)$$

Avec :

μ : la mobilité des porteurs

1.12 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 les composants. 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 :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.11)$$

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

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (1.12)$$

On a alors :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1.13)$$

Avec :

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

n_2 : Indice de réfraction du matériau $In_xGa_{1-x}N$

La loi de l'indice de réfraction du matériau $In_xGa_{1-x}N$ est donnée par :

$$n_2(In_xGa_{1-x}N) = xn(InN) + (1-x)n(GaN) - bx(1-x) \quad (1.14)$$

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. [26]

1.13 Etude 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), 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 :

$$\alpha[cm^{-1}] = 2,2 \times 10^5 \sqrt{\left(\frac{1,24}{\lambda(\mu m)}\right) - Eg(eV)} \quad (1.15)$$

1.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire. Ensuite, nous avons abordé les phénomènes physiques liés au soleil, tels que le spectre du soleil, le corps noir et l'irradiation spectrale.

Nous avons vu aussi dans ce chapitre les caractéristiques structurelles, les propriétés électriques et optiques du matériau InGaN.

Ces connaissances sont indispensables pour la détermination des caractéristiques des cellules solaires.

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

2.1 Introduction

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques capables de convertir directement la lumière en électricité, en utilisant l'interaction de la lumière avec certains matériaux semi-conducteurs. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et celles des semi-conducteurs.

La recherche à moyen et long terme dans le domaine de la conversion de l'énergie solaire a pour but de réduire de manière significative le coût de ces dispositifs photovoltaïques pour les applications terrestres (tuiles solaires photovoltaïques, ...) et d'abaisser le prix du kW/h : le photovoltaïque est pour l'instant trop cher et la fabrication d'une cellule solaire demande beaucoup d'énergie. Les autres critères qui doivent être pris en compte, hormis le coût, sont : la faisabilité, le rendement maximum, la fiabilité et la productivité.

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

2.2 La cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées:

- ✓ d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- ✓ d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- ✓ d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- ✓ les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

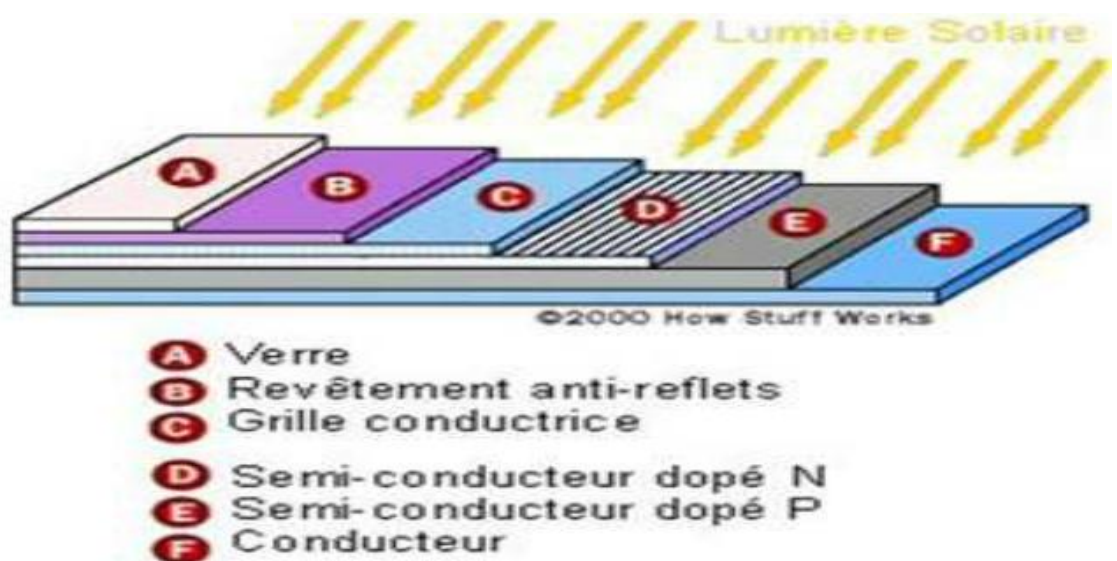


Figure (2-1) : Structure basique d'une cellule solaire.

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

2.3 Principe de fonctionnement d'une cellule

2.3.1 La jonction PN

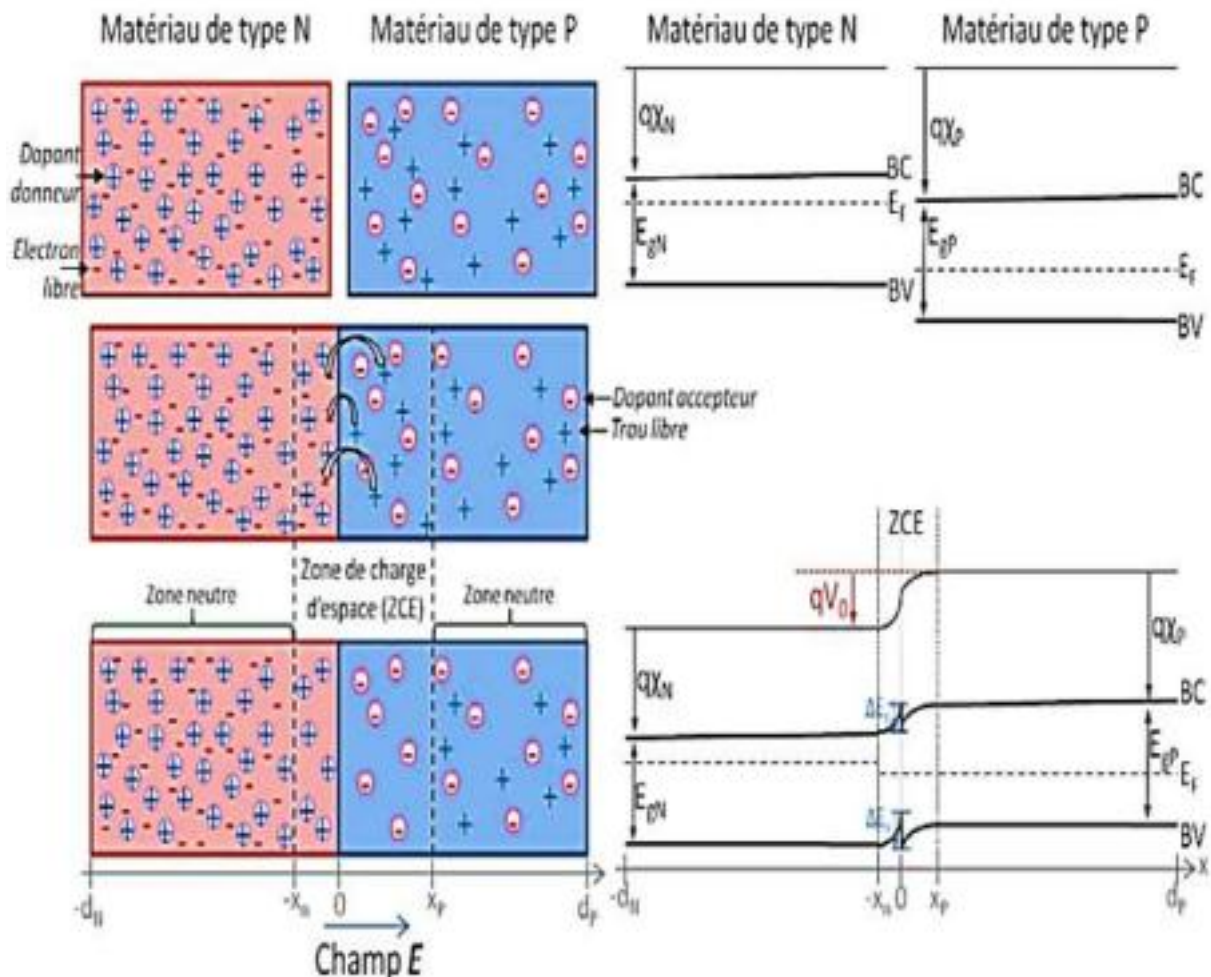


Figure (2.2) : Création et diagramme de bande d'une jonction PN

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

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

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 2.2).

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 :

$$V_0 = V_n - V_p = \left(\frac{kT}{q}\right) \log\left(\frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}\right) \quad (2.16)$$

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

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

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon}{q}\right) \cdot V_0 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.17)$$

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 es libre intrinsèques

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 de l'électron.

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

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

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.

$$V_{tot} = V_0 - V = \left(\frac{KT}{q}\right) \log\left(\frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}\right) - V \quad (2.18)$$

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

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon}{q}\right) \cdot (V_0 - V) \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.19)$$

Avec :

V_0 = Le potentiel de diffusion

V = Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction

2 . 4 L'architecture d'une cellule photovoltaïque

De chaque côté de la jonction PN, on dépose des électrodes métalliques afin de collecter les charges photo générées. 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.

