

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

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

Intitulé :

SIMULATION ET OPTIMISATION D'UNE CELLULE SOLAIRE A BASE D'INGAN À HAUT RENDEMENT

Présenté par :

- Cherif nor el islam
- Rezzougui mohammed aymen
- Kaddour oussama

Soutenu le : devant le Jury :

<i>M. M. Brahimi</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Amara Zeyneb</i>	<i>MAB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. Khattou Abderrahim</i>	<i>DR.</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>
<i>M. I. Taibi</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitude à dieu qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

*Nous remercions nos encadreurs ***Dr. Amara Zeyneb*** *** Dr. Khetou Abderrahim*** ***Dr. Amara Lahcen*** pour le effort qu'ils ont déployés, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger.*

Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui ont contribué à notre formation universitaire.



Dédicace

*Nous consacrons CE MODESTE TRAVAIL A :
Nos chers parents*

*Nos sœurs et nos frères
Toute nos familles Tous
nos amis*

*Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour
être un jour licencié d'électrotechnique*

Sommaire

Remerciment.....	
Didicase	
Bibliographie.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Notation mathématique.....	
Resumé.....	

Introduction générale

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

I.1. Introduction	3
I.1. Energie solaire	3
I.2. Soleil	3
I.3. Spectre solaire	4
I.4. Conversion photovoltaïque.....	5
I.5. Cellule photovoltaïque.....	6

I.6. Architecture d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.7. 1. Cellule photovoltaïque ideale.....	9
I.7. 2. Cellule photovoltaïque réelle.....	10
I.7.3. Modèle à une seule diode.....	11
I.7.4. Modèle à deux diodes	12
I.7.5. Modèle explicite.....	12
I.7.6. Modèle à quatre paramètres.....	13
I.8. Différentes structures des cellules photovoltaïques.....	13
I.8.1. Cellules à base de silicium cristallin	13
I.8.2. Cellules photovoltaïques en couches minces	14
I.8.3. Cellules photovoltaïques organiques.....	14
I.9. Regroupement des cellules.....	15
I.9.1. Regroupement en série.....	15
I.9.2. Regroupement en parallèle.....	16
I.9.3. Regroupement (série et parallèle).....	17
I.10. Secteurs d'applications.....	17
I.10.1. Domaine spatial.....	17
I.10.2. Habitation isolée.....	17
I.10.3. Centrale de puissance.....	18
I.10.4. Résidence urbaine.....	18
I.10.5. Biens de consommation.....	19

I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques.....	19
I.11.1. Inconvénients.....	19
I.11.2. Avantages.....	19
I.12. Utilisation.....	20
I.13. Conclusion.....	20

C *hapitre II : Cellules photovoltaïques InGaN à haut Rendement*

II.1. Cellules solaires photovoltaïques	22
II.1.1. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	22
II.1.1.1. L'effet photovoltaïque.....	23
II.1.1.2. Les paramètres de la cellule solaire.....	25
II.1.1.3. Le rayonnement solaire.....	27
II.1.1.4. De la cellule au module.....	28
II.1.2. Les filières photovoltaïques	29
II.1.2.1. Les filières à base de silicium cristallin	29
a) Les cellules au silicium monocristallin.....	30
b) Les cellules au silicium multi cristallin.....	30
c) Les cellules au silicium amorphe.....	31
II.1.2.2. Les couches minces	31

a) Les couches minces inorganiques.....	31
b) Les couches minces organiques	32
c) Les couches minces à base de matériaux III-V.....	33
II.2. Le Nitrure de Gallium Indium (<i>InGaN</i>).....	35
II.2.1. Les propriétés structurales.....	35
II.2.1.1. La structure cristallographique.....	35
II.2.1.2. La polarization.....	36
II.2.1.3. Les propriétés optiques du matériau.....	40
II.2.2. Les propriétés électriques.....	42
II.2.2.1. L'expression du gap <i>de l'In_xGa(1 - x)N</i>	42
II.3. Cellules solaires à base d' <i>InGaN</i>	42
II.3.1. Cellules solaires à simple jonction.....	43
II.3.2. Cellules solaires à multi –jonction.....	44

C

hapitre III : Résultats et discussion

III.1. Introduction.....	48
III.2. Logiciel de simulation wxAMPS.....	48
III.2.1. Utilisation du logiciel wxAMPS.....	48
III.2.2. Caractéristiques du logiciel wxAMPS.....	49
III.2.3. Dialogue	50

III.2.3.1. Conditions environnementales	50
III.2.3.2. Propriétés du matériau de chaque couche	51
III.2.3.3. Paramètres de modélisation	52
III.3. Optimisation des paramètres influençant sur les caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire à base d'InGaN	53
III.4. L'effet des paramètres sur les performances de la cellule solaire...	56
III.4.1. L'effet de l'épaisseur de la couche (p).....	56
III.4.2. L'effet de l'épaisseur de la couche (n).....	58
III.4.3. L'effet de la composition du dopage (p)	60
III.4.4. L'effet de la composition du dopage de la couche (n).....	62
III.5. Caractéristique courant-tension de la cellule solaire $\text{In}_{0.52}\text{G}_{0.48}\text{N}$	64
III.6. Le rendement quantique de la cellule solaire $\text{In}_{0.52}\text{G}_{0.48}\text{N}$	65
III.7. Conclusion.....	66

C

onclusion générale

Conclusion générale.....	67
--------------------------	----

BIBLIOGRAPHIES

I

ntroduction générale

- [1] British Petroleum. BP statistical review of world energy. London : British Petroleum, 2017. 1
- [2] I. S. E. Fraunhofer. Photovoltaics report. Fraunhofer ISE, Freiburg, 2017. 1, 12, 13, 15
- [3] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop. Solar cell efficiency tables (version 48). Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 24(7) :905–913, July 2016. 1, 2, 14, 15, 16, 17, 89, 90, 110, 111
- [4] William Shockley and Hans J. Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. Journal of applied physics, 32(3) :510–519, 1961. 1

C

hapitre I Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

- [1] F.GHALEB, K. Eddine BENDJBAR & S. HAOUARI « Polycopié des Travaux Pratiques : LUMIERE ET CELLULE SOLAIRE -Faculté de Physique Licence L3 : Energie Renouvelable 2014-2015.
- [2] DIB W.Née KAZI-TANI « Modélisation Des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux Et Appliqués » Thèse Doctorat. Tlemcen, 2010/2011.
- [3] BorniAbdelhalim"Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire", Mémoire magistère Constantine, 2009.
- [4] J. Royer,T. Djiako,E. Schiller,B. SadaSy, "Le pompage photovoltaïque" , Manuel decours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa /EIER/CREPA.Canada, 1998. [5] B. Wafa S. SAMAH, « étude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque " Mémoire ingénieurs.Biskra, 2006

[6] B. Omar, C. Idris, " L'intégration du photovoltaïque Au Réseau électrique Problèmes et Perspectives", Mémoire ingénieurs. Biskra, 2006.

[7] R.Chenni, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire ", thèse Doctorat, Constantine, 2007

[8] K. Benlarbi, "Optimisation floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque entraîné par différentes machines électriques : machine à induction, machine synchrone à aimants permanents et machine à courant continu ", Thèse de Magister, Batna, 2001.

[9] Benahmed Benabdallah Nadia : «PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SEMI - CONDUCTEURS (Si monocristallin et Ge) ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES A BASE DE Si et SiGe», Thèse de Magister, 2006, Université Abou Bekr Belkid de Tlemcen.

[10] Le baromètre du photovoltaïque. Systèmes solaires no154, (2003), pp. 41-52.3

[11] Communiqué de presse du NREL, 24 mars 2008, « Record Makes Thin-Film Solar Cell Competitive with Silicon Efficiency». www.nrel.gov/news/press/2008/574.html

[12] CLAVERIE.A, « Etat de l'art mondial de la technique photovoltaïque et politiques de promotion ». Séminaire sur l'Electricité Photovoltaïque, Nice, 1994, p.13

[13] MATHIEU.H, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques ». Paris : Ed.Masson, 1990, p.458-473

[14] ORGERET.M, « Les piles solaires, le composant et ses applications ». Paris : Ed. Masson, 1985, p.247

[15] GREEN.M.A. « Solar cell », Ed, University of New South Wales, 1992, p.336

[16] C. J. BRABEC, N. SEDAR SARICIFTCI, J. C. HUMMELEN, Adv. Funct. Mater. 11, 15 (2001)

[17] A. GOETZBERGER, C.HEBLING, Hans-Werner Schock, Materials Science and Engineering R, 40, 1 (2003)

[18] SZLUFCHIK J. ET AL « Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells». Proc. of the IEEE, vol. 85, No.5, 1997, pp. 711-729.

[19] RICAUD A. « Photopiles solaires. Lausanne, Suisse : Presse polytechniques et universitaires romandes», 1997, PP.332

[20] PHD, D.H. MCDONALD : « recombination and trapping in multicrystalline silicon solar cells », Australian National University, Canberra, Australia, May 2001.

[21] DIB W.Née KAZI-TANI «Modelisation Des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux Et Appliqués», Université Abou Bekr Belkïd De Tlemcen, 19/12/2010.

C *hapitre II : Cellules photovoltaïques InGaN à haut Rendement*

[1] British Petroleum. BP statistical review of world energy. London : British Petroleum, 2017. 1

[2] I. S. E. Fraunhofer. Photovoltaics report. Fraunhofer ISE, Freiburg, 2017. 1, 12, 13, 15

[3] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop. Solar cell efficiency tables (version 48). Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 24(7) :905–913, July 2016. 1, 2, 14, 15, 16, 17, 89, 90, 110, 111

[4] William Shockley and Hans J. Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. Journal of applied physics, 32(3) :510–519, 1961. 1

[5] Henry Mathieu and Hervé Fanet. Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, volume 5. Dunod Paris, 2001. 6, 46, 78, 79

[6] Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule. Ed. Techniques Ingénieur. 6

[7] Anne Labouret and Michel Viloz. Energie solaire photovoltaïque - 4ème édition. Dunod, October 2009. Google-Books-ID : PtaPEVAC9bgC. 9, 11

- [8] Anne Labouret and Michel Villoz. Installations photovoltaïques-5e éd. : Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau. Dunod, 2012. 11
- [9] Les différents types de cellules photovoltaïques - Médiaterre. 14
- [10] Photovoltaïque.info Centre de ressources sur les panneaux solaires et la production d'électricité Les technologies de cellules solaires photovoltaïques. 15
- [11] Woon Seok Yang, Jun Hong Noh, Nam Joong Jeon, Young Chan Kim, Seungchan Ryu, Jangwon Seo, and Sang Il Seok. High performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 348(6240) :1234–1237, 2015. 16
- [12] Le tour du monde en avion solaire. *Le Figaro*, November 2007. 18
- [13] Au Japon, le succès d'une PME lilloise dans le solaire flottant, November 2015. 18
- [14] Normandie. La première route solaire de France voit le jour, December 2016. 18
- [15] Snooz. Heli On : un chargeur solaire pour smartphone, à enrouler dans la poche, November 2015. 18
- [16] S. Pereira, M. R. Correia, E. Pereira, K. P. O'Donnell, E. Alves, A. D. Sequeira, N. Franco, I. M. Watson, and C. J. Deatcher. Strain and composition distributions in wurtzite InGaN/GaN layers extracted from x-ray reciprocal space mapping. *Applied physics letters*, 80(21) :3913–3915, 2002. 19, 123
- [17] Feng Shi. GaN Nanowires Fabricated by Magnetron Sputtering Deposition. 2011. 20
- [18] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, and others. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures. *Journal of applied physics*, 85(6) :3222–3233, 1999. 20
- [19] F. Bernardini and V. Fiorentini. Nonlinear behavior of spontaneous and piezoelectric polarization in III-V nitride alloys. *physica status solidi(a)*, 190(1) :65–73, 2002. 21, 22
- [20] I. Vurgaftman and J. R. Meyer. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 94(6) :3675–3696, 2003. 21

[21] Fabio Bernardini, Vincenzo Fiorentini, and David Vanderbilt. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. *Physical Review B*, 56(16) :R10024–R10027, October 1997. 21, 22

[22] Joachim Piprek. *Semiconductor Optoelectronic Devices : Introduction to Physics and Simulation*. Academic Press, October 2013. Google-Books-ID : qqVuFz1kDp0C. 23, 46, 47, 48

[23] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of applied physics*, 89(11) :5815– 5875, 2001. 23

[24] M. Anani, H. Abid, Z. Chama, C. Mathieu, A. Sayede, and B. Khelifa. InGaN refractive index calculations. *Microelectronics Journal*, 38(2) :262–266, February 2007. 24

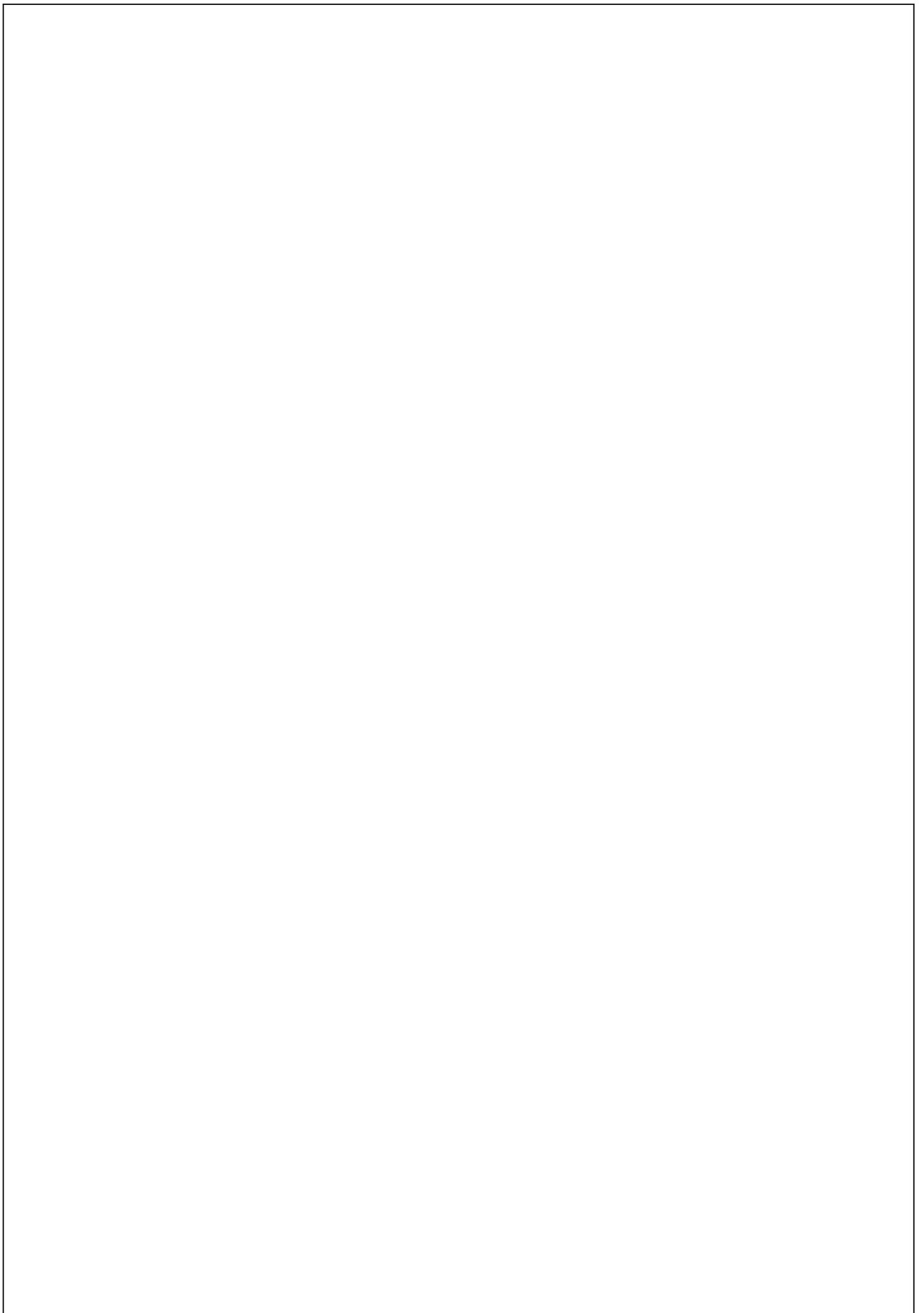
[25] M. Hori, K. Kano, T. Yamaguchi, Y. Saito, T. Araki, Y. Nanishi, N. Teraguchi, and A. Suzuki. Optical Properties of InGaN with Entire Alloy Composition on InN Buffer Layer Grown by RF MBE. *physica status solidi (b)*, 234(3) :750–754, December 2002. 24, 25