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

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 2.3.a) ou de pyramides inversées (Figure 2.3.b) [27]

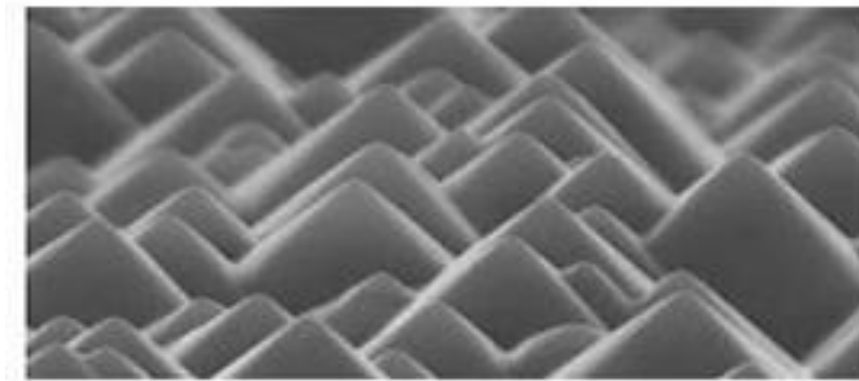


Figure (2.3.a) : Image MEB de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramide. [28]

Cette texturation peut se faire au niveau du substrat (figure 2.3.b), dans ce cas toutes les couches déposées ensuite présentent la même texturation, ou bien seulement sur la dernière couche déposée (figure 2.3.c), 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.

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

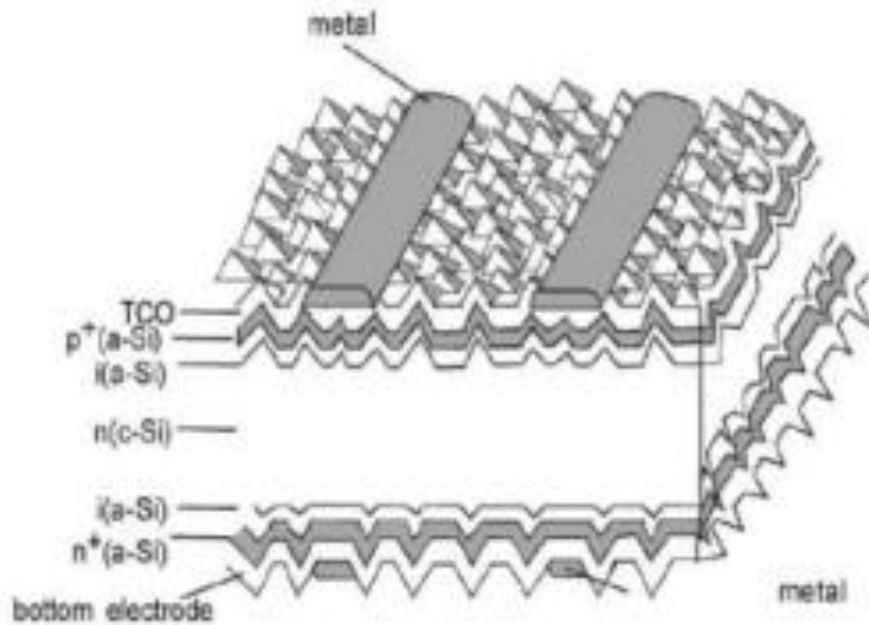


Figure (2.3.b) : structure de la cellule HIT à base de silicium avec une texturation de toutes ses couches [29]

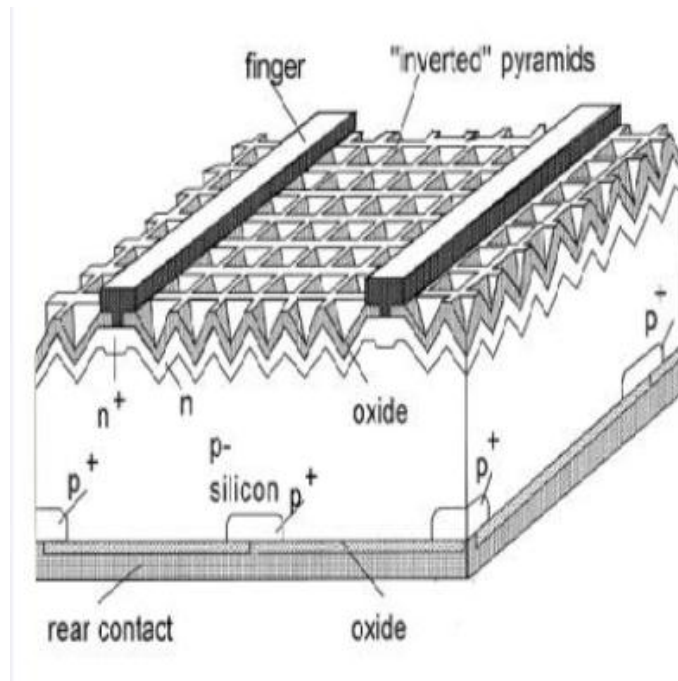


Figure (2.3.c) : structure de cellule PERL à base de silicium avec une texturation de pyramides inversées en face avant [29]

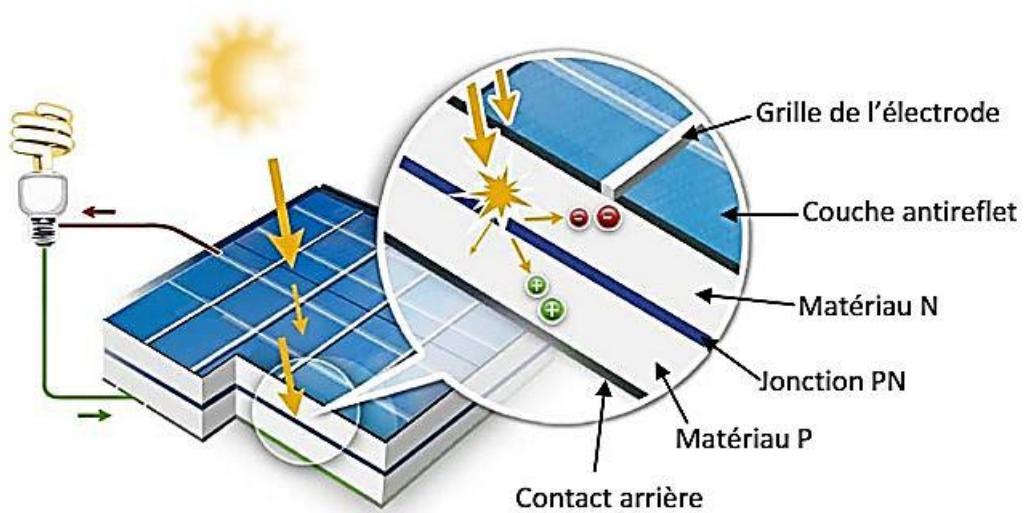
CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

La figure (2.4) 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 en silicium sont généralement dimensionnées par carrés de 10 ou 15 cm de côté, cependant, ces dimensions dépendant 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 l'une aux autres en série, Afin d'augmenter les courants.

Les cellules photovoltaïques forment alors un module photovoltaïque, Par exemple Le module HIT-N235SE10 de Sanyo présente une puissance maximale de 235W avec 72 cellules(6× 12)

Les cellules sont des hétérojonctions de silicium composées de silicium monocristallin mince et de couche ultrafines de silicium amorphe sur les surfaces avant et arrière. Ce panneau produit une tension maximale de sortie de 43V et un courant maximum de sortie de 5.48A [30]



Figure(2.4) : schéma d'une cellule solaire avec la jonction PN, les électrodes, la couche antireflets, et une charge électrique. [31]

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

2.5 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

5.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

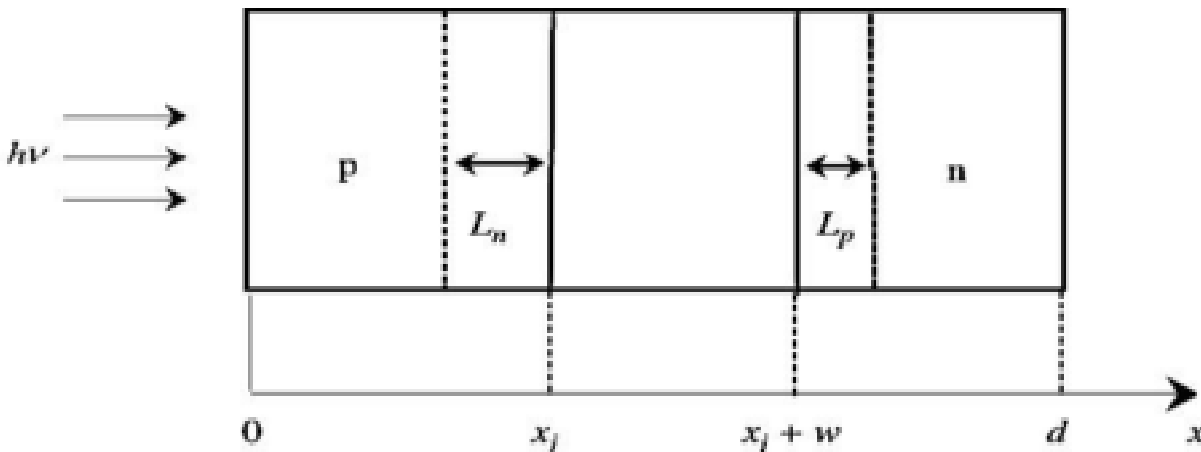


Figure (2.5). Structure d'une jonction InGaN éclairée.

Lorsque la lumière entre par le côté l'émetteur (figure 2.5), un nombre d'électrons et de trous sont générés à une distance (x), avec un taux de génération donné par la loi suivante :

$$G = \alpha F(1 - R)e^{-\alpha x} \quad (2.20)$$

Avec :

α : coefficient d'absorption de la lumière

R : coefficient de réflexion de la lumière sur la surface

F : Flux des photons incident

Le photo-courant résultant dans la jonction P-N est l'intégrale de la somme de

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

trois composantes (J_n , J_p , J_d).

Le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type p (J_n), 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_p).

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

$$J_n = qF(1-R) \cdot \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1} \cdot \left[\frac{\left(\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} + \alpha L_n \right)}{\left[\left(\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \right) \cdot \sinh \cdot \frac{x_j}{L_n} + \cosh \cdot \frac{x_j}{L_n} \right]} \right] - \left[\alpha L_n + \frac{\left[\left(\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \cdot \cosh \cdot \frac{x_j}{L_n} + \sinh \cdot \frac{x_j}{L_n} \right) \right]}{\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \cdot \left(\sinh \cdot \frac{x_j}{L_n} \right) + \cosh \cdot \frac{x_j}{L_n}} \right] \cdot e^{-\alpha x_j} \quad (2.21)$$

La densité courant de trous est donnée par :

$$J_p = \left[\alpha L_p - \frac{\left[\left(\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \cosh \cdot \frac{d}{L_p} + \sinh \cdot \frac{d}{L_p} \right) \right]}{\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \left(\sinh \cdot \frac{d}{L_p} \right) + \cosh \cdot \frac{d}{L_p}} \right] - \left[\frac{\left(\frac{-S_p \cdot L_p}{D_n} + \alpha L_p \right) \cdot e^{\alpha d}}{\left[\left(\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \right) \cdot \sinh \cdot \frac{d}{L_p} + \cosh \cdot \frac{d}{L_p} \right]} \right] \cdot e^{-\alpha(X_j+W)} \cdot qF(1-R) \cdot \frac{\alpha L_p}{(\alpha L_p)^2 - 1} \quad (2.22)$$

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 :

$$J_d = qF(1-R)(e^{-\alpha X_j} - e^{-\alpha(X_j+W)}) \quad (2.23)$$

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

$$J_{ph} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (J_n + J_p + J_d) d\lambda \quad (2.24)$$

La densité de courant totale est donnée par :

$$J_{tot} = J_{ph} - J_{obs} \quad (2.25)$$

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Avec :

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

$$J_{obs} = J_0 (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (2.26)$$

J_0 : courant de saturation

$$J_0 = q \cdot n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n \cdot N_A} + \frac{D_p}{L_p \cdot N_D} \right)$$

S_n : La vitesse de recombinaison de surface des électrons en excès à la surface avant, avec :

$$S_n = 70 \left(\frac{N_D (cm^{-3})}{7.10^{17}} \right) \quad (2.27)$$

S_p : La vitesse de recombinaison de surface des trous en excès à la surface avant, avec :

$$S_p = 70 \left(\frac{N_A (cm^{-3})}{7.10^{17}} \right) \quad (2.28)$$

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

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (2.29)$$

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

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad (2.30)$$

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 du spectre solaire

λ_{max} : la longueur d'onde la plus grande du spectre solaire

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

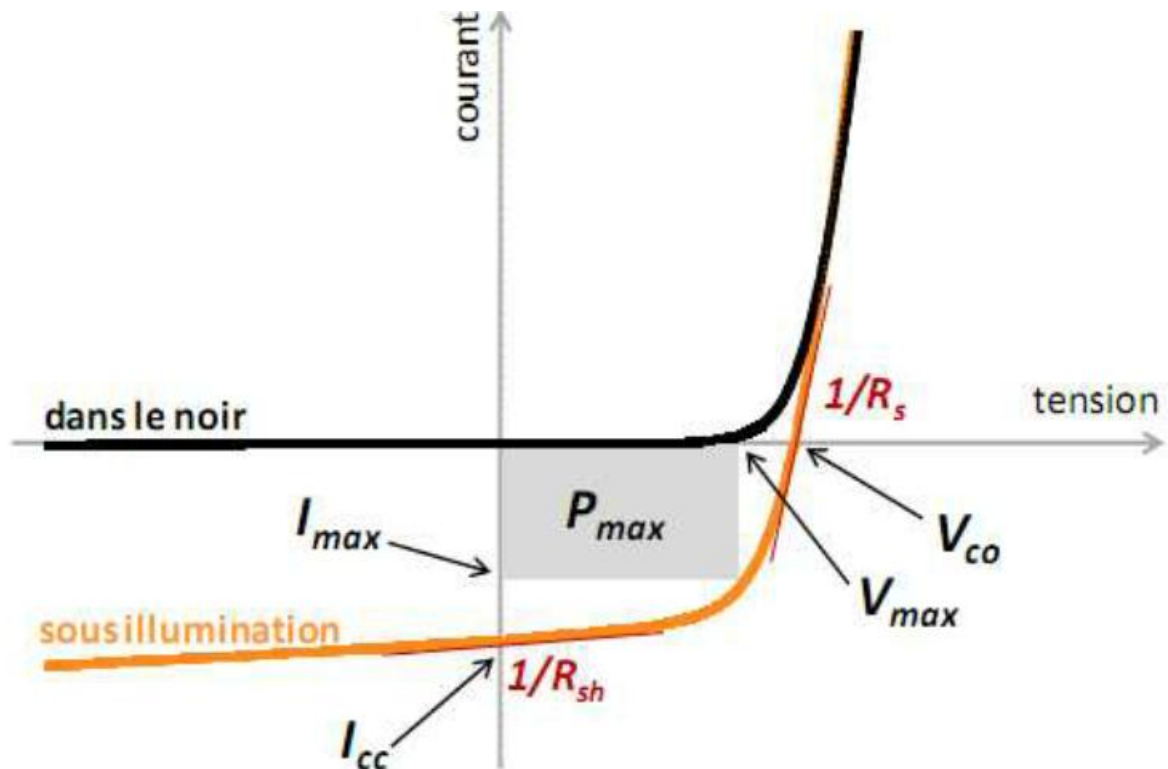


Figure (2.6) : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

La figure (2.6) montre la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairage, on distingue le courant de court-circuit pour une tension nulle ainsi que la tension de circuit ouvert pour un courant nulle.

A – courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

B - Tension de circuit ouvert V_{co}

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule. [32]

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right) \quad (2.31)$$

C – Facteur de forme (Facteur de remplissage), FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle ($I_{cc} \times V_{co}$).

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologique pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [33]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (2.32)$$

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

2.6 - 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_i . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_i .

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

$$\eta = \frac{U_m \cdot I_m}{P_i \cdot S} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i \cdot S} \quad (2.33)$$

Avec :

P_i : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface

S : La surface de la cellule PV

FF : Facteur de Forme.

I_m : Le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

U_m : La tension correspondant à la puissance maximale fournie.

Le rendement de la cellule solaire est déterminé comme étant la fraction de la puissance incidente qui est convertie en électricité, la figure (2.7)

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.

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

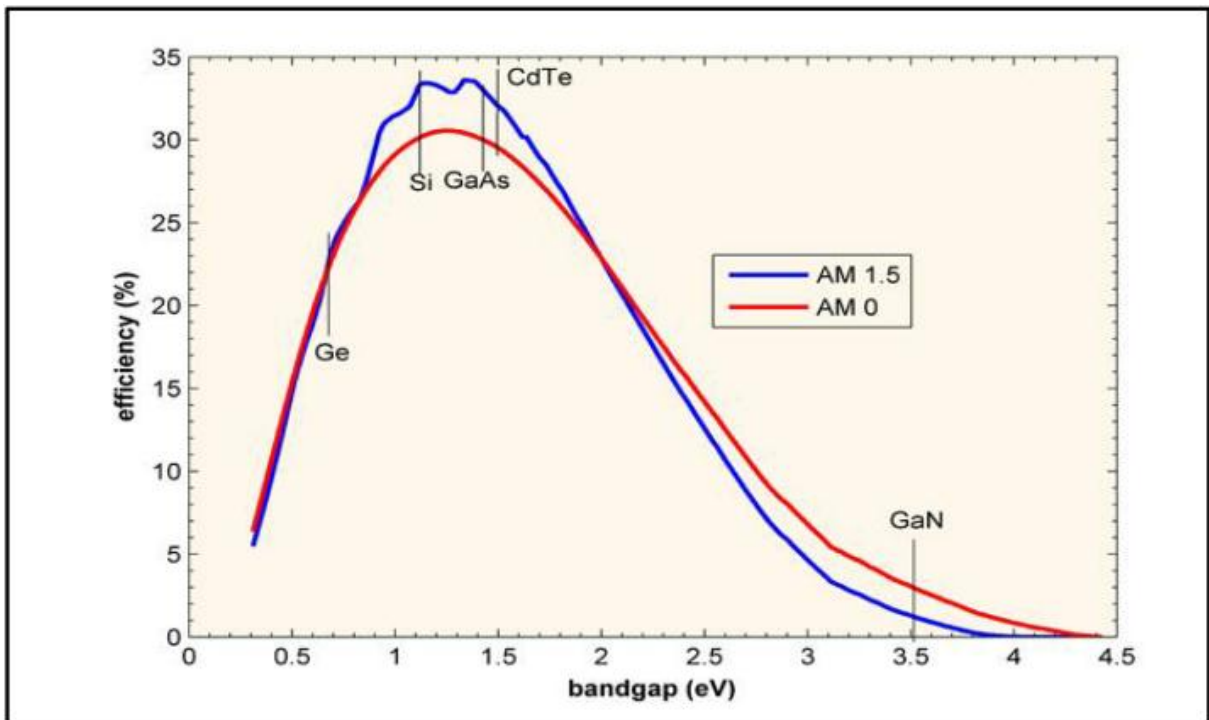


Figure (2.7) : Le rendement en fonction du gap d'énergie. [34]

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.