C **hapitre III : Résultats et discussion**

[1] Y. Liu, Y. Sun, and A. Rockett, “A new simulation software of solar cells–wxAMPS”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012

[2] Y. Liu, Y. Sun and A. Rockett, "A new simulation software of solar cells—wxAMPS", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 98, pp. 124-128, 2012. Available: 10.1016/j.solmat.2011.10.010 [Accessed 18 December 2020].

[3] R. Sultana, A. Bahar, M. Asaduzzaman, M. Bhuiyan and K. Ahmed, "Numerical dataset for analyzing the performance of a highly efficient ultrathin film CdTe solar cell", *Data in Brief*, vol. 12, pp. 336-340, 2017. Available: 10.1016/j.dib.2017.04.015.



Liste des figures

C

hapitre I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

Figure I.1. Spectre électromagnétique.....	4
Figure I.2. Rayonnement solaire incident.....	7
Figure I.3.Représentation de la structure d'une cellule photovoltaïque simple.....	7
Figure I.4. Semi-conducteur.....	8
Figure I.5. Modèle de cellule photovoltaïque idéale.....	9
Figure I.6. Modèle de cellule photovoltaïque réel.....	10
Figure I.7. Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.....	12
Figure I.8. Circuit équivalent du modèle à quatre paramètres.....	13
Figure I.9. Cellule solaire organique.....	14
Figure I.10. Caractéristique courant tension de Ns cellule en série série.....	15
Figure I.11. Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.....	16
Figure I.12. Schéma Estimation de la production en Fonction du générateur optimal.....	20

C

hapitre II : Cellules photovoltaïques InGaN à haut Rendement

Figure II.1. Génération de paire électron-trou. EC est l'énergie du bas de la bande de conduction et EV, l'énergie du haut de la bande valence.....	22
Figure II.2. Principe de l'effet photovoltaïque.....	24
Figure II.3 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale. I est le courant total produit par la cellule. I_{ph} est le courant photogénéré proportionnel à l'intensité de	

l'éclairage. I_d est le courant traversant la diode. V est la tension délivrée par la cellule.....	24
Figure II.4 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque. R_s Est la résistance série du circuit. R_{sh} est la résistance parallèle du circuit (shunt).....	25
Figure II.5. Caractéristiques courant-tension $I(V)$ (en trait plein) et puissance (en trait discontinu) d'une cellule solaire.....	26
Figure II.6. Évolution en laboratoire du rendement des cellules photovoltaïques.....	29
Figure II.7. Production photovoltaïque mondiale, pour la technologie silicium (2015).....	30
Figure II.8. Quelques exemples d'applications de cellules solaires photovoltaïques.....	34
Figure II.9 .Structures <i>crisatllines</i> et les séquences d'empilement des plans cristallins du <i>GaN</i> . (a) structure <i>wurtsite</i> , (b) structure zinc-blende.....	36
Figure II.10. Polarisation Ga et N pour le <i>GaN</i> hexagonal.....	37
Figure II.11. Génération de la densité surfacique de charge (σ) par la polarisation spontanée dans un cristal <i>GaN wurtzite</i> polarité gallium.....	37
Figure II.12.Orientation de la polarisation piézoélectrique et de la polarisation spontanée d'une couche d' <i>InGaN</i> polarité Gallium contrainte en tension a) et contrainte en compression.....	39
Figure II.13. Courbes d'absorption de couches d' <i>InGaN</i> élaborées avec différentes compositions d'indium ; a) avec des fortes concentrations d'indium, b) avec des faibles concentrations d'indium.....	41
Figure II.14. Schéma de la cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al.....	46
Figure II.15. Schéma de la cellule solaire multi jonction proposée par Young et al.....	46

haptre III : Résultats et discussion

Figure III.1. Icône du logiciel AMPS sur PC.....	49
Figure III.2. Page d'accueil de l'interface utilisateur.....	50

Figure III.3. Interface des conditions environnementales.....	51
Figure III.4. Boîte de dialogue pour la saisie des paramètres du matériau.....	52
Figure III.5. Interface de l'exécution.....	52
Figure III.6. Boîte de dialogue pour progression s'affiche.....	53
Figure III.7. Caractéristiques de la cellule solaire à base $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$, a) Voc, b) Jsc, c) FF et d) η pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche (p).....	57
Figure III.8. Caractéristiques de la cellule solaire à base $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$, a) Voc, b) Jsc, c) FF et d) η pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche (n).	59
Figure III.9.1. Caractéristiques de la cellule solaire à base de $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$, a) Voc, b) Jsc, pour différentes valeurs de la concentration du dopage de la couche (p) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$	60
Figure III.9.2. Caractéristiques de la cellule solaire à base de $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$, c) FF et d) η pour différentes valeurs de la concentration du dopage de la couche (p) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$	61
Figure III.10. Caractéristiques de la cellule solaire à base $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$, a) Voc, b) Jsc c) FF et d) η pour différentes valeurs de la concentration du dopage de la couche (p).....	63
Figure III.11. Caractéristique courant-tension de la cellule PN à base $\text{In}_{0.52}\text{G}_{0.48}\text{N}$	64
Figure III .12. Courbe du rendement quantique de la cellule solaire à base $\text{In}_{0.52}\text{G}_{0.48}\text{N}$	65

Liste des tableaux

C

hapitre I : Généralité sur les cellules solaires photovoltaïques

Tableau I.1. Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide...	5
Tableau I.2. Bandes interdites de quelques semi- conducteurs.....	8

C

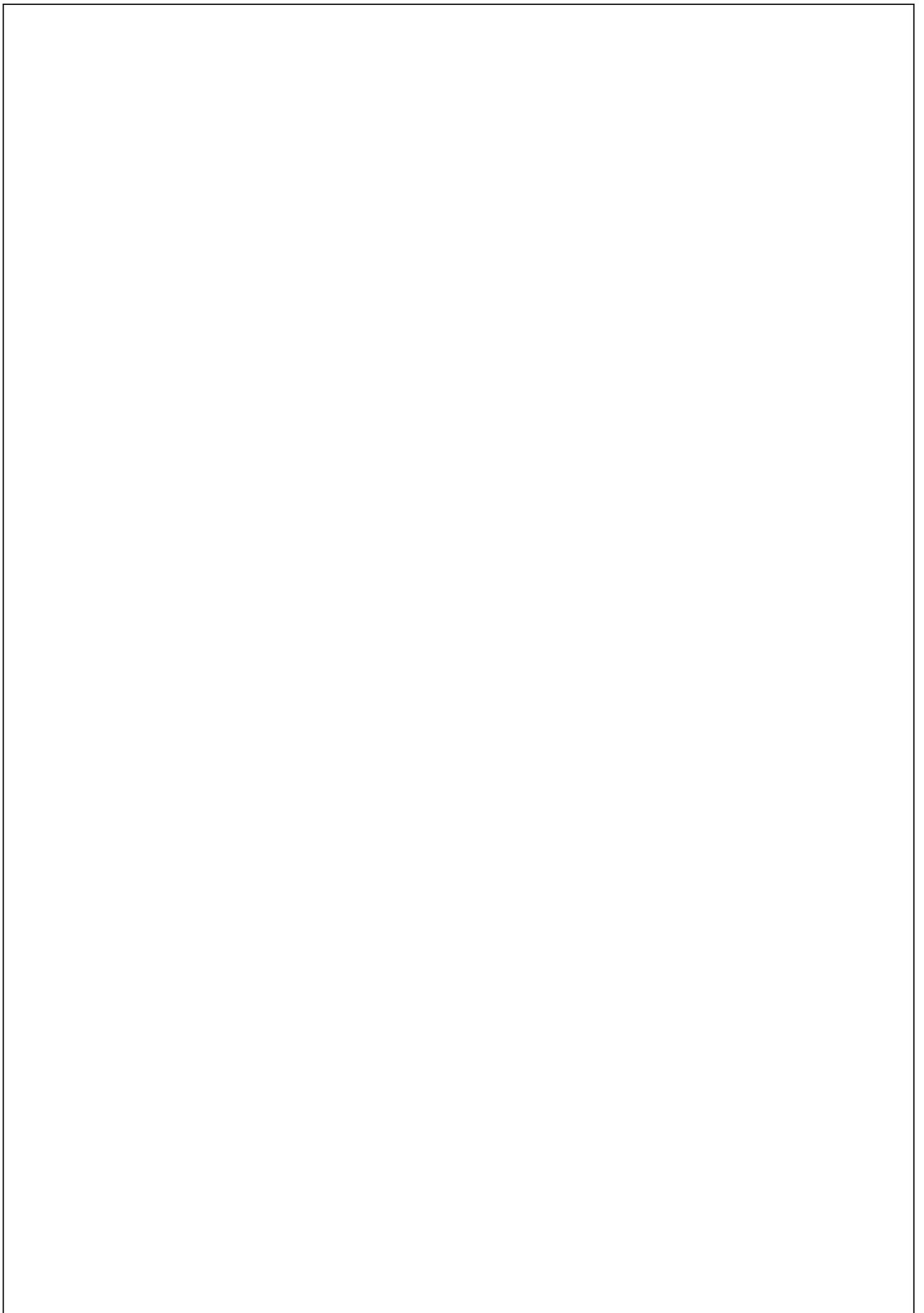
hapitre II : Cellules photovoltaïques *InGaN* à haut Rendement

TABLEAU II.1. Valeurs de la polarisation spontanée pour le <i>GaN</i> et l' <i>InN</i>	38
TABLEAU II.2 .Paramètres piézoélectriques et élastiques du <i>GaN</i> et de l' <i>InN</i>	39
TABLEAU II.4 l'état de l'art concernant les différentes structures de cellules solaires à base d' <i>InGaN</i>	45

C

hapitre III : Résultats et discussion

Tableau III.1. Paramètres de la cellule solaire utilisés dans le logiciel <i>wxAMPS</i>	55
---	----



Notations mathématiques

Notations mathématiques

E	Energie
H	Constante de Planck
γ	Fréquence
C	Vitesse de la lumière
Q	Charge élémentaire
λ	Longueur d'onde
I	Courant fourni par la cellule
I_0	Courant de saturation inverse de la diode.
I_{ph}	Densité de la photo courant
I_s	Courant de saturation de diode
I_{cc}	Courant de court circuit
I_i	Intensité incidente.
I_t	Intensité transmise.
I_{obs}	Densité de courant d'obscurité
R_s	Resistance série
R_p	Resistance parallèle
R_{th}	Resistance Thermique
R_{sh}	Resistance shunt
R_s	Réponse spectrale
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion pour la longueur d'onde λ
V_d	Tension à la borne de diode
V_t	Potentielle thermique.
V_m	Tension mesurée a une puissance maximale
Q	Charge d'électron
N	Facteur de qualité de diode

Notations mathématiques

T	Température de cellule en kelvin
K	Constante de Boltzmann
E _g	Gap d'énergie interdite
N _c	Densité d'état pour la bande de conduction
N _v	Densité d'état pour la bande de valence
A	Constante empirique
A ₀	Constante
B	Constante associée à la température
L	Longueur de diffusion
τ	Temps de vie de porteur
N	Indice de réfraction
D	Coefficient de diffusion
$a(\lambda)$	Coefficient d'absorption
P	Pression
$a(E)$	Coefficient d'absorption en fonction de l'énergie des photons
α_0	Paramètre d'ajustement
E _{NBE}	Le niveau de la bande interdite
EQE	Rendement quantique externe
IQE	Rendement quantique interne
m _e	Masse d'un électron dans la bande de conduction
V _{oc}	Tension de circuit ouvert
J _{sc}	Courant de court circuit
FF	Facteur de forme
η	Rendement de conversion
QE	Rendement quantique
$u_i(N)$	Mobilité des charges porteuses

Notations mathématiques

ε_r Permittivité relative

N_a Concentration des atomes accepteurs.

N_d Concentration des atomes donneurs.