2.7 Les cellules III-V multi-jonctions

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multi jonction III-V dites «de troisième génération» répondent à cette problématique. En effet il s'agit de l'empilement de divers composés III-V, chacun optimisé pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, obtenu par croissance épitaxiale, permet

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série.

De par le domaine de spectre solaire dont les photons sont récoltés et la minimisation des pertes dues à la thermalisation, ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïque. Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée.

Le procédé de fabrication et les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules entraînent un coût extrêmement élevé qui cantonne ces matériaux à des applications spatiales.

2.8 - Cellule photovoltaïque à base d'InGaN

Les cellules photovoltaïques présentant les plus hauts rendements, en simple et multi-jonctions, sont composées de matériaux III-V. L'alliage InGaN, faisant également partie de cette catégorie de matériaux, possède aussi un fort potentiel pour des cellules solaires à haut rendement. L'avantage principal de cet alliage est son gap modulable sur quasiment tout le spectre solaire.

Il reste cependant encore de nombreux problèmes technologiques à résoudre. Dans cette section, nous faisons un état de l'art de la filière InGaN, de la simple jonction aux concepts de cellules tandem à hétérojonction. [35]

A – Simple jonction

Le matériau InGaN fut proposé pour la première fois pour des applications photovoltaïques en 2003. En mettant en avant son gap d'énergie modulable et sa résistance aux radiations de haute énergie. Depuis, la fabrication de cellules photovoltaïques à base d'InGaN a été réalisée avec une homojonction PN ou PiN sur GaN, ou sur AlN. Des structures en double hétérojonction P-GaN/i-InGaN/N-GaN, plus faciles à fabriquer, furent également largement étudiées. Fig. (2.8) [36]

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

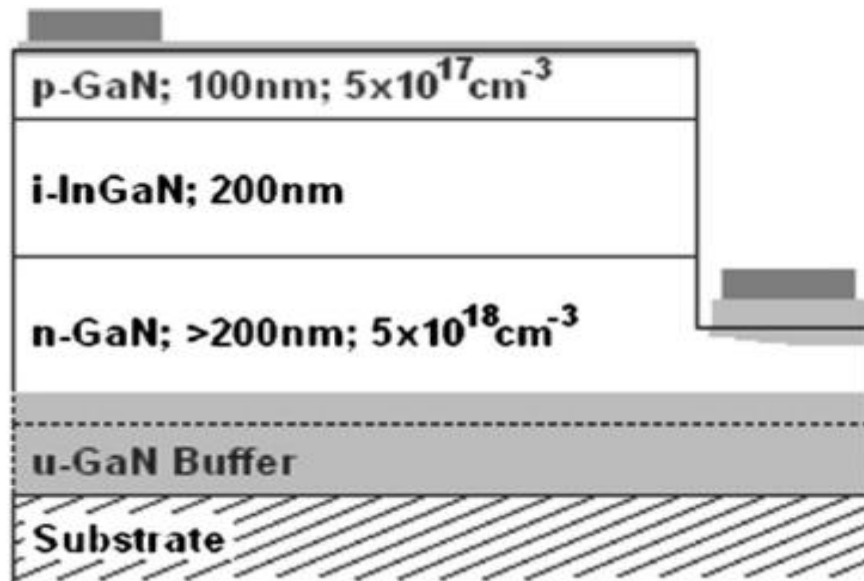


Figure (2.8) : Schéma de la cellule solaire PiN à double hétérojonctions [38]

B - Multi-jonctions

La technologie des cellules multi-jonctions permet d'optimiser l'absorption du spectre solaire et ainsi d'obtenir de meilleurs rendements. Pour cela, plusieurs jonctions P-N, possédant des gaps d'énergie différents, sont empilées. Les cellules du haut ont un gap optimisé pour les petites longueurs d'onde dans le bleu (grandes énergies). Les cellules du milieu possèdent un gap dans le visible ou le proche infrarouge. Enfin, les cellules du bas ont un gap optimisé dans l'infrarouge moyen et les grandes longueurs d'onde (petites énergies). Les cellules sont connectées en série grâce à des jonctions tunnel. Le plus souvent, ces cellules sont composées de trois jonctions, mais idéalement, il faudrait un très grand nombre de jonctions afin de capter au mieux le spectre solaire. La Figure (2.8.a) présente l'absorption du spectre solaire pour une cellule triple-jonctions et la Figure (2.8.b) montre le schéma de la structure d'une telle cellule.

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

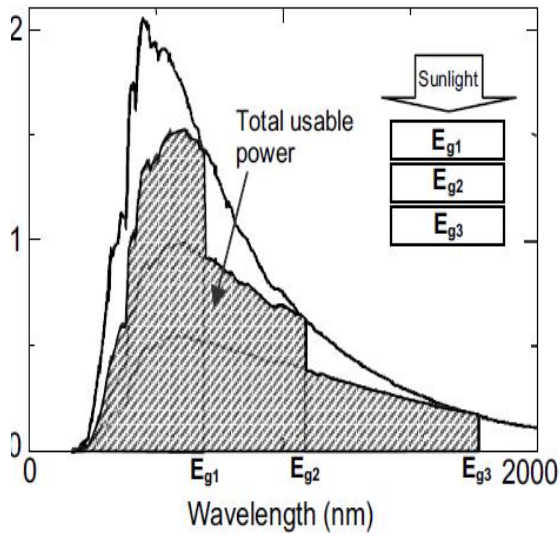


Figure (2.8.a) : Recouvrement du spectre solaire par une cellule triple-jonctions. [39]

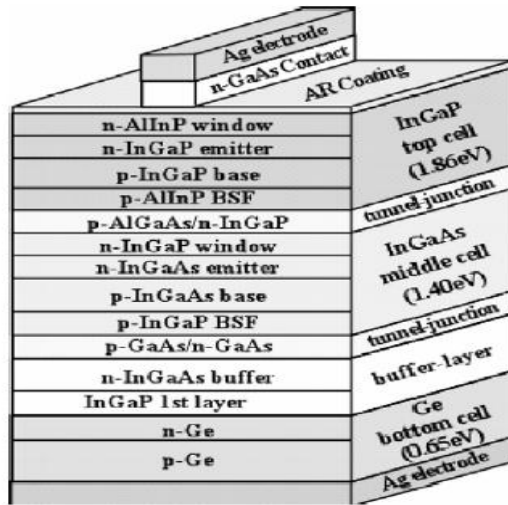


Figure (2.8.b) : schéma d'une cellule triple-jonctions. [39]

CHAPITRE 2 PHYSIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

2.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la physique, le principe de fonctionnement et l'architecture d'une cellule photovoltaïque. Nous avons aussi présenté les caractéristiques principales ainsi que les paramètres essentiels d'une cellule solaire (I_{cc} , V_{co} , η , ...).

Enfin on a abordé les cellules III-V multi-jonctions et les cellules photovoltaïques à base de InGaN.

3.1 Introduction

La simulation numérique est une série de cellules effectuées sur un ordinateur et produisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film.

Une simulation numérique peut représenter des phénomènes physiques complexes dont la description repose sur un modèle mathématique comportant des équations aux dérivées partielles.

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel MATHCAD dans nos simulations. Ce logiciel permet de réaliser des calculs scientifiques.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence de la concentration d'indium sur les caractéristiques d'une cellule solaire à simple jonction, ensuite nous considérerons une cellule à double jonctions $\text{In}_{0.5}\text{GaN} - \text{In}_{0.7}\text{GaN}$.

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

3.2.1 Irradiation d'un corps noir

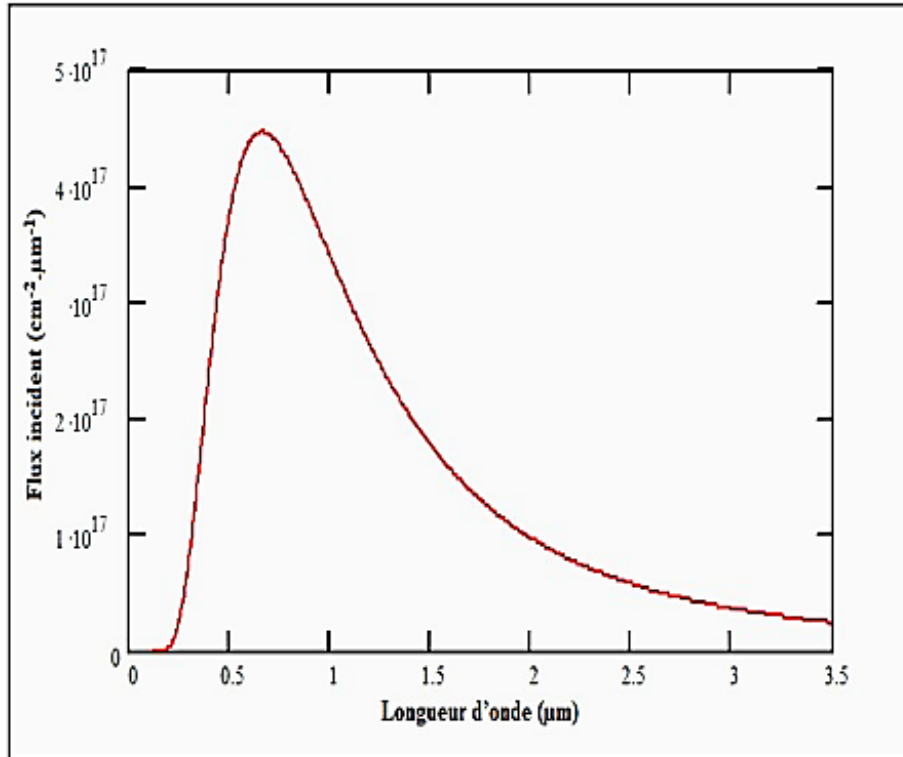


Figure (3.1) : Le flux incident F en fonction de la longueur d'onde λ
à $T = 6000 \text{ K}$.