Introduction générale

Dans le secteur du photovoltaïque, les attentes sont nombreuses : augmentation de l'efficacité de conversion, diminution des coûts de production, diminution de l'impact environnemental, etc. Actuellement, la filière est largement dominée par la technologie silicium cristallin avec près de 93% de la production mondiale en 2016 [2]. Cependant, la production des cellules solaires à base de silicium reste coûteuse et nécessite une importante quantité de matériau. En outre, les cellules en silicium présentent actuellement en laboratoire, un rendement maximal de 25,6% [3], ce qui est très proche de la limite théorique maximale pour une cellule simple jonction [4]. Par conséquent, le besoin grandissant d'énergie photovoltaïque a poussé les travaux de recherche sur l'utilisation d'autres matériaux alternatifs, bien que cela ne signifie nullement l'arrêt des recherches dans la filière silicium. Aujourd'hui, ces recherches, très nombreuses et variées, se focalisent principalement sur les technologies à couches minces. Parmi ces technologies, on trouve notamment, celle à base de matériaux III-V (Matériaux composés d'éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique des éléments) , très prometteuse en termes d'efficacité. Elle détient, de nos jours, les records en rendements avec des cellules solaires à multi jonctions [3]. Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons à l'alliage de Nitrure de GalliumIndium (*InGaN*). L'alliage *InGaN* est devenu au cours des dernières années un matériau prometteur pour les applications optoélectroniques, notamment photovoltaïques. En effet, ce matériau possède de nombreux avantages, à savoir, une bande d'énergie interdite directe qui peut couvrir une grande partie du spectre solaire en modifiant le taux d'indium, un coefficient d'absorption élevé et une très bonne tolérance aux radiations. Du fait de sa large couverture spectrale, l'*InGaN* est surtout étudié (dans le domaine photovoltaïque) dans la perspective de réaliser des cellules photovoltaïques *multijonction* à très haut rendement. En effet, Il est possible d'avoir, avec le seul matériau *InGaN*, plusieurs couches ayant différentes bandes d'énergie interdites, cela en changeant seulement la composition d'indium. De ce fait, nous avons la possibilité de concevoir plus aisément les cellules solaires à multifonctions (Cellule constituée d'un empilement de plusieurs cellules absorbant chacune une partie spécifique du spectre solaire.). Cependant, malgré ces nombreux avantages, les enjeux technologiques tels que le manque de substrat adapté pour la croissance épitaxiale, la difficulté de réaliser le dopage de type P, ou encore, une incorporation d'indium relativement faible, sont autant de facteurs qui font obstacle au développement de la filière *InGaN*. Ce travail de thèse propose de conduire une investigation approfondie sur les performances de différentes structures de cellules solaires à

base d'*InGaN*. Il s'inscrit dans le cadre d'un projet visant à l'optimisation et à l'étude de cellules solaires en couches minces. Cette approche repose sur une démarche rigoureuse de simulation s'appuyant autant que possible sur des modèles et résultats empiriques. Le programme de simulation utilise le logiciel wxAMPS et le programme d'optimisation est basé sur la librairie libre d'optimisation *SciPy*. Il s'agit d'une nouvelle approche utilisant l'optimisation mathématique multi variée qui permet d'évaluer les performances des cellules solaires en optimisant simultanément plusieurs paramètres de la cellule solaire.

Le manuscrit se décompose en trois parties, comme suit :

Le premier chapitre aborde dans un premier temps le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, ses paramètres importants et les différentes filières photovoltaïques existantes.

Dans un deuxième temps ainsi que l'état de l'art de la filière photovoltaïque *InGaN*. Le deuxième chapitre présente Les propriétés d'*InGaN* et ses caractéristiques.

Le troisième chapitre est consacré à discision et interprétation des résultats.

Chapitre I

Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

I.1. Introduction

L'énergie renouvelable est une énergie aux ressources illimitées. Ces énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques en fonction des sources d'énergie récupérées et de l'énergie utile obtenue. Parmi elles, on distingue plusieurs types d'énergies renouvelables : l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, l'énergie biomasse et l'énergie photovoltaïque.

L'énergie renouvelable provient directement ou indirectement du soleil. Donc, tant que cela brille, ils peuvent être utilisés indéfiniment. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, avec les avantages d'être non polluante, flexible et fiable [2]. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec des programmes spatiaux pour les transmissions radio à partir de satellites. Ils ont ensuite utilisé des balises et des dispositifs marins dans des endroits isolés du monde entier, utilisant des batteries pour stocker l'électricité pendant des heures sans soleil [3].

I.1. Energie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par le rayonnement solaire et fait partie des énergies renouvelables. Ce type d'énergie solaire sera développé dans les paragraphes suivants.

I.2. Soleil

Le Soleil est une boule de gaz géante composée de 70 % d'hydrogène et de 28 % d'hélium, les 2 % restants représentant la plupart des autres atomes qui existent dans l'univers. Plus de 60 éléments chimiques ont été identifiés [4]. Jusqu'à présent, le soleil reste la source d'énergie la plus importante, même s'il est assez éloigné (149,6 x 10⁶ km) de la Terre. C'est une énorme sphère incandescente composée principalement de gaz ionisé, le plus gros objet du système solaire. Il est si grand qu'il peut contenir plus d'un million de Terres. La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à 90x10¹⁵ GW, alors que la couche sol ne peut recevoir que 180x10⁶ GW. L'Algérie bénéficie d'environ 3 200 heures d'ensoleillement par an, ce qui bénéficie de conditions climatiques favorables qui facilitent l'application de la technologie solaire [5]. Cette énergie peut être utilisée en abondance tout au long du processus la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol [6].

I.3. Spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, et le décomposer en longueurs d'onde s'appelle le spectre électromagnétique. Il est en effet composé de rayonnements de différentes couleurs, caractérisés par leur gamme de longueurs d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, les particules de lumière qui composent ce rayonnement, transportent l'énergie liée à leur fréquence (longueur d'onde) comme suit [7].

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où h est la constante de Planck, ν est la fréquence, c est la vitesse de la lumière et λ est la longueur d'onde. C'est cette relation qui a été mise à jour par Louis de Broglie en 1924, qui a confirmé les propriétés de la lumière particulaire et ondulatoire : l'existence de particules "photons" et la propagation d'ondes avec des fréquences vibrationnelles et des longueurs d'"ondes" Graphique I.1. Affiche la partie visible du spectre électromagnétique. Les longueurs d'onde visibles vont de **390 nm** (violet) à **780 nm** (rouge) [7].

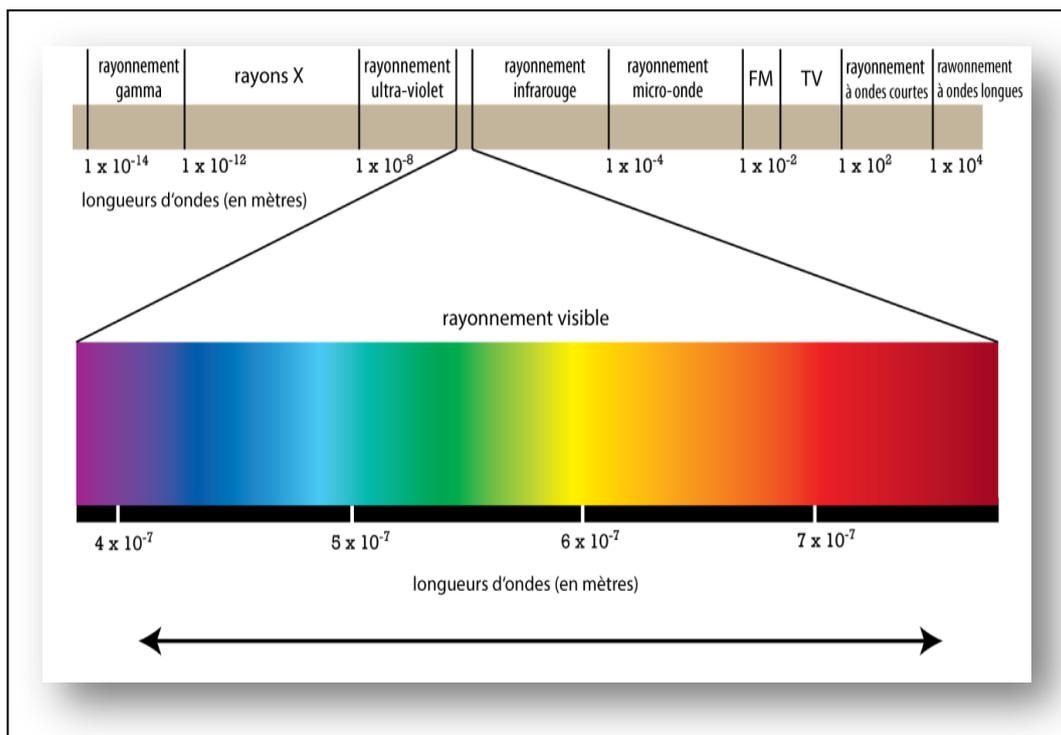


Figure I.1. Spectre électromagnétique [7].

Tableau I.1. Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide [7].

Couleur	Longueur d'ondes (nm)
Rouge	622-780
orange	597-622
jaune	577-597
vert	492-577
bleu	455-492
violet	390-455

I.4. Conversion photovoltaïque

En 1839, le scientifique français Edmund Becquerel fut le premier à découvrir l'effet photoélectrique. Il a découvert que certains matériaux génèrent une petite quantité de courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Plus tard, quand Albert Einstein a étudié l'effet photoélectrique, il a découvert que la lumière a non seulement des propriétés ondulatoires, mais aussi que son énergie est portée par des particules et des photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante : [4]

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

Plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

La conversion photovoltaïque, largement utilisée aujourd'hui, peut être simplement définie comme la conversion de l'énergie des photons en électricité par un processus dans lequel la lumière est absorbée par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par la matière, il transfère une partie de son énergie à l'électron par collision, l'arrachant à la matière. Ce dernier est auparavant dans un niveau d'énergie inférieur d'un état stable, puis passe à un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein du matériau, résultant en des paires électron-trou avec la même énergie électrique. En règle générale, les paires électron-trou reviennent rapidement à l'équilibre en convertissant leur énergie électrique en chaleur. Toute

l'énergie photonique qui ne peut pas être convertie en énergie électrique est absorbée par le matériau sous forme de chaleur. Le matériau constituant le capteur photovoltaïque présente donc une faible température interne proportionnelle à l'énergie solaire reçue et un faible taux de conversion photon-électron. Par conséquent, les effets thermiques dominent la plupart des capteurs, aggravant les performances de ces derniers. Même si les phénomènes électriques viennent juste après les phénomènes thermiques, la récupération de tout ou partie de l'énergie électrique est l'objectif principal des capteurs photovoltaïques sous forme de batteries ou de générateurs. Cela est dû, par exemple, aux cellules solaires fabriquées en combinant un matériau semi-conducteur dopé N avec un autre semi-conducteur dopé P (Figure I.2). L'énergie générée par l'absorption des photons dans le matériau est convertie électriquement

En génération de paires électron-trou. Cette réaction se traduit par une différence de répartition de charge, qui crée une différence de potentiel, qui est l'effet photovoltaïque. Le fait qu'il y ait deux types de matériaux semi-conducteurs associés pour créer une jonction permet de restaurer la charge avant qu'elle ne se recombine dans le matériau puis redevienne neutre. Ainsi, la présence d'une jonction PN permet de maintenir le courant circulant à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est ce que les applications photovoltaïques doivent savoir lors de l'estimation de l'énergie totale disponible. Les longueurs d'onde correspondant aux maxima des photons se situent autour de 650-670 nm [10].

I.5. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique semi-conducteur qui génère de l'électricité lorsqu'il est exposé au rayonnement solaire (photons), générant de l'électricité par l'effet photovoltaïque [10]. Ce rayonnement est constitué de photons dont les longueurs d'onde vont de l'ultraviolet ($0,2\mu m$) à l'infrarouge lointain ($3\mu m$), comme le montre la Figure I.3 [11].

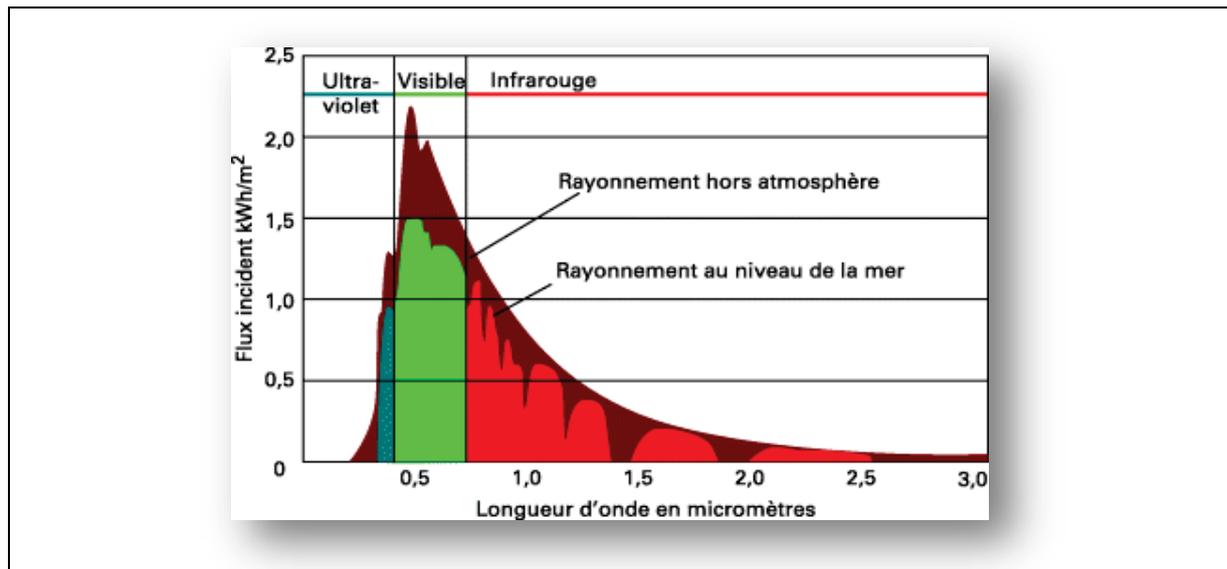


Figure I.2. Rayonnement solaire incident [11].

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la Figure I.4.

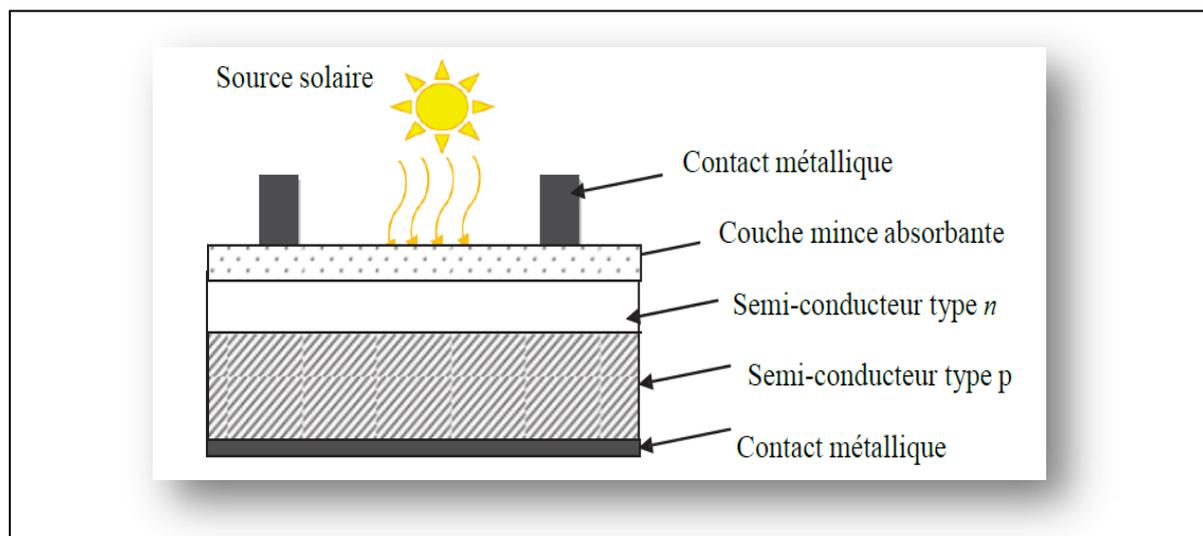


Figure I.3. Représentation de la structure d'une cellule photovoltaïque simple. [11]

Le gap d'énergie interdite peut également être défini comme la différence d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction. A 0 K, tous les électrons se trouvent dans la bande de valence. Si on apporte une quantité d'énergie supérieure au gap du matériau sous forme de lumière, de chaleur, ou autre, alors un électron peut passer de la bande de valence à la bande de conduction où il pourra participer à la conduction d'un courant électrique [12]

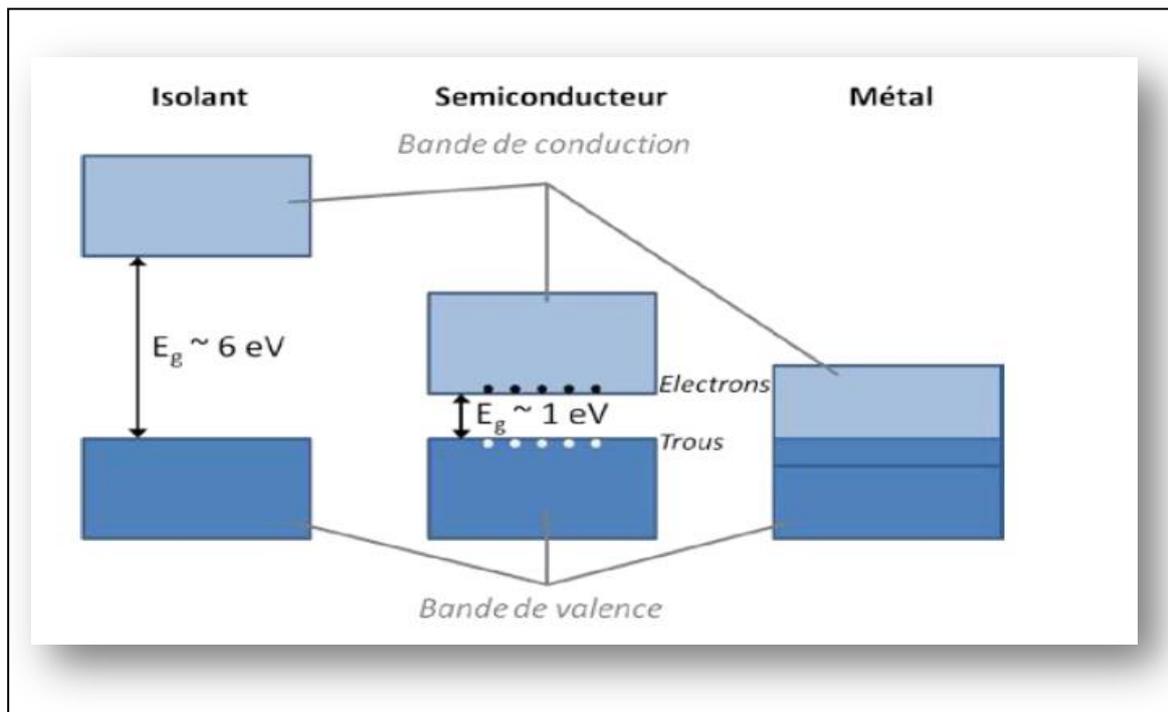


Figure I.4. Semi-conducteur [12].

La bande interdite (l'énergie de gap) E_g d'un semi-conducteur détermine comment réagit une cellule solaire à la lumière. Le tableau I.2 montre les valeurs de la bande interdite de quelques semi-conducteurs. [12]

Tableau I.2. Bandes interdites de quelques semi-conducteurs

Matériel	Bande interdite (eV) à 300K
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.42
Inp	1.34

I.6. Architecture d'une cellule photovoltaïque

De chaque côté de la jonction PN, des électrodes métalliques sont déposées pour collecter les photocharges générées. Côté réception de la lumière, les électrodes ont une forme de grille pour optimiser la collecte des porteurs de charge tout en laissant passer la lumière. Si les grilles sont trop éloignées, la lumière passera facilement, beaucoup de charges seront créées, cependant, certains des porteurs n'auront pas le temps de se rassembler avant de se recombiner. En revanche, si la grille est trop serrée, tous les porteurs peuvent être collectés, mais moins de lumière peut passer et être absorbée par le matériau, d'où moins de charge. Pour certaines technologies, des électrodes transparentes comme l'ITO (Indium Tin *Oxide*) ou le *ZnO* peuvent être utilisées. Dans ce cas, le problème de grille ne se produit plus car la couche recouvre toute la cellule. Sur la face arrière, des contacts métalliques "solides" sont déposés. Cette couche agit également comme une couche réfléchissante pour les photons, qui ne sont pas absorbés lors de leur premier passage. Pour *InGaN* et GaN, les contacts sont des alliages métalliques. L'*InGaN* de type N adopte généralement un alliage titane-aluminium-or, et l'*InGaN* de type P adopte généralement un alliage nickel-or. Pour minimiser les pertes liées aux réflexions lumineuses depuis la surface de la cellule, des couches antireflets sont le plus souvent déposées sur la face avant.

I.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

I.7. 1. Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être simplement décrite comme une source de courant idéale produisant un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec la diode représentée sur la Figure I.6, qui correspond à la région de transition p-n de la cellule photovoltaïque. Selon la loi des nœuds : [6].

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{I.3})$$

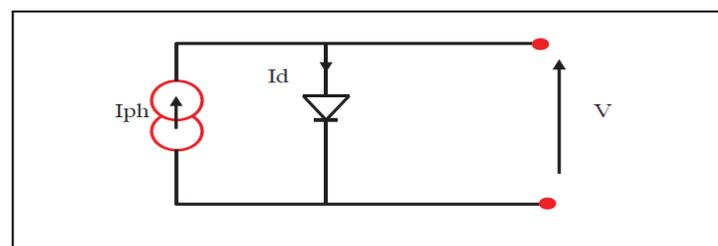


Figure I.5. Modèle de cellule photovoltaïque idéale [6].

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode : [6].

$$V = V_d \quad (\text{I.4})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation : [6].

$$I = I_0. \left(\exp \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.5})$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : la tension à la borne de diode

$V_t = KT/q$: est le potentielle thermique

Donc la relation (I.6) sera : [6].

$$I = I_{ph} - I_0. \left(\exp \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.6})$$

I.7. 2. Cellule photovoltaïque réelle

Les modèles photovoltaïques précédents ne prenaient pas en compte tous les phénomènes qui se produisent lors de la conversion de l'énergie lumineuse. En effet, dans des situations pratiques, il y a une perte de tension en sortie ainsi qu'un courant de fuite. Par conséquent, cette perte de tension est modélisée par la résistance série R_S et le courant de fuite est modélisé par la résistance parallèle R_P [13].

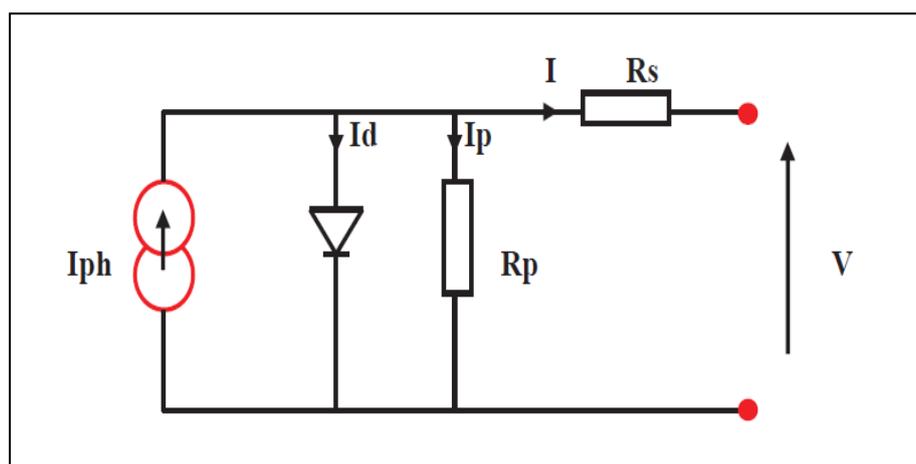


Figure I.6. Modèle de cellule photovoltaïque réelle. [13].

Donc on a : [6].

$$I_p = \left(\frac{V+R_s.I}{R_p} \right) \quad (\text{I.7})$$

$$I_d = I_o. \left(\exp \left(\frac{V+R_s.I}{v_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.8})$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule

$I_{ph} = I_{sc} \cdot \left(\frac{G}{1000} \right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_o : Le courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin).

Q : charge d'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en kelvin.

Donc (I.6) sera : [6].

$$I = I_o. \left(\exp \left(\frac{V+R_s.I}{v_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V+R_s.I}{R_p} \right) \quad (\text{I.9})$$

I.7.3. Modèle à une seule diode

Le modèle à une seule diode est le modèle le plus cité dans la littérature. Il est défini par le même schéma électrique équivalent que la Figure I.7 composé d'une source de courant qui simule la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique, d'une résistance shunt (R_{sh}) représentant l'état de la surface périphérique de la cellule, et d'une résistance série (R_s) et une diode parallèle pour simuler une jonction P-N.

Le courant généré par le module est donné par : [10].

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V+R_s.I)}{A.K.T_j} \right] - 1 \right\} - \frac{V+R_s.I}{R_{sh}} \quad (\text{I.10})$$

I.7.4. Modèle à deux diodes

Cette fois, nous avons deux diodes pour représenter la polarisation de la jonction PN. D'une part ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires Sur la surface du matériau, d'autre part sur le volume du matériau. Le schéma de principe du générateur photovoltaïque passe à la situation de la Figure I.8. [10].

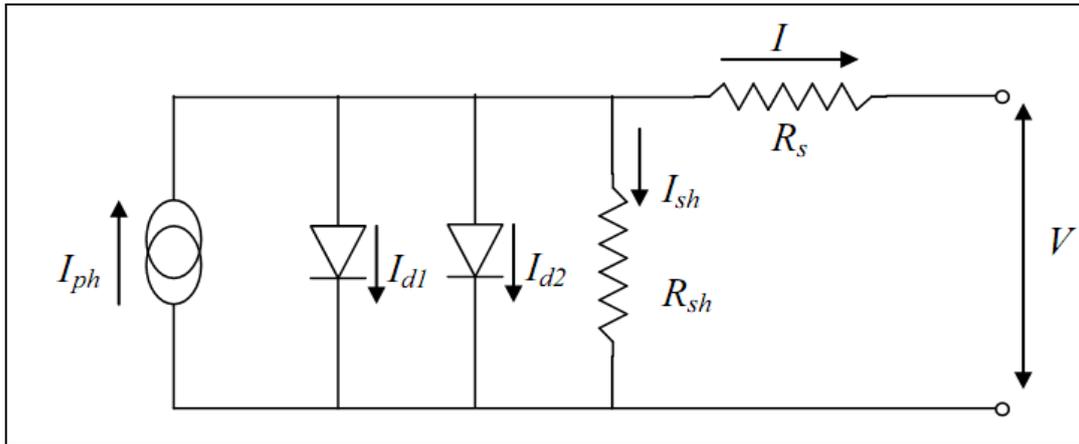


Figure I.7. Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes. [10]

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (I.11):

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left\{ \exp \left[\frac{q(V+R_s I)}{A.K.T_j} \right] - 1 \right\} - I_{s2} \left\{ \exp \left[\frac{q(V+R_s I)}{2A.K.T_j} \right] - 1 \right\} - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (I.11)$$

Avec :

I_{s1} et I_{s2} : Sont les courants de saturation de la première et la deuxième diode respectivement.

I.7.5. Modèle explicite

Le modèle est dérivé après quelques approximations du modèle à une seule diode et ne nécessite que trois points importants de la courbe I-V : le courant de court-circuit I_s , Tension de circuit ouvert V , courant I_m et tension V_m au point de puissance optimal. Les caractéristiques I-V sont décrites comme suit : [14].

$$I = I_{sc} \left[1 - c_1 \left(\exp \left(\frac{V}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right) \right] \quad (I.12)$$

Avec:

$$C1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \exp\left(\frac{-V_m}{C2V_{oc}}\right) \quad C2 = \frac{\frac{V_m}{V_{oc}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)}$$

I.7.6. Modèle à quatre paramètres

Le modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, en fonction de l'irradiance, en parallèle avec la diode et en série avec la résistance série R_s . La résistance shunt R_s a peu d'effet sur le module simple, de sorte que le module n'est pas inclus dans la Figure I.9.

Les quatre paramètres qui apparaissent dans l'équation caractéristique $I(V)$ sont : le courant de photon I_{ph} , la résistance série R_s et les deux caractéristiques de diode I_s et A .

Ces paramètres doivent être déterminés à partir du système d'équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement.

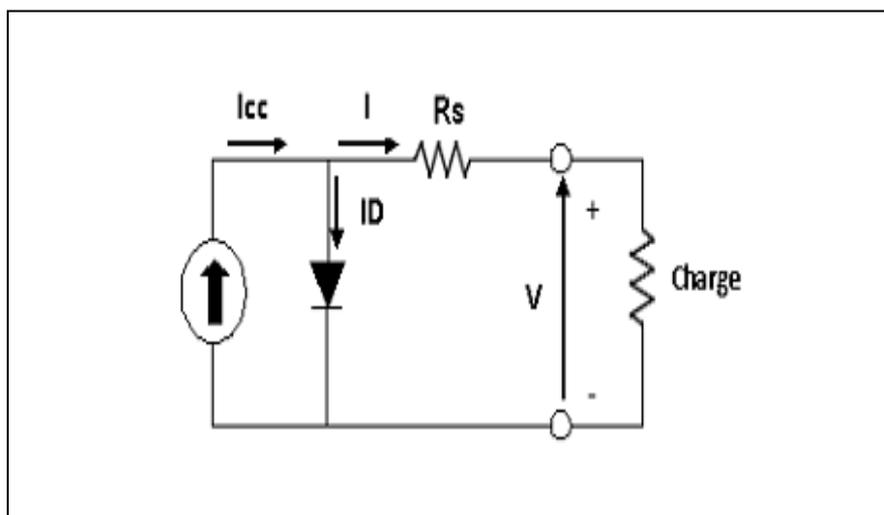


Figure I.8. Circuit équivalent du modèle à quatre paramètres [14].