La figure (3.1) représente le flux d'un corps noir pour une température $T = 6000 \text{ K}$. 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 $T = 6000 \text{ K}$ qui correspond à l'émission solaire hors atmosphère.

3.2.2 L'absorption

Sur la figure (3.2), 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 des photons.

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

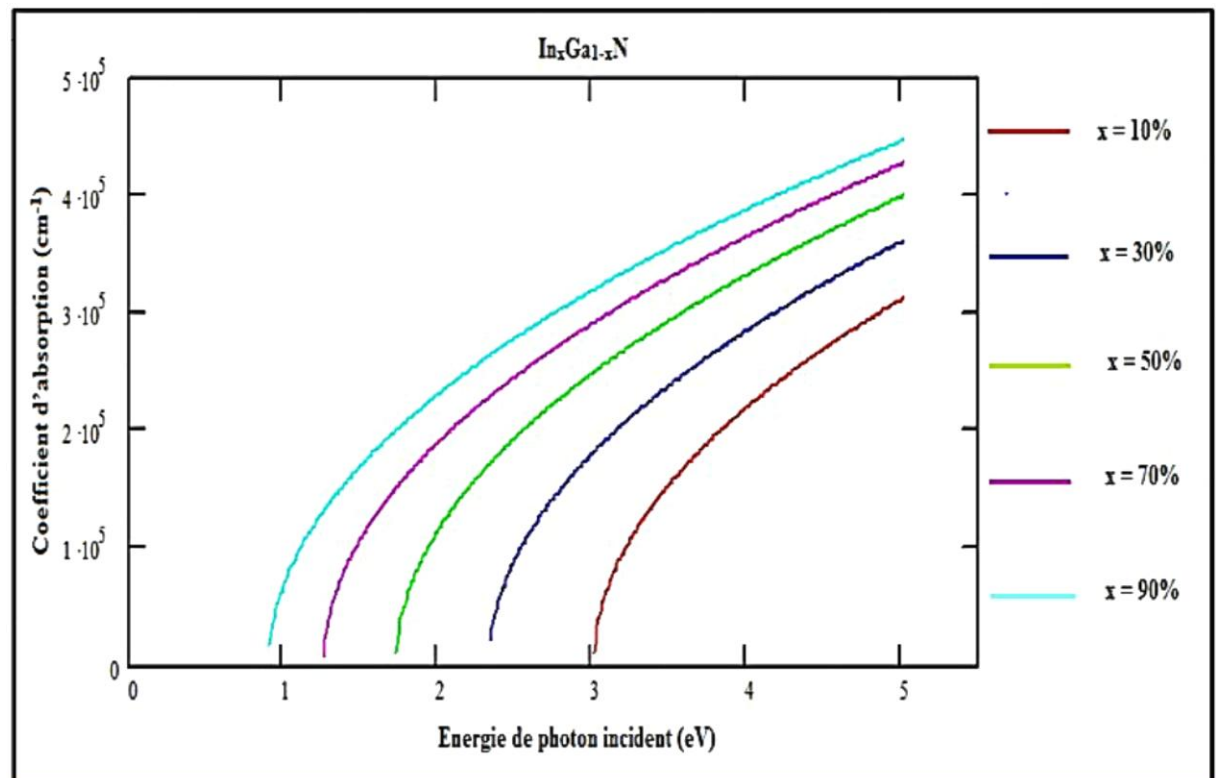


Figure (3.2) : variation du coefficient d'absorption α en fonction de l'énergie des photons incidents E .

3.3 Paramètres électriques d'une structure InGaN ensoleillée

3.3.1 Caractéristiques courant-tension

Sur la figure (3.3) sont représentés les caractéristiques courant-tension pour différents concentrations d'indium x . On constate que le courant de court-circuit I_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} varient en sens inverse, I_{cc} augmente avec la concentration d'indium alors que V_{co} diminue avec x .

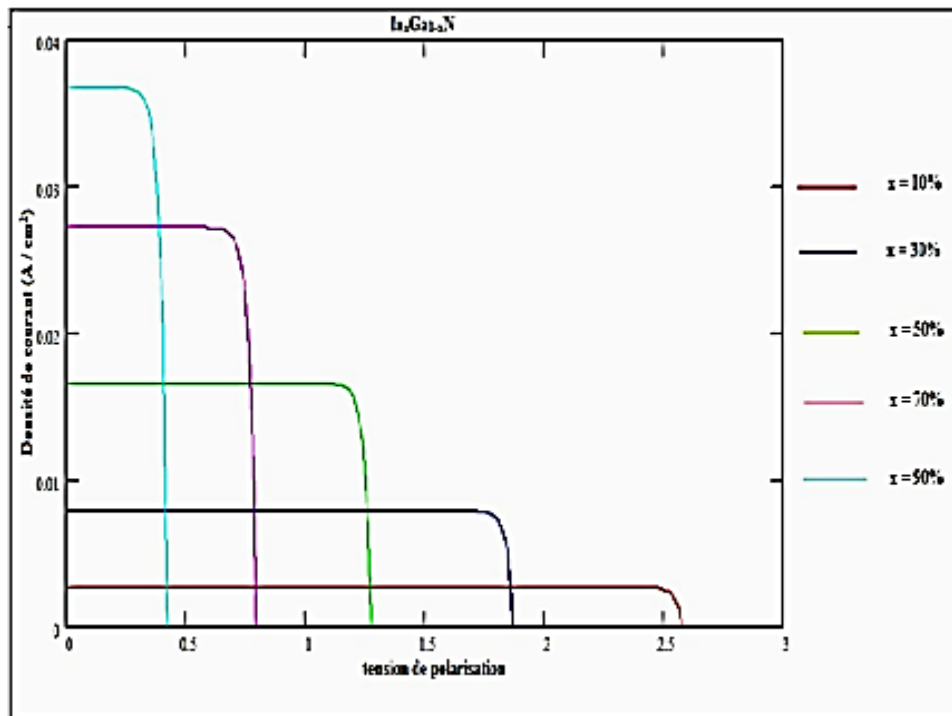


Figure (3.3) : Caractéristique courant-tension de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pour plusieurs concentrations d'indium:

$$(X_j = 10^{-5} \text{ cm et } N_a = N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3})$$

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.

3.3.2 Courant de court-circuit

Dans la structure InGa_xN, le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la concentration d'indium. I_{cc} atteint des valeurs supérieures à 0.03 A/cm² pour des concentrations d'indium de 90%.

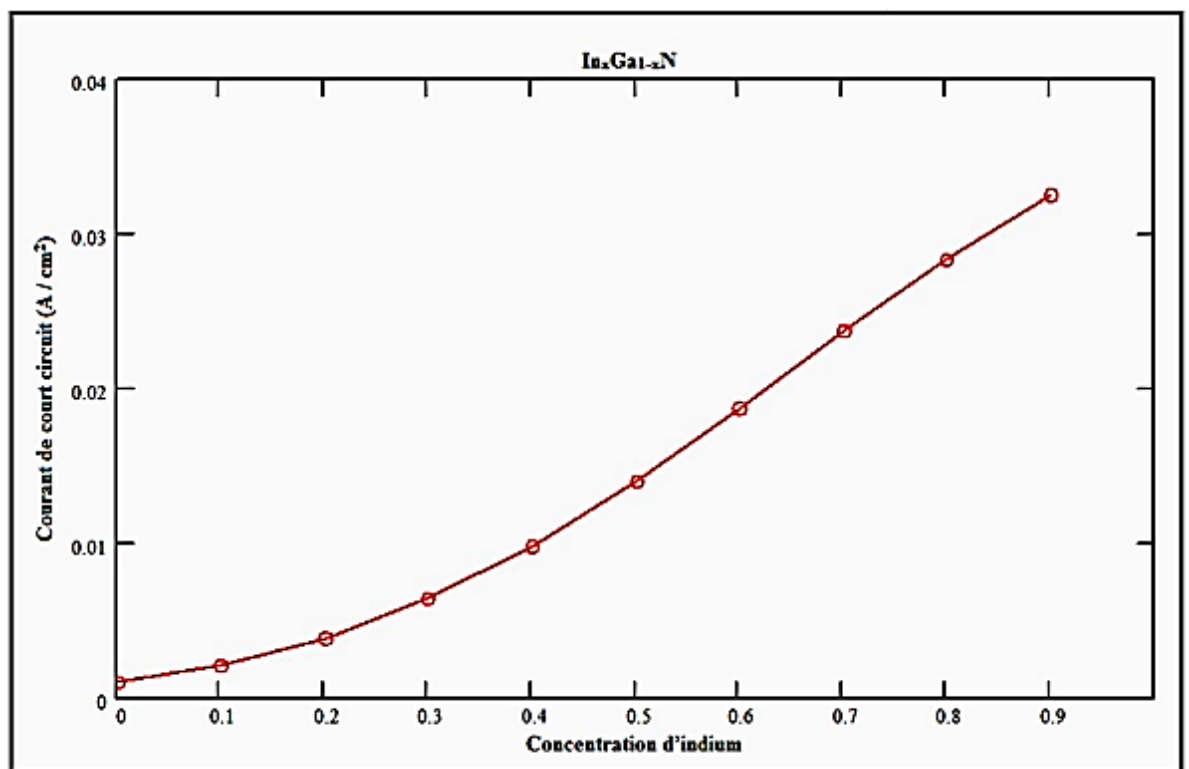


Figure (3.4) : variation du courant court-circuit I_{cc} en fonction de la concentration d'indium x .