Le courant de sortie déduit de schéma équivalent est le suivant:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (I.13)$$

I.8. Différentes structures des cellules photovoltaïques

On distingue plusieurs types de cellules solaires selon leurs structures [14].

I.8.1. Cellules à base de silicium cristallin

Le modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, en fonction de l'irradiance, en parallèle avec la diode et en série avec la résistance série R_s . La résistance

shunt R_s a peu d'effet sur le module simple, de sorte que le module n'est pas inclus dans la Figure I.9.

Les quatre paramètres qui apparaissent dans l'équation caractéristique $I(V)$ sont : le courant photonique I_{ph} , la résistance série R_s et les deux caractéristiques de diode I_s et A .

Ces paramètres doivent être déterminés à partir du système d'équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement.

I.8.2. Cellules photovoltaïques en couches minces

Ces cellules sont composées d'une couche mince de semi-conducteur entre $10 \mu m$ à $100-200 \mu m$ déposé sur un substrat tel que le verre, plastique, céramique, métal ou graphite. Les couches fines de silicium Si, d'Arsenic de Galium $GaAs$, de Tellure de Cadmium CdTe et de CIGS sont déposés sur le substrat par épitaxie en phase vapeur. L'avantage des cellules en couche fine c'est qu'on utilise moins de matériau donc elles sont moins coûteuses. [11].

I.8.3. Cellules photovoltaïques organiques

Les cellules photovoltaïques organiques utilisent des matériaux organiques, tel que les polymères. Leurs rendements sont de 5 % [17]. La structure de la cellule organique est démontrée dans Figure I.10.

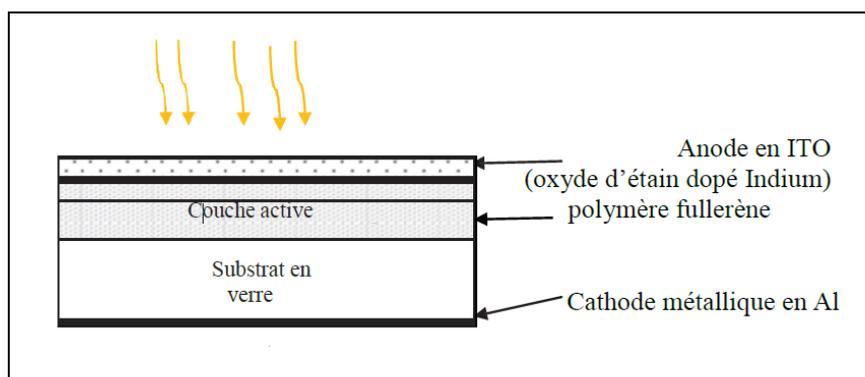


Figure I.9. Cellule solaire organique [17].

La couche active est constituée de deux matériaux, un donneur d'électrons pour la chaîne polymère et un accepteur d'électrons pour le fullerène. Lorsque nous avons illuminé la batterie, des électrons ont été transférés du polymère aux molécules de fullerène. Les avantages de ces cellules sont que de grandes surfaces peuvent être fabriquées, elles sont légères, flexibles et peu coûteuses à fabriquer.

I.9. Regroupement des cellules

I.9.1. Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque, Figure I.11. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électrique d'une association série de (N_s) cellules [18].

$$V_{coNS} = N_s \times V_{co} \tag{I.14}$$

$$I_{cc} = I_c \tag{I.15}$$

V_{coNs} : représente la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccNs} : représente le courant de court-circuit de N_s cellules en série.

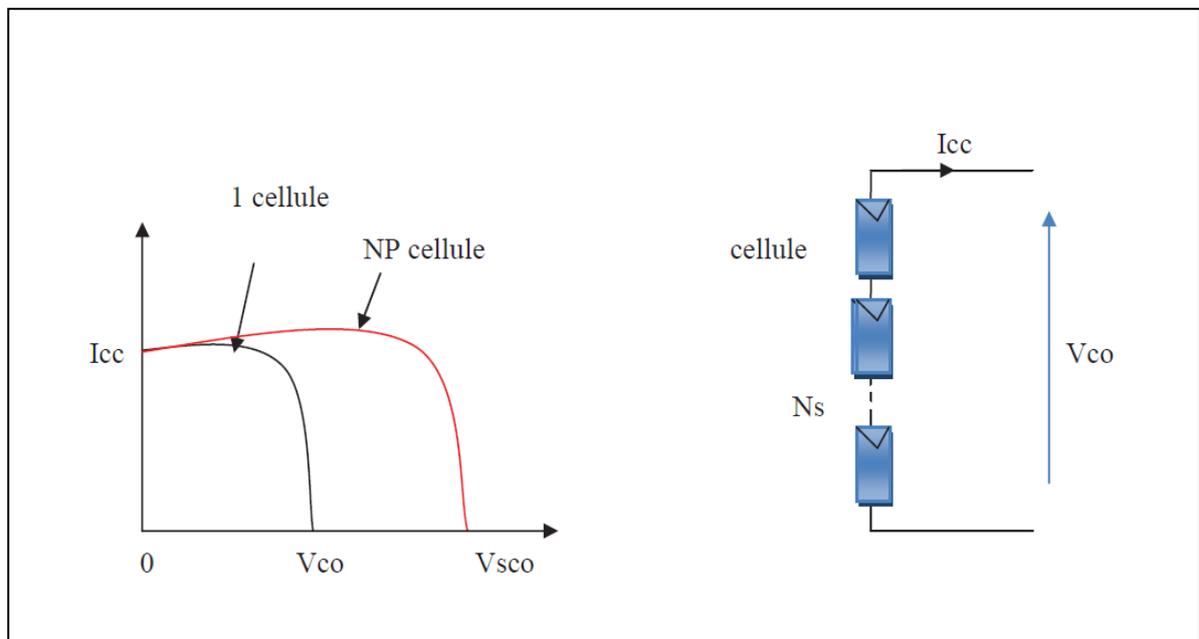


Figure I.10. Caractéristique courant tension de N_s cellule en série. [18].

I.9.2. Regroupement en parallèle

Une association parallèle de (NP) cellule est montrée à la Figure. I.12. Elle permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [19].

Avec :

$$I_{ccNP} = NP \times I_{sc} \quad (I.16)$$

$$V_{co} = V_{coNP} \quad (I.17)$$

I_{ccNp} : la somme des courants de court circuit de (Np) cellule en parallèle,

V_{coNp} : tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle.

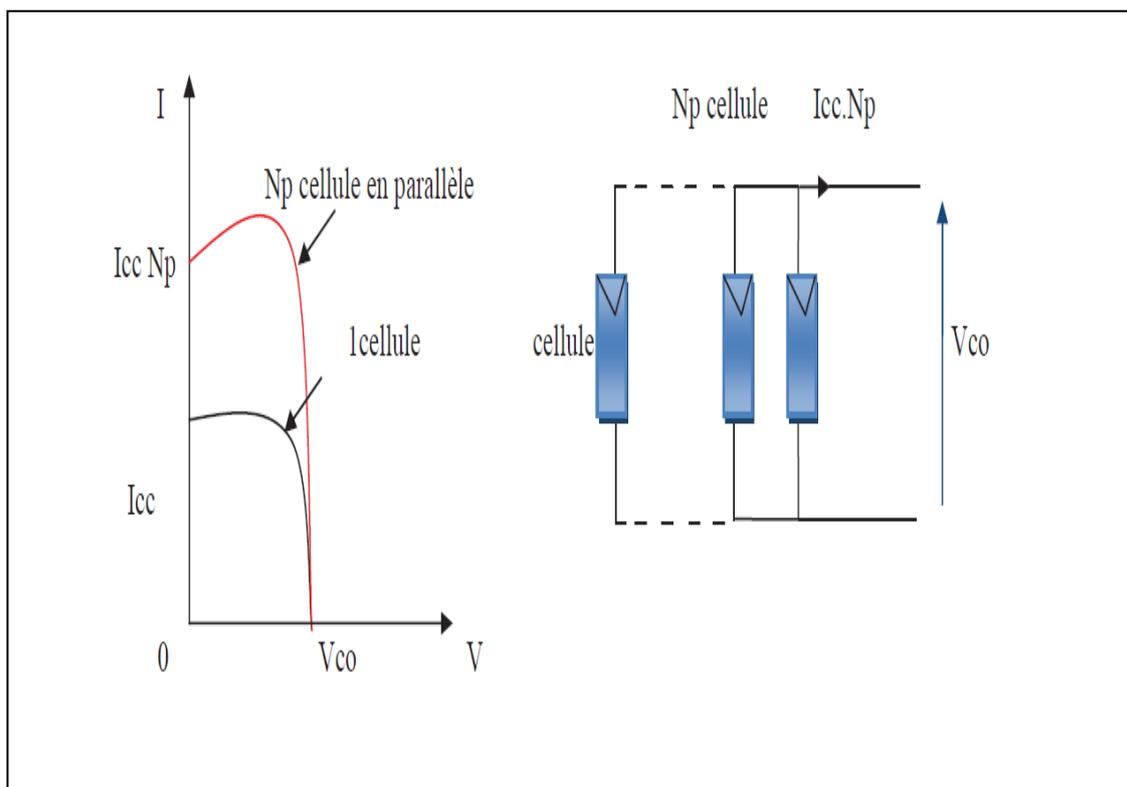


Figure I.11. Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle. [19].

I.9.3. Regroupement (série et parallèle)

Ce type d'association est souvent utilisé pour en tirer des hautes tensions, car l'association en série des cellules solaires fournit une tension égale à la somme des tensions individuelles, et un courant égal à la tension des cellules individuelles. Les caractéristiques d'un ensemble de deux modules solaires sont présentées ci-dessous et peuvent être résumées comme une gamme de Ns modules solaires en série. Ce regroupement augmente le flux de courant.

Afin d'obtenir plusieurs kilowatts de puissance à une tension appropriée, les modules dans les panneaux doivent être associés et installés en rangées de panneaux en série et en parallèle pour former des générateurs dits photovoltaïques [20].

I.10. Secteurs d'applications**I.10.1. Domaine spatial**

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,) remontent aux années soixante. Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine Militaire (NASA aux Etats-Unis) et public (ESA en Europe) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

I.10.2. Habitation isolée

L'approvisionnement en électricité dans les zones rurales reculées est un problème actuel, en particulier dans les pays en développement. L'extension du réseau pour une demande relativement faible et isolée n'est pas rentable pour les services publics. De nombreuses organisations d'aide internationale ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour les pays en reconstruction, fournissant des services de base à la population, tels que :

- ✚ Pompage d'eau pour consommation villageoise ou irrigation, réfrigération pour fabrication de glace et conservation de vaccins, sang, produits agricoles...,
- ✚ Éclairage (lampes portatives, éclairage public, électrification villageoise, etc.)

De nombreuses applications professionnelles nécessitent des alimentations très fiables, autonomes, sans entretien et sans carburant. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus attractive ; il a été utilisé avec succès dans les télécommunications (stations relais pour

TV, radio, téléphone, émetteurs-récepteurs, etc.), mais aussi dans d'autres applications telles que : [20].

- ✚ Protection cathodique,
- ✚ Systèmes silencieux ou sans vibration,
- ✚ Eclairage, balises et signaux pour la navigation,
- ✚ Equipement de monitoring,
- ✚ Télémétrie, etc.

I.10.3. Centrale de puissance

Une nouvelle tendance se dessine avec le raccordement des applications photovoltaïques au réseau national ; elle se caractérise par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. La plupart des projets utilisent le domaine des collecteurs planaires, mais des systèmes de concentrateur sont également testés dans des zones riches en rayonnement direct. Lorsque les pics de demande sont synchronisés avec l'ensoleillement, les centrales photovoltaïques connectées au réseau peuvent fournir de l'électricité pour le pic. C'est le cas dans le sud des États-Unis, où la demande est la plus élevée pendant les heures les plus ensoleillées en raison de la climatisation omniprésente. [21].

I.10.4. Résidence urbaine

Des générateurs photovoltaïques connectés au réseau sont également envisagés en milieu urbain, avec des modules installés sur les toits et les façades des bâtiments. Les façades photovoltaïques ont suscité un grand engouement en Europe et aux États-Unis ; le revêtement des façades des bâtiments tertiaires - la consommation se fait essentiellement de jour et de nuit - correspond mieux aux heures d'ensoleillement. Une orientation verticale (ou presque) sous nos hautes latitudes peut être bénéfique pour des rendements plus élevés en hiver profond. Or, l'apport énergétique d'une façade recouverte de démodulation photovoltaïque peut être très insignifiant par rapport à la consommation des bâtiments tertiaires. En fait, cet engouement vient du fait que les revêtements utilisant des panneaux solaires photovoltaïques coûtent presque le même prix que les revêtements utilisant des matériaux traditionnels. [21].

I.10.5. Biens de consommation

L'électronique moderne nécessite très peu d'énergie - de milliwatts à des dizaines de watts, de nombreux petits appareils peuvent donc être alimentés par des cellules photovoltaïques de petite surface. Les calculatrices et les montres sont de loin les applications les plus connues. Les chargeurs de batterie, les radios, les lampes de poche, les lampes de jardin, les systèmes d'alarme, les jouets, les fontaines, les tondeuses à gazon, etc. en sont d'autres exemples, et cette liste n'est pas exhaustive.

La plupart de ces macrogénérateurs photovoltaïques utilisent des cellules en silicium amorphe, bon marché et plus adaptées aux faibles éclaircements et aux faibles puissances. Elles constituent une alternative très intéressante aux batteries, qui comportent principalement divers risques de métaux lourds polluant l'environnement. Le Japon est un important producteur et consommateur de ces articles [21].

I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques**I.11.1. Inconvénients**

Le contenu technologique de fabrication des modules photovoltaïques est élevé et le coût d'investissement est élevé. L'efficacité de conversion réelle du module est inférieure, environ 10-15%, et la limite théorique de la cellule est de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne concurrencent les générateurs diesel que pour la faible demande énergétique dans les zones reculées. [13].

Le coût des générateurs augmente lorsque l'énergie électrique doit être stockée sous forme chimique (batteries). Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I.11.2. Avantages

L'un est une grande fiabilité. L'unité n'a pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement adaptée aux régions éloignées. C'est pourquoi il est utilisé sur les engins spatiaux. La modularité des panneaux photovoltaïques permet alors un montage simple et une adaptation aux différents besoins énergétiques. Le système peut être dimensionné pour des applications de puissance allant des milliwatts aux mégawatts.

Les coûts d'exploitation sont très faibles en raison d'une maintenance réduite et il n'y a pas besoin de carburant, de transport ou de personnel hautement spécialisé. [13].

D'un point de vue écologique, la technologie photovoltaïque a des qualités, car le produit fini est non polluant, silencieux et ne cause aucune nuisance à l'environnement, sauf à prendre de la place dans les grandes installations.

I.12. Utilisation

Les panneaux solaires sont utilisés pour alimenter des endroits éloignés et inaccessibles tels que les montagnes. Dans ces cas, l'installation de panneaux solaires est amusante car ils nécessitent peu ou pas d'entretien. Les appareils pouvant être connectés au réseau sont constitués de modules solaires, eux-mêmes constitués de cellules photovoltaïques. Ces générateurs convertissent l'énergie solaire directement en courant continu. Dans le cas du secteur outre-mer, un accumulateur vient s'ajouter à l'unité qui stocke l'énergie, ce qui peut être intéressant dans ces zones où le réseau public peine parfois à alimenter le système (intempéries, cyclones, etc.) . . . , installer des panneaux solaires est amusant car ils ne nécessitent que peu ou pas d'entretien. Les appareils pouvant être connectés au réseau sont constitués de modules solaires, eux-mêmes constitués de cellules photovoltaïques. Ces générateurs convertissent l'énergie solaire directement en courant continu. Dans le cas du secteur outre-mer, un accumulateur vient s'ajouter à l'unité qui stocke l'énergie, ce qui peut être intéressant dans ces zones où le réseau public peine parfois à alimenter le système (intempéries, ouragans, etc.) ... [15].

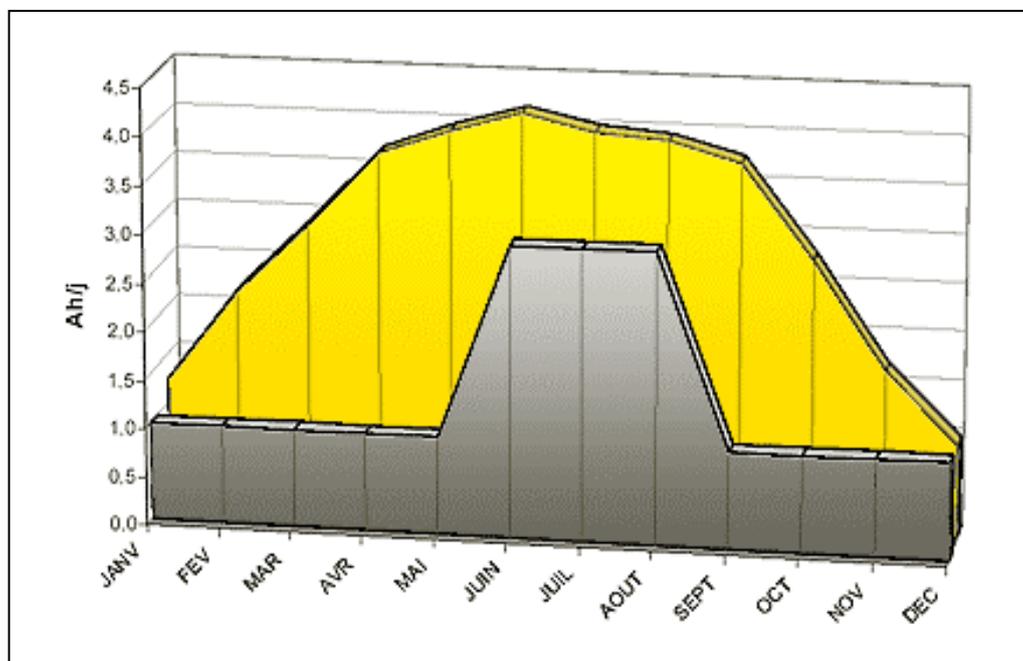


Figure I.12. Schéma Estimation de la production en Fonction du générateur optimal. [15].

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous introduisons les bases de base de la compréhension de l'effet photovoltaïque. Nous avons détaillé les principes de la conversion photovoltaïque avec différents modèles correspondants. Les avantages et les domaines d'application sont également discutés.

Chapitre II

Cellules photovoltaïques
***InGaN* à haut Rendement**

II.1 Cellules solaires photovoltaïques

L'épuisement des ressources naturelles et les impératifs de protection de l'environnement ont amorcé un processus dynamique de transition énergétique dans le monde. Il consiste à passer du système énergétique actuel, dépendant fortement des énergies fossiles à un système reposant principalement sur des sources renouvelables. On distingue parmi ces dernières l'énergie solaire photovoltaïque qui connaît un fort développement ces dernières années. La filière photovoltaïque offre une solution très pratique pour l'obtention de l'électricité partout, aussi bien dans de grands parcs solaires que sur des petites installations autonomes isolées. Elle s'est d'abord principalement développée grâce à l'industrie spatiale avant d'être largement démocratisée pour s'installer sur nos toits et devenir l'une des énergies alternatives de demain. [1]

II.1.1 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

II.1.1.1 L'effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue en exposant à la lumière un capteur appelé cellule solaire ou photopile. Il s'agit d'un phénomène physique dit "effet photovoltaïque". La découverte de ce dernier est attribuée à Antoine Becquerel en 1839 [2]. Le principe repose sur l'interaction lumière-matière dans les semi-conducteurs. En effet, lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite sont absorbés créant ainsi des paires électron-trou par le passage des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Si ces paires électron-trou ne sont pas séparées, leur recombinaison se fait très rapidement en libérant.

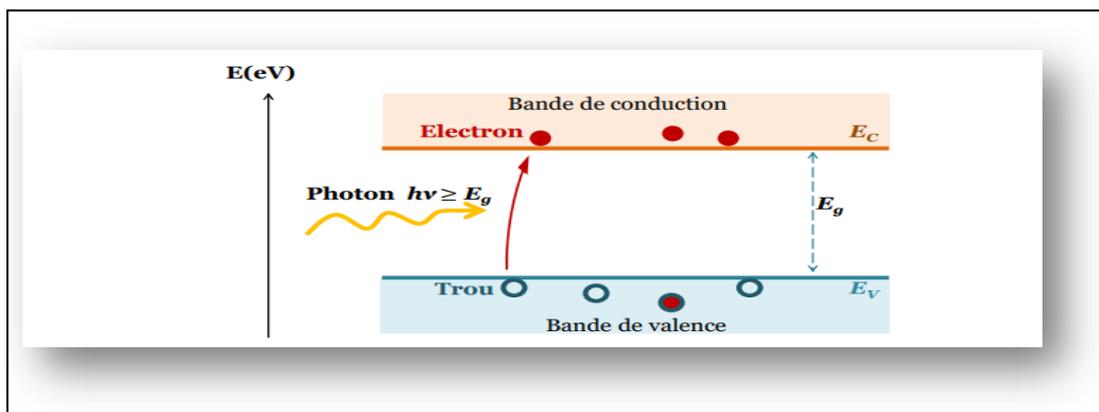


Figure II.1. Génération de paire électron-trou. E_C est l'énergie du bas de la bande de conduction et E_V , l'énergie du haut de la bande valence

Un phonon, selon l'énergie absorbée, et un photon.

Le rôle principal d'une cellule photovoltaïque est de réduire ces recombinaisons et donc de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau. Ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel, donnant lieu à une photo courant. L'une des solutions couramment utilisées, pour extraire sélectivement les électrons et les trous est de créer un champ électrique permanent dans le matériau au moyen d'une jonction entre une couche de semi-conducteur dopée P (Une couche dopée P est une couche possédant un excès de trous). Et une autre couche dopée N (Une couche dopée N est une couche possédant un excès d'électrons.) (Jonction PN) (voir figure II.2).

La mise en contact d'un semi-conducteur dopé P et d'un semi-conducteur dopé N fait apparaître un phénomène de diffusion dans la jonction. Les électrons majoritaires dans la couche N diffusent vers le côté P et les trous majoritaires dans la couche P diffusent vers le côté N. A la jonction, les porteurs de charge (électrons et trous) se recombinent créant une zone dépourvue de porteurs mobiles, appelée zone de charge d'espace (ZCE). Il apparaît alors une différence de potentiel et donc un champ électrique orienté de la région N vers P. Lorsqu'on éclaire la jonction, les photons d'énergie ($h\nu$) égale ou supérieure à l'énergie de la bande d'énergie interdite (E_g) du matériau sont absorbés. Des paires électron-trou sont ensuite créées par le passage des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Le champ électrique interne créé dans la ZCE va séparer spatialement les porteurs photogénérés : les électrons sont dirigés vers la couche N et les trous vers la couche P. [3]

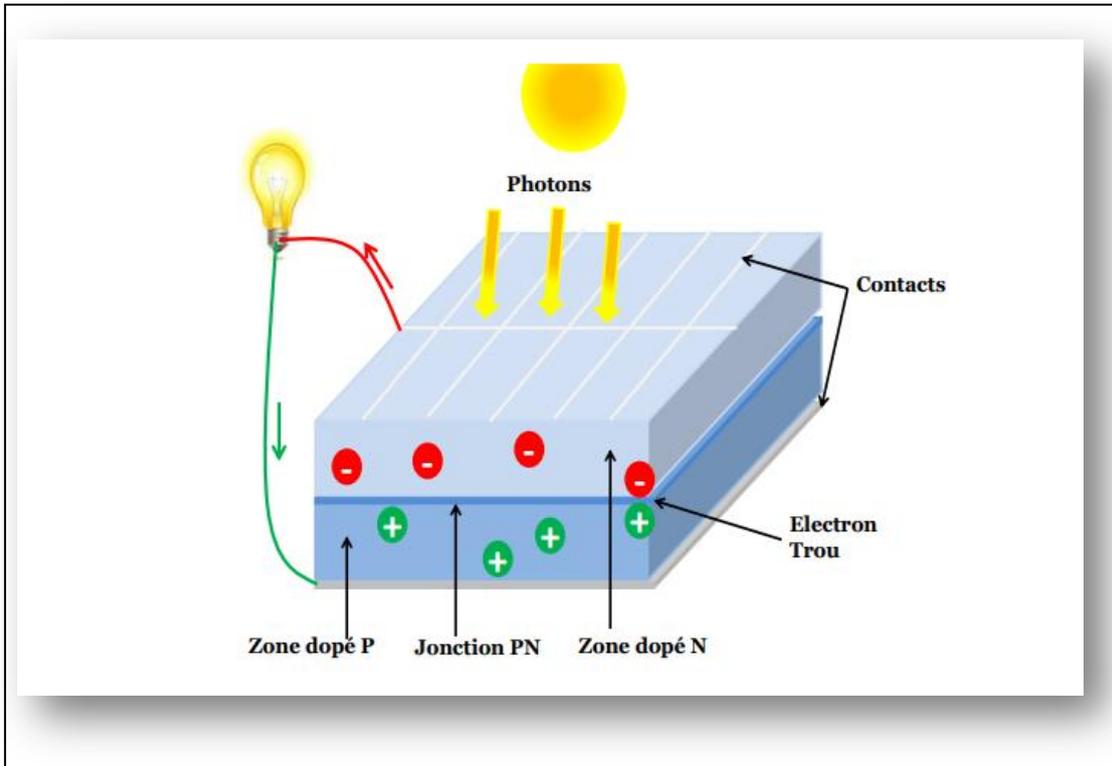


Figure II.2. Principe de l'effet photovoltaïque

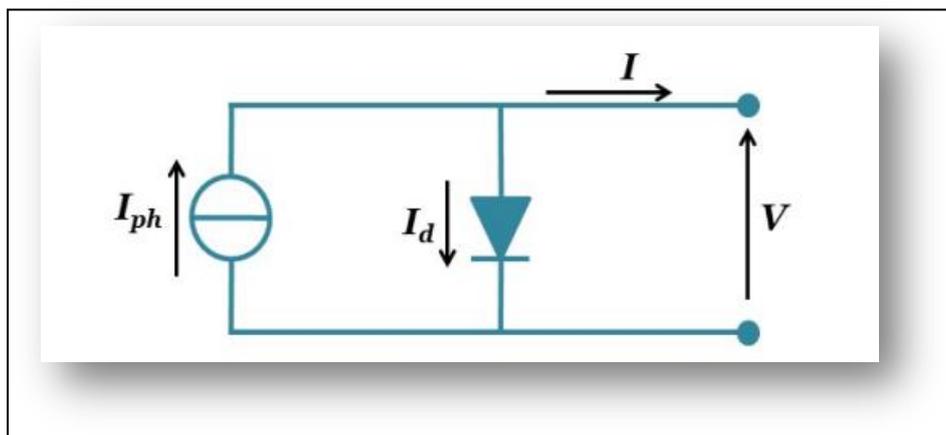


Figure II.3 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

I est le courant total produit par la cellule. I_{ph} est le courant photogénéré proportionnel à l'intensité de l'éclairement. I_d est le courant traversant la diode. V est la tension délivrée par la cellule. [2]

Créant ainsi un courant électrique continu entre les électrodes métalliques déposés de part et d'autre de la structure (voir Figure II.2).

II.1.1.2 Les paramètres de la cellule solaire

Une cellule solaire exposée aux rayonnements solaires, peut être modélisée par le circuit de la figure II.3. Dans les faits, il existe plusieurs facteurs de perte de la conversion photovoltaïque au sein d'une cellule solaire. Ces pertes sont généralement dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée pour la réalisation de la cellule. On peut entre autres citer les pertes par effet Joule dues à la résistivité des différents contacts et celles des couches. Cette résistivité est modélisée par une résistance série (R_s). Cette dernière doit être idéalement la plus faible possible afin de limiter son influence sur les performances de la cellule solaire (dans le cas idéal, $R_s = 0$). La présence de tout courant de fuite causé par les recombinaisons et les défauts dans la structure est traduite par une résistance parallèle ou shunt (R_{sh}). Celle-ci doit être idéalement la plus élevée possible (dans le cas idéal, $R_{sh} = \infty$). Enfin les recombinaisons des porteurs dans la zone de charges d'espace sont traduites par un coefficient d'idéalité (Facteur empirique qui est égale à 1, pour une jonction idéale et prend une valeur comprise entre 1 et 2, lorsqu'on tient compte des courants de recombinaison dans la jonction), (n) supérieur à l'unité. En tenant compte de tous ces paramètres, on obtient alors le circuit électrique de la figure II.4.