Avec l'augmentation d'indium dans la structure In_xGa_{1-x}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.

3.3.3 Tension de circuit ouvert

La figure (3.5) représente la variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de la concentration d'indium x . L'augmentation de la concentration d'indium x induit une diminution de la tension de circuit ouvert V_{co} .

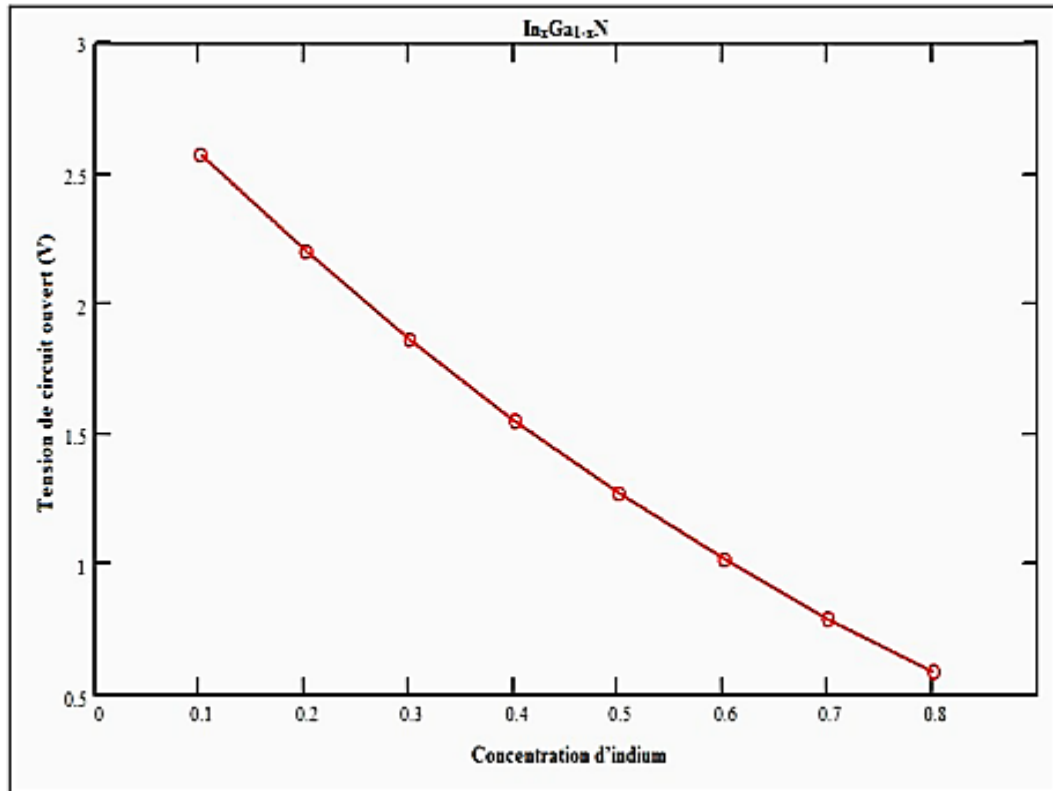


Figure (3.5) : variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de concentration d'indium x avec : ($X_j = 10^{-5} cm$ et $Na = Nd = 5.10^{17} cm^{-3}$).

3.3.4 Puissance et Puissance maximale délivrée

Sur la figure (3.6) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension pour différentes concentration d'indium x . Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales P_{max} .

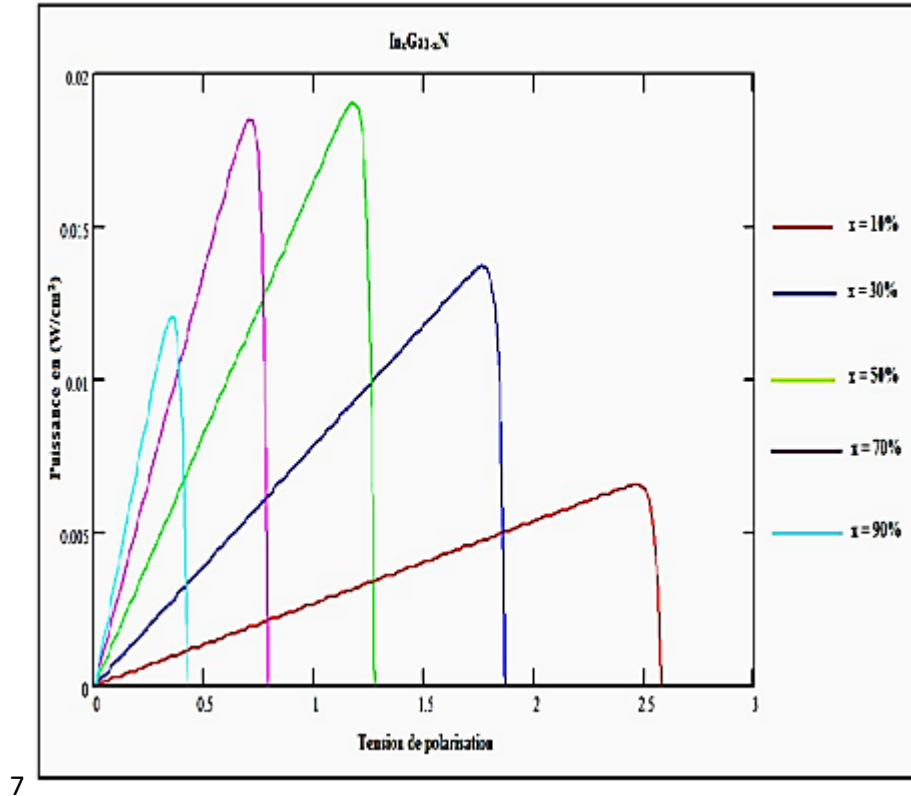


Figure (3.6) : puissance délivrée par la cellule pour plusieurs concentrations d'indium de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

La variation de la puissance maximale P_{max} en fonction de la concentration d'indium x , est représentée sur la figure (3.7). La puissance maximale atteint sa valeur optimale pour une concentration d'indium x de l'ordre de 60%.

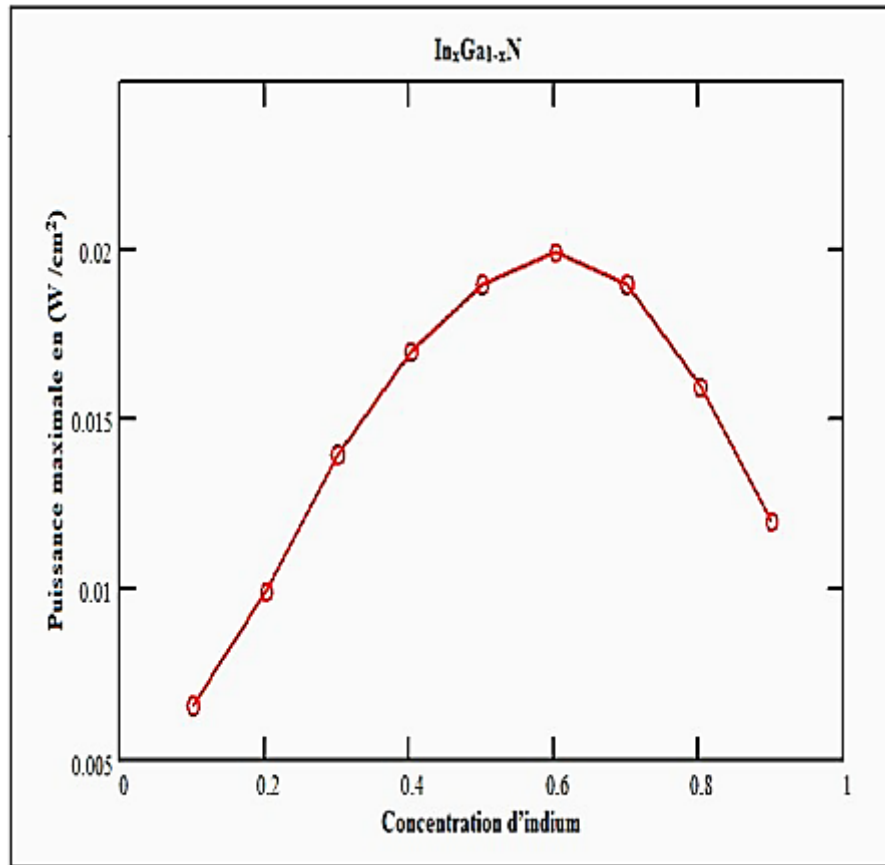


Figure (3.7) : Variation de la puissance maximale P_{max} en fonction de la concentration d'indium x .

3.3.5 Facteur de forme

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

La figure (3.8) illustre une simulation du facteur de forme en fonction de la concentration d'indium, on remarque qu'un pourcentage de presque 92% a été atteint avec 30 à 40% de concentration d'indium, mais des valeurs plus élevées de ce dernier provoque une diminution du facteur de forme.