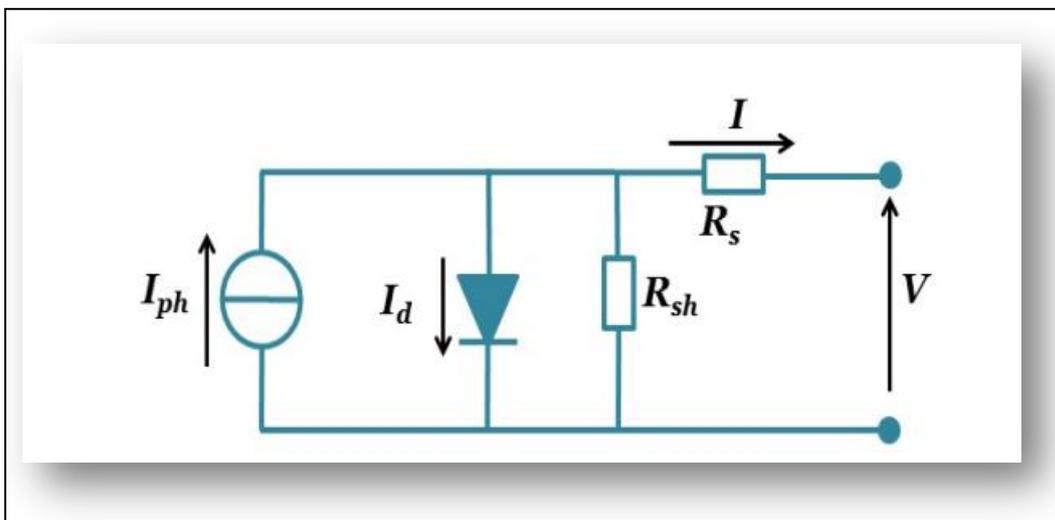


Figure II.4 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque. R_s Est la résistance série du circuit. R_{sh} est la résistance parallèle du circuit (shunt).

D'autres facteurs peuvent également engendrer des pertes non négligeables du rendement de conversion d'une cellule photovoltaïque. Citons par exemple :

- ✚ L'absorption partielle des photons incidents : les photons incidents d'énergie inférieure au gap du semi-conducteur ($h\nu < E_g$) ne peuvent générer de paires électron-trou et sont donc perdus.
- ✚ Les pertes par thermalisation : un photon incident d'énergie supérieure au gap ($h\nu > E_g$) ne génère qu'une seule paire électron-trou; l'excès d'énergie est transféré sous forme de chaleur dans le matériau.
- ✚ Les pertes dues à la réflexion des rayonnements lumineux incidents à la surface : seule une partie du rayonnement solaire est absorbée, l'autre partie étant réfléchi.
- ✚ Les pertes dues à la couverture partielle de la surface de la cellule par les contacts métalliques de la face avant. D'après la figure II.4, Le courant I issu de la cellule peut être exprimé en fonction de la tension appliquée V , de manière générale, avec l'expression suivante [7] :

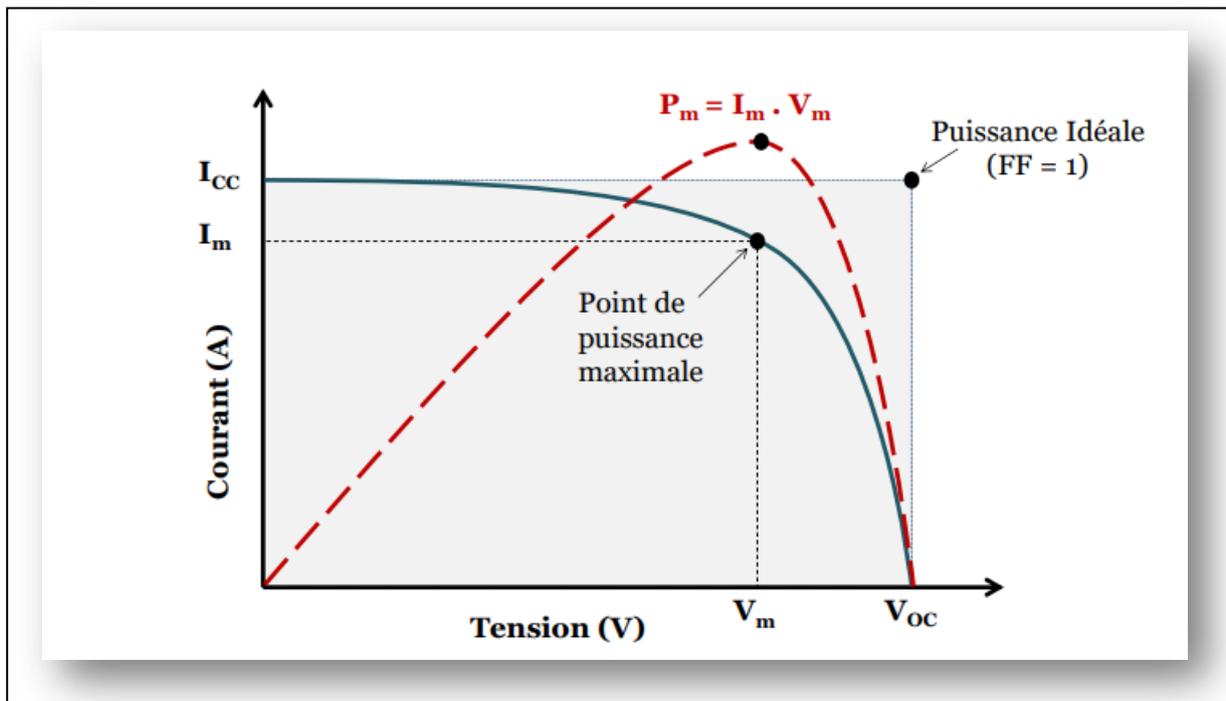


Figure II.5. Caractéristiques courant-tension $I(V)$ (en trait plein) et puissance (en trait discontinu) d'une cellule solaire.

$$I(V) = I_{ph} - I_0 \times \exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{nK_B T}\right) - \frac{(V + R_S I)}{R_{Sh}}, \quad (\text{II.1})$$

Où I_0 est le courant de saturation, n est le coefficient d'idéalité de la diode, K_B est la constante de Boltzmann, T représente la température de la cellule et q est la charge électronique élémentaire.

Les grandeurs physiques importantes de la cellule solaire découlent de sa caractéristique courant-tension, $I(V)$, représentée sur la figure II.5).

- ✚ La tension de circuit-ouvert, notée V_{CO} , tension maximale aux bornes de la cellule à courant nul ($I = 0$), elle dépend essentiellement de la température de la cellule et du spectre de l'éclairement.
- ✚ Le courant de court-circuit, noté I_{CC} , est le courant circulant dans la cellule à tension nulle ($V = 0$); il dépend principalement de l'intensité de la lumière et de la surface de la cellule.
- ✚ Le facteur de remplissage (facteur de forme), noté FF, désigne le rapport entre puissance maximale fournie (P_m) sur le produit $I_{CC} V_{CO}$. Il est toujours inférieur à 1.
- ✚ Le point de puissance maximale, P_m , obtenu pour un courant et une tension optimaux (I_m, v_m).

Le rendement de conversion (η) de la cellule est défini par le rasance maximale (P_m) et la puissance du rayonnement solaire incident (P_{in}) sur la cellule photovoltaïque [7] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{CC} \cdot V_{CO}}{P_{in}} \quad (\text{II.2})$$

Avec

$$V_{CO} = \frac{nK_B T}{q} \times \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

II.1.1.3 Le rayonnement solaire

L'énergie solaire exploitée ici par les cellules solaires présente un spectre d'émission comparable à celui d'un corps noir à 5800K. Hors de l'atmosphère, le rayonnement solaire a une puissance moyenne de $1,37 \text{ kW/m}^2$. Cependant, en traversant l'atmosphère, une partie de cette énergie est absorbée par diverses molécules dans l'atmosphère telles que l'oxygène, l'ozone ou encore le dioxyde de carbone. Au niveau de la surface terrestre, le rayonnement

solaire a une puissance maximale d'environ 1kW/m^2 . Le spectre solaire obtenu à la surface de la terre est donc fonction de la composition de l'atmosphère et surtout de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement. Afin de caractériser les différents spectres solaires incidents, on a défini le paramètre AM (Air Mass) caractérisant la couche atmosphérique parcourue par le rayonnement. En dehors de l'atmosphère, on a le spectre AM0, utilisé pour les applications spatiales. Au niveau de l'équateur, le rayonnement traverse une épaisseur d'atmosphère, on a le spectre AM1. Lorsque le rayonnement fait un angle de 60° par rapport à l'équateur, on a le spectre AM2. On définit le spectre AM1.5 pour un rayonnement faisant un angle de $41,8^\circ$ par rapport à l'équateur correspondant à un rayonnement traversant 1,5 fois l'épaisseur de la couche atmosphérique [6]. Dans ces conditions, l'intensité du rayonnement est normalement inférieure à 1000W/m^2 (environ 827W/m^2), un facteur de normalisation est donc appliqué afin de faire passer l'intensité du spectre à 1000W/m^2 . Le spectre AM1.5 sert aujourd'hui de norme pour les tests standardisés des cellules solaires. C'est ce que nous utilisons donc dans ce travail de thèse.

II.1.1.4 De la cellule au module

Une seule cellule photovoltaïque (PV) constituerait un générateur électrique de très faible puissance pour, par exemple une application domestique. Afin d'augmenter la tension et/ou le courant, un grand nombre de cellules sont connectées en série et/ou en parallèle, encapsulées entre deux feuilles de résine et recouvertes d'un verre et d'un film étanche, pour former les modules photovoltaïques. Ces modules, ou panneaux solaires, sont ensuite assemblés pour constituer des systèmes photovoltaïques, qu'il s'agisse de grandes fermes solaires ou de petites installations.

Dans un montage en série, les cellules sont traversées par le même courant. La tension totale du module correspond à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules. Dans un montage en parallèle, le courant total correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules. La tension reste la même pour toutes les cellules.

La caractéristique courant-tension d'un panneau solaire est semblable à la courbe courant-tension d'une cellule de base. Par conséquent, tout ce qui est valable pour une cellule solaire reste aussi valable pour un panneau solaire. On prendra juste le soin de ne connecter en série que des cellules identiques ayant la même densité de courant et de ne connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension. En effet, un branchement de cellules non identiques peut gravement détériorer les performances de l'ensemble.

II.1.2 Les filières photovoltaïques

Différentes technologies sont aujourd'hui utilisées dans la filière photovoltaïque. La figure II.6 extraite de [2] présente les évolutions des rendements des différentes filières. Nous pouvons observer qu'à ce jour, les plus hauts rendements sont obtenus avec les cellules III-V multi jonction sous concentration, tandis que les plus faibles rendements sont obtenus avec les cellules solaires organiques.

II.1.2.1 Les filières à base de silicium cristallin

Le silicium est actuellement, et de loin, le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaires. Près de 93 % de la production mondiale des panneaux solaires est à base de silicium. Le silicium présente principalement deux avantages :

- ✚ Son abondance. Il est le deuxième élément le plus abondant sur notre planète après l'oxygène, autant dire qu'il est quasiment inépuisable.
- ✚ Technologie mature. Les technologies mises en œuvre sont en effet, depuis plusieurs dizaines d'années déjà, bien maîtrisées.

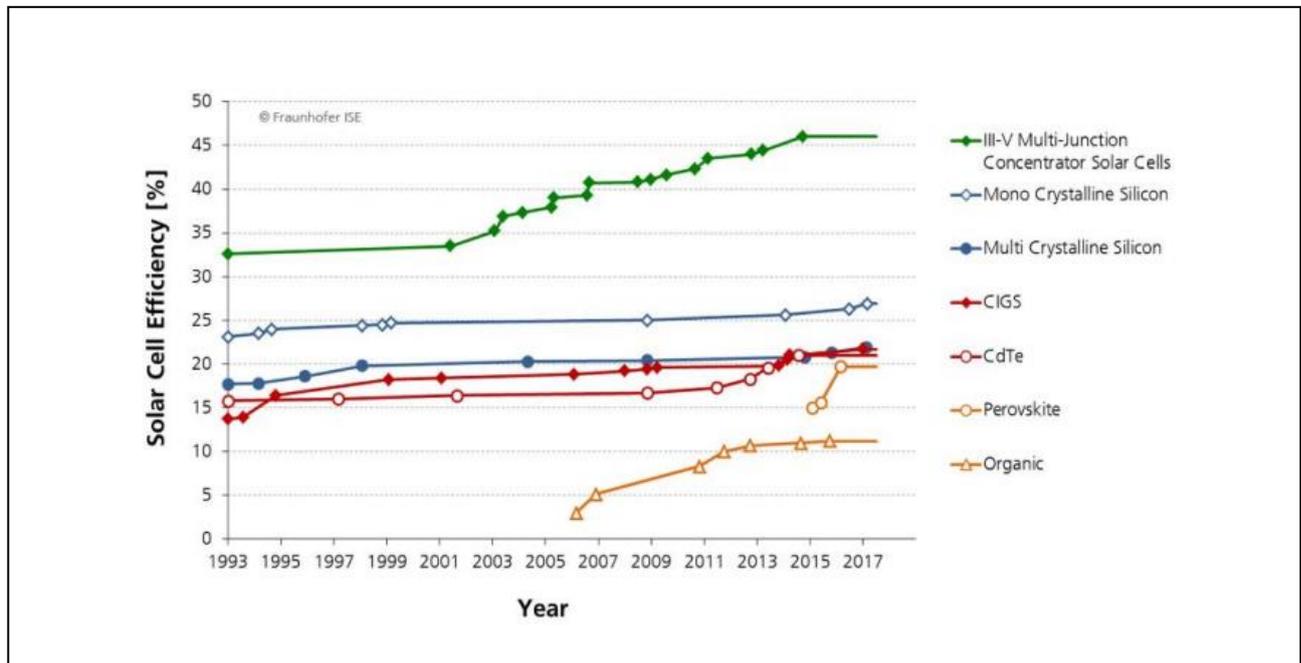


Figure II.6. Évolution en laboratoire du rendement des cellules photovoltaïques [2]

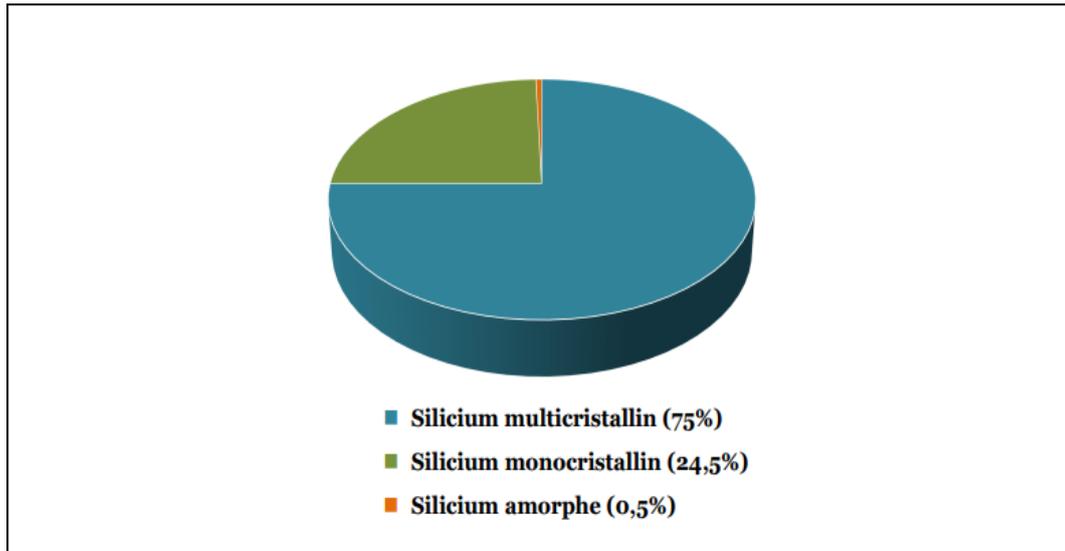


Figure II.7. Production photovoltaïque mondiale, pour la technologie silicium (2015) [2]