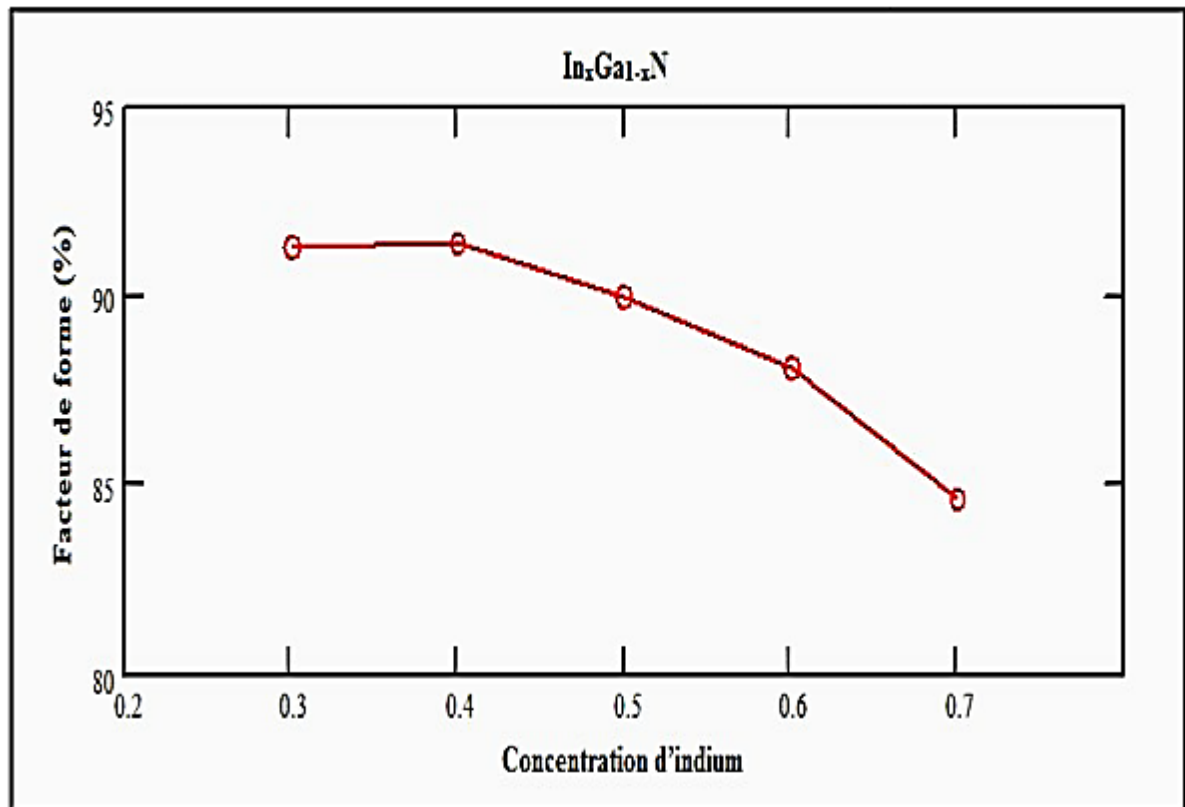


Figure (3.8) : variation du facteur de forme FF en fonction de la concentration d'indium x.

3.3.6 Le rendement

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure (3.9) qui présente la simulation du rendement de la structure étudiée en fonction de la concentration d'indium. Le rendement atteint une valeur maximale de 17.9%, pour une concentration d'indium $x=60\%$.

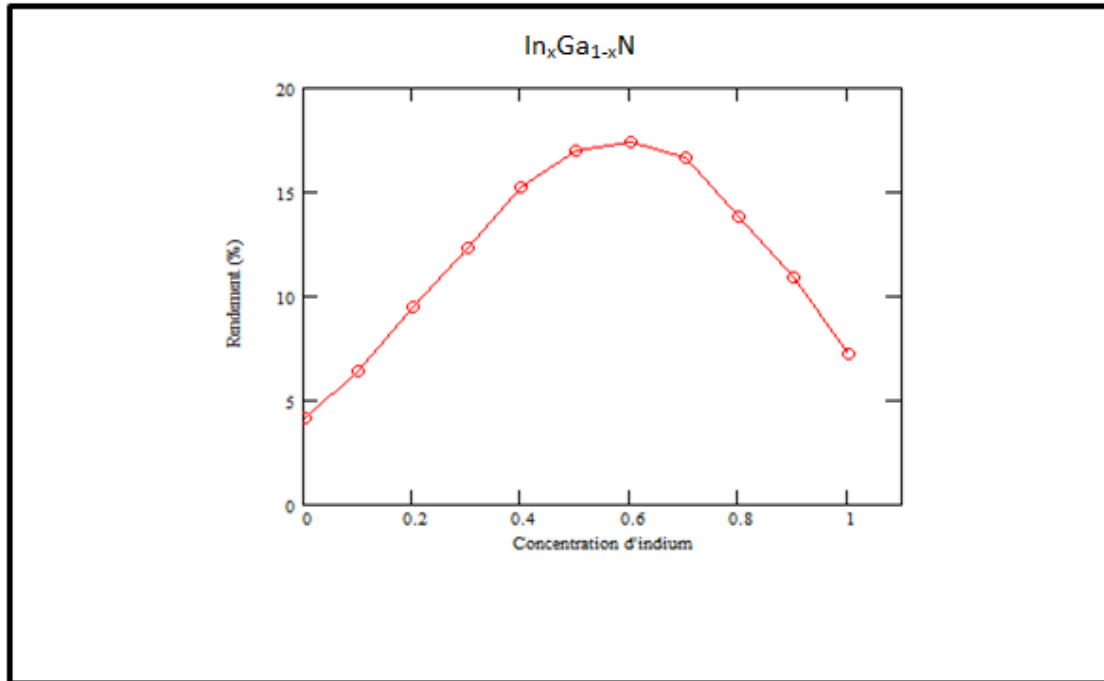


Figure (3.9) : Représentation du rendement de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de la concentration d'indium.

Une jonction de structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ avec un rendement théorique de 17.9% est importante pour une 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'onde du spectre solaire.

3.4 Cellule solaire à double jonctions

La figure (3.10) montre une représentation graphique d'une cellule solaire à double jonction à base de InGaN.

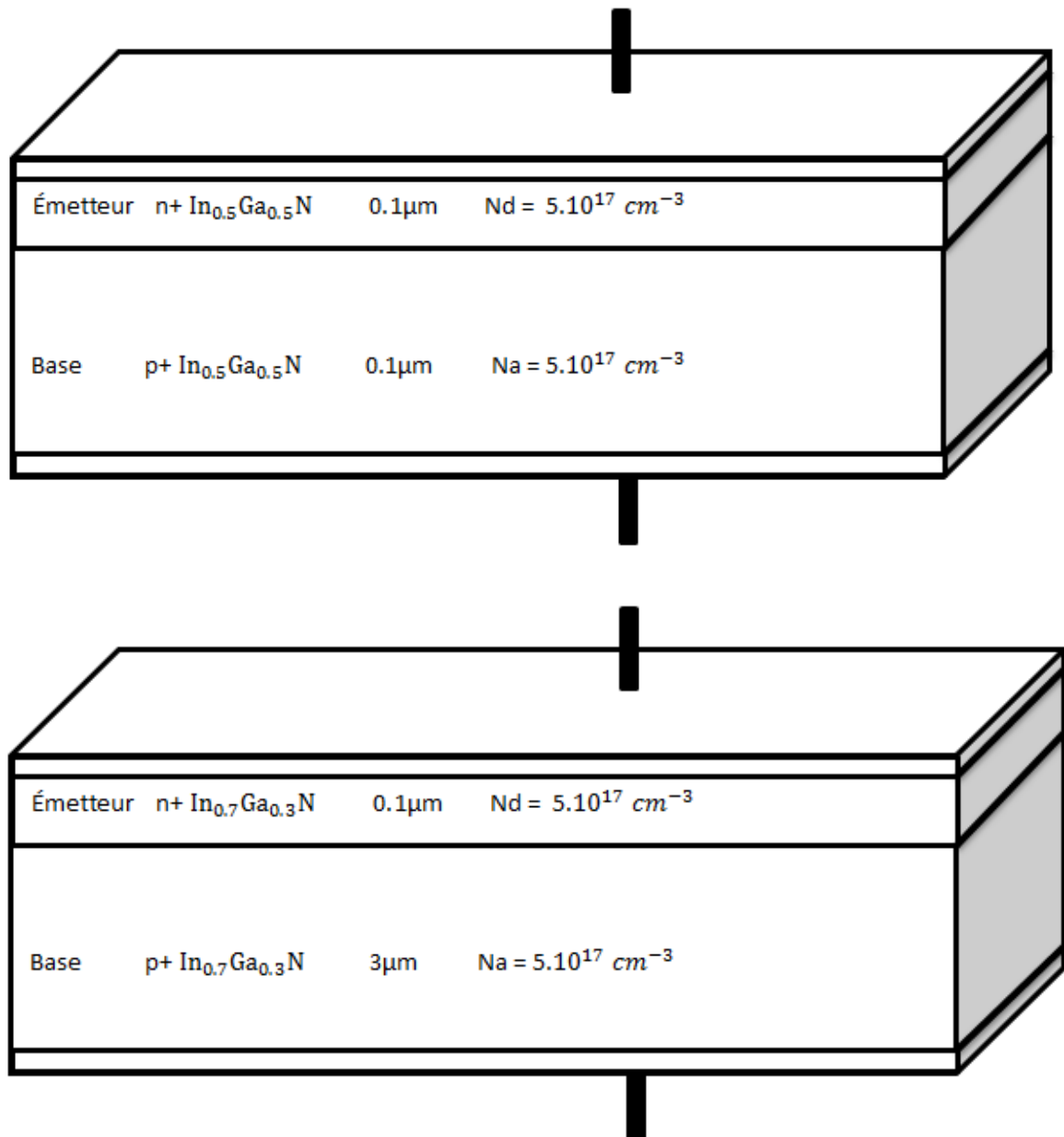


Figure (3.10) : Cellule solaire à double jonctions à base de InGaN

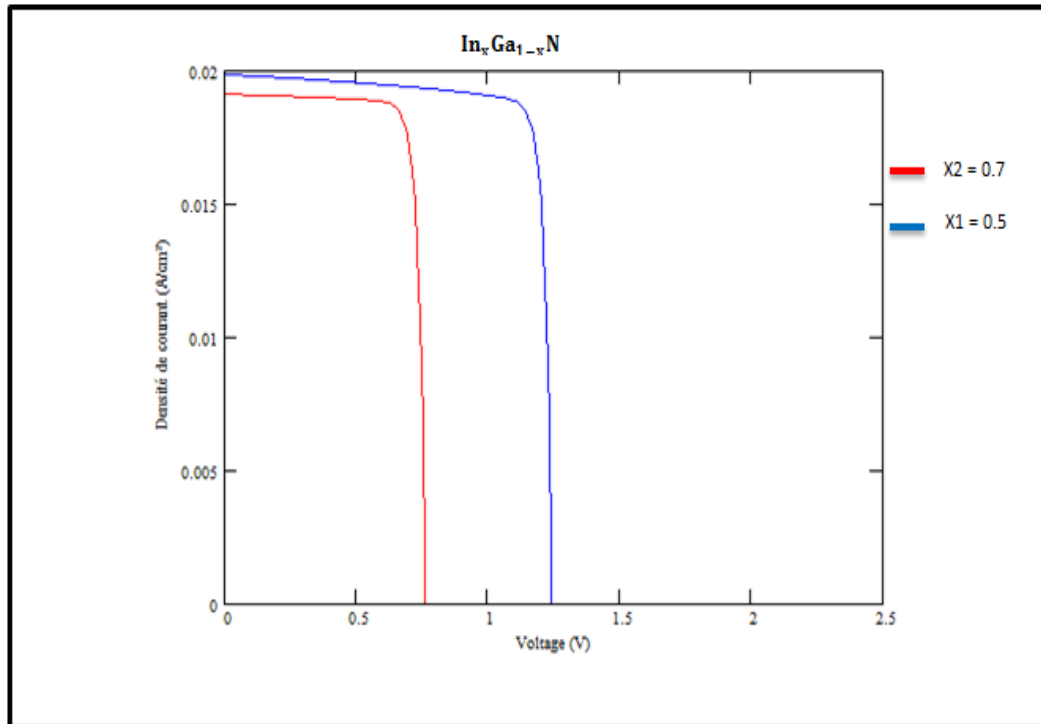


Figure (3.11) : caractéristiques courant tension des deux jonctions d'une cellule à double jonctions.

Les caractéristiques courant-tension des deux jonctions de la double jonction sont représentées sur la figure (3.11). La caractéristique courant-tension de la cellule à double jonction est obtenue en additionnant les tensions de chacune des cellules pour chacune des valeurs de courant. Le courant de court-circuit est le minimum des courants de court-circuit et la tension de circuit ouvert est la somme des tensions de circuit ouvert des deux cellules.

Matériau	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	Facteur de forme	Rendement
$In_{0.5}Ga_{0.5}N$ $In_{0.7}Ga_{0.3}N$ Double jonctions	19	2	88%	24,8%

Tableau 3.1 : caractéristiques de la cellule à double jonctions.

Le tableau 3.1 regroupe les caractéristiques obtenues par simulation d'une cellule à double jonction $In_{0.5}GaN - In_{0.7}GaN$.

Le rendement de conversion a été amélioré et est passé de 17.9% pour une seule jonction à 24.8% pour une double jonctions. Cette amélioration devrait suffire à poursuivre le développement de cellules solaires à InGaN.

3.5 Conclusion

Les simulations réalisées dans ce chapitre montrent que pour une cellule à simple jonction, le rendement est maximum de l'ordre de 18 %. Pour ce qui est de la cellule à double jonction $\text{In}_{0.5}\text{GaN} / \text{In}_{0.7}\text{GaN}$ le rendement a été amélioré et est de l'ordre de 25 %.

Les annexes

A-1 Paramètres physiques de la structure InGaN

Paramètre	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
$d (cm)$	3×10^{-4}
$X_j (cm)$	1×10^{-6}
$N_a (cm^{-3})$	5×10^{17}
$\tau n (ns)$	6,5
$\tau d (ns)$	6,5
$b (eV)$	1,43

Bibliographie

- [1] P.PAPET " Nouveaux concepts pour la realization de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats mince en silicium cristallin ". These de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [2] www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf.
- [3] H.REEVES , " Mal de Terre ", science ouverte, éditions du seuil, mars 2003.
- [4] OBSERV'ER, " Baromètre du Solaire Photovoltaïque ", Système Solaires, Avril 2004, N° 160, pp.68-83.
- [5] *BALDOMERO Garcia, "Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using Silvaco Atlas", Master's Thesis. Naval Post Graduate School, Monterey, California: 2007.*
- [6] [jcboulay.free.fr/astro/sommaire/astronomie/univers/galaxie/etoile/systeme_solaire/soleil/ page_soleil.htm.](http://jcboulay.free.fr/astro/sommaire/astronomie/univers/galaxie/etoile/systeme_solaire/soleil/page_soleil.htm)]
- [7] N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF
- [8] <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/images/Solar/Events/erupt2.jpg>
- [9] R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979
- [10] Anne Labouret , Michel Villos , Energie solaire photovoltaïque .Edition Dunod Paris, 2005.
- [11] Retscreen, Photovoltaic Background, International Renewable energy decision support centre, Resources Canada 2001-2002.

- [12] D.R. di Valdalbero : ‘La recherche énergétique européenne : pont de coopération sur la Méditerranée’. Liaison Énergie-Francophonie, N°71 (Énergie et développement durable en Méditerranée), 2e Trimestre 2006, Pages 71-76.
- [13] Energie solaire, les machines élévatoires, archives document FAO, dpt du développement durable.
- [14] V.GORGE, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012.
- [15] R Sekuler : Perception, New York, 1985.
- [16] S.R Wenham, M.A Green , M.E Watt Corkish : APPLIED PHOTOVOLTAICS Second Edition, page 04 , 2007.
- [17] Thibaut Desrues « développement cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière » . Thèse de doctorat, l’institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009
- [18] Pétibon Stéphane «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de l’énergie pour les applications photovoltaïques » .Thèse de doctorat, Université de Toulouse,2009 .
- [19] Gorczyca Svane, N.E Christensen: Theory of point defects in GaN, AlN, Physical Review, Vol. 60, 1999.
- [20] I. Vurgaftman et J.R. Meyer, *J. Appl. Phys.* 94, 3675 (2003)
- [21] X. Wang, A. Yoshikawa, *Crystal Growth and Characterization of Materials* 48/49, 42 (2004)
- [22] L. Liu et J.H. Edgar, *Mat. Sci. Eng. R* 37, 61 (2002)

- [23] V.GORGE, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012.
- [24] Pousse, A., Atkins, P. and Jones, L. Chimie molécules, matière, métamorphoses. 3ème édition. Paris : De Boeck Université, 1998. p. 255 à 257.
- [25] L.Vegard, *Z.Phys.* 5, 17 (1921)
- [26] J.C. Phillips, << *Bonds and bands in semiconductors* >>, Academic Press, New York and London (1973)
- [27] M.A Green : Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 65, 9, 2001
- [28] C. F. Klingshirn : *Energy Materials and Solar Cells*, 2001.
- [29] M.A Green : *Solar Energy Materials and Solar* , Vol 65, 2001
- [30] www.sanyosolar.eu/en/products/hit-nxxxse10/.
- [31] www.energie douce.com/conseils-faq-panneaux-solaires-photovoltaïques-faq.
- [32] Roshanak Radbeh « Réalisation et caractérisation des cellules solaire organiques à couche composites polymères incluant des nanotubes de carbones » Thés de Doctorat. Université de Limoges 2008.
- [33] Petibon Stéphane « Nouvelle architectures distribuées de gestion et de L'nergie pour Les applications photovoltaïques » Thèse de doctorat .Université de Toulouse 2009.
- [34] www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/detailed-balance.

- [35] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2008, 16, 61
- [36] Neufeld, C.J., et al. High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap. *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 93, 143502.
- [37] Dahal, R., et al. InGaN/GaN multiple quantum well solar cells with long operating wavelength *Applied Physics Letters*. 2009, Vol. 94, 063505
- [38] Yamamoto, A., et al. Recent advances in InN-based solar cells: status and challenges in InGaN and InAlN solar cells. *Physica Status Solidi C*. 2010, Vol. 7, 1309.
- [39] Yamaguchi, M., et al. Novel materials for high-efficiency III–V multi-junction solar cells. *Solar Energy*. 2008, Vol.82 :173