La répartition des différentes technologies de cellules solaires photovoltaïques à base de silicium est représentée sur la Figure II.7. On distingue donc trois familles dans la filière silicium : les cellules monocristallines, les cellules multi cristallines, et les cellules amorphes.

a) Les cellules au silicium monocristallin

Le silicium monocristallin (mono-Si), est un matériau composé d'un seul cristal parfaitement homogène. Les cellules solaires issues de ce silicium ont une couleur caractéristique qui est généralement gris-noir métallique. Les avantages de cette technologie sont : une production des panneaux solaires presque optimale. Les cellules monocristallines offrent les meilleurs rendements (16 à 25 %) [3]. Les panneaux solaires à base de silicium monocristallin présentent une bonne durée de vie (30 ans [9]). Les inconvénients sont : un coût de production élevé, les panneaux sont donc chers à la vente, un rendement plus faible sous un faible éclaircissement et une baisse du rendement quand la température augmente ; par conséquent une production faible dans les régions chaudes

b) Les cellules au silicium multi cristallin

Contrairement au silicium monocristallin, le silicium multi cristallin (mc-Si) est composé de plusieurs domaines cristallines de tailles variées et orientés de manière aléatoire dans le matériau. Les cellules solaires multi cristallines ont donc un aspect non uniforme et sont de couleur bleue. Cette technologie a comme avantages : un coût de production moins élevé que pour les cellules monocristallines. Les panneaux ont également une bonne durée de vie. Le rendement est correct, même par temps nuageux. Son principal inconvénient est

justement son rendement de conversion qui est légèrement inférieur à celui des cellules au mono-Si. Il est compris entre 14 et 21% [3].

c) Les cellules au silicium amorphe

Les cellules solaires au silicium amorphe (a-Si) sont obtenues à partir d'un dépôt de silicium. Ce dernier peut être déposé sur différents substrats comme du plastique, du verre ou encore sur du métal. Les cellules solaires présentent une couleur grise. Elles ont comme avantage un procédé de fabrication moins coûteux car il est réalisé à basse température et utilise moins de matériau que le silicium cristallin. En effet le *a-Si* possède un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé que le silicium cristallin. C'est ce qui permet d'avoir des cellules avec des couches de l'ordre du micron d'épaisseur et qui permet de réduire significativement les coûts de production [10]. C'est une technologie très utilisée pour alimenter des petits objets du quotidien comme des calculatrices ou des montres solaires. Elles ont aussi l'avantage de fonctionner à faible luminosité et peuvent donc produire du courant même à l'intérieur d'une habitation. Elles présentent comme inconvénient un rendement de conversion faible (environ 13%) par rapport aux autres technologies et une faible durée de vie des panneaux solaires.

II.1.2.2 Les couches minces

Comme son nom l'indique, cette filière se base sur l'utilisation des couches minces dont les épaisseurs sont de l'ordre de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres. Cela est permis par une absorption bien plus importante dans ces matériaux si on les compare au silicium. Cette diminution des épaisseurs présente plusieurs avantages. Elle permet, tout d'abord, de réduire considérablement la quantité de matières premières utilisées, et aussi d'ouvrir de nouvelles applications. On peut classer cette filière en trois catégories : les couches minces inorganiques, les couches minces organiques et les couches minces à base de matériaux III-V

a) Les couches minces inorganiques

Les principaux matériaux utilisés pour cette catégorie de couches minces sont : le tellure de cadmium (*CdTe*), le CIGS (Cuivre Indium Gallium Sélénium) et le silicium amorphe (a-Si). Ces cellules en couches minces représentaient, en 2016, environ 5% de la production photovoltaïque [2]. Les cellules à base de *CdTe* sont en plein développement et elles occupent, depuis 2009, une part importante du marché des cellules en couches minces

avec des rendements qui atteignent les 21% pour une cellule et 18,6% pour un module photovoltaïque [3]. Les inconvénients majeurs de cette technologie sont la toxicité du cadmium et la rareté du tellure. Les cellules à base de CIGS sont généralement sous forme d'une hétérojonction de type CIGS(p)/CdS(n)/ZnO(n) dans les dispositifs à plus haut rendement.

Les rendements records obtenus avec cette technologie sont de l'ordre de 21% pour une cellule, 17,5% pour un module et environ 13,5% pour les modules industriels [3]. Les cellules à base de a-Si ont comme avantages de fonctionner avec un éclairage faible, comme à l'intérieur d'une maison mais affichent un rendement assez faible par rapport aux autres. Les rendements records obtenus sont : 13,6% pour une cellule et 10,5% pour un module [3]. L'un des principaux avantages de ces cellules en couches minces est l'utilisation de substrats légers et flexibles. Cela ouvre de nouvelles applications, notamment dans le domaine de l'habitat, comme par exemple le placement de cellules photovoltaïques sur de grandes toiles à coller sur les murs ou les toitures, pour générer de l'électricité.

b) Les couches minces organiques

Les cellules photovoltaïques organiques sont constituées d'une ou plusieurs couches minces de semi-conducteurs organiques. Ces cellules sont encore au stade du laboratoire et présentent déjà de nombreux avantages notoires : une réduction drastique des coûts de fabrication, un faible impact environnemental et une grande flexibilité d'utilisation. Leur développement à grande échelle est aujourd'hui freiné par la faible durée de vie des cellules et les faibles rendements qui les rendent difficilement compétitives avec les autres technologies. Les rendements maximaux actuels sont de l'ordre de 11% pour une cellule et environ 9% pour les modules [3]. Les applications visées sont principalement des usages couvrant de grandes surfaces sur substrats flexibles et également des usages comme l'électronique grand public, le transport, les panneaux publicitaires et dans le bâtiment.

Un autre domaine de recherche sur le solaire, plus récent, concerne les cellules photovoltaïques à base de pérovskites. Il s'agit d'un type de cellule photovoltaïque qui comprend un élément chimique ayant une structure de pérovskite, le plus souvent un hybride organique-inorganique de plomb ou un halogénure d'étain, dans sa couche active. C'est une nouvelle technologie pleine de promesses, mais elle se heurte également à des verrous très importants, comme leur mauvaise résistance à l'eau. Actuellement le rendement record obtenu en laboratoire est de 19,7% [11].

c) Les couches minces à base de matériaux III-V

À côté de toutes ces filières, on trouve aussi celle des matériaux III-V, très performante. Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'un ou plusieurs éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev, tels que l'arséniure de gallium, arséniure d'indium, nitrure de gallium, antimoniure de gallium ou des alliages ternaires tels que $InxGa(1-x)As$. Ils présentent généralement une haute mobilité électronique et une bande interdite directe. Après le Silicium, ce sont les deuxièmes matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs.

Les cellules solaires III-V sont essentiellement utilisées pour les systèmes multi jonction dans le but d'augmenter le rendement de la cellule solaire, en superposition de multiples cellules ayant des bandes d'énergie interdites différentes permettant ainsi une absorption plus large du spectre solaire. En effet, comme la composition de l'alliage III-V détermine son énergie de bande interdite, on peut donc plus facilement concevoir une cellule multi jonction avec différentes bandes interdites. La première jonction doit avoir une largeur de bande interdite pour absorber les photons les plus énergiques (UV) et rester transparente aux autres. La seconde jonction est adaptée pour les photons moins énergiques et ainsi de suite. C'est une technologie, à l'origine, utilisée pour des applications spatiales avant le développement aujourd'hui, des modules photovoltaïques pour les applications terrestres.

Ces cellules multifonctions peuvent certes donner des meilleurs rendements mais ils ont aussi des coûts de fabrication élevés, ce qui limite leur application au niveau spatial et militaire. Afin de diminuer ces coûts, on utilise pour cette technologie, des cellules solaires sous forte concentration lumineuse. Cela consiste à capter le rayonnement solaire grâce à une série de dispositifs optiques (lentilles ou miroirs) pour le concentrer sur une cellule solaire de faible surface. La concentration varie de 2 à plus de 1000 fois la puissance lumineuse émise par le soleil. Elle s'exprime en unité dite "soleil" ("*sun*") qui indique par combien la densité de puissance incidente du soleil est multipliée. Comme le montre la figure I.6 page 13, le rendement maximal des cellules à base de silicium est d'environ 25%, et peut atteindre 28% pour les cellules sous concentration, alors que les cellules multifonctions à base de III-V approchent les 46% de rendement sous concentration [3]. Les cellules solaires à base de matériaux III-V répondent alors aux deux principales problématiques de recherche de la filière photovoltaïque, à savoir :

✚ L'augmentation du rendement de conversion des cellules photovoltaïques, avec notamment la conception de nouvelles structures et l'utilisation de cellules multifonctions, ce qui permet une meilleure exploitation du spectre solaire et une augmentation de la densité de courant produite.

✚ La baisse des coûts de fabrication des cellules photovoltaïques, par l'utilisation de cellules en couches minces. Cette thèse se positionne donc sur ce type de matériaux, notamment sur le Nitrure de Gallium et d'Indium (*InGaN*) que nous décrivons dans la partie suivante. Nous avons, dans la figure II.8 ci-dessous, représenté quelques exemples d'applications de cellules solaires photovoltaïques.



FigureII.8. exemple d'application de cellules solaires photovoltaïques :

II.2 Le Nitrure de Gallium Indium (*InGaN*)

Dans cette deuxième partie, nous allons présenter le nitrure de galium-indium (*InGaN*). Ce matériau est un semi-conducteur faisant partie des composés III-N, c'est-à-dire, composés d'azote et d'un ou plusieurs éléments de la colonne III (bore, gallium, aluminium, indium, etc.) du tableau périodique de Mendeleïev. C'est un alliage entre le nitrure d'indium (*InN*) et le nitrure de gallium (GaN). Nous allons donc décrire les propriétés de ces deux semi-conducteurs binaires, pour ensuite décrire les propriétés de l'alliage ternaire résultant. Les nitrures d'élément III présentent de nombreuses difficultés technologiques comme l'absence de substrat en accord de maille pour l'épitaxie (Technique pour faire croître une couche de matériau cristallin sur un substrat.) et la difficulté d'obtenir le dopage de type P. Dans cette partie, nous passerons donc en revue certaines de ces difficultés, ensuite nous présenterons le potentiel d'*InGaN* pour le photovoltaïque et l'état de l'art dans ce domaine

II.2.1 Les propriétés structurales

II.2.1.1 La structure cristallographique

Les nitrures-III cristallisent principalement dans la structure zinc-blende ou *wurtzite*. La structure zinc-blende est une structure cubique alors que la structure wurtzite est une structure hexagonale [16]. Ces deux types de structure sont constitués de deux sous-réseaux interpénétrés, l'un étant formé par des cations d'éléments III (B^{3+} , Al^{3+} , Ga^{3+} , In^{3+} ...) et l'autre par les anions atomes d'azote (N^{3-}). D'un point de vue cristallin, ces deux structures sont donc relativement proches ; la phase hexagonale de direction cristallographique [0001] diffère de la phase cubique de direction [111] uniquement par la séquence d'empilement des plans cristallins (voir Figure II.9). Dans ce travail de recherche, nous allons uniquement considérer la structure *wurtzite* qui est thermodynamiquement la plus stable, contrairement à la structure cubique qui est métastable [16]. Cependant la structure wurtzite est non-centrosymétrique. En effet les barycentres de deux sous-réseaux d'anions et de cations formant la structure ne se superposent pas, créant ainsi une polarisation interne dans le matériau.

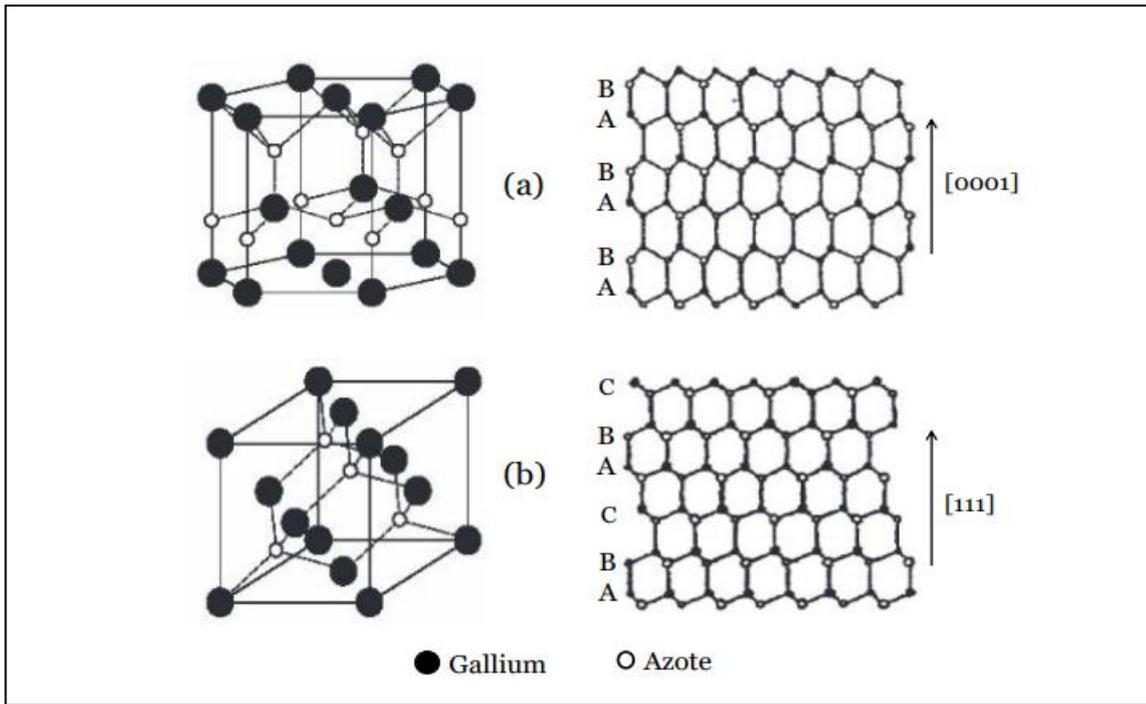


Figure II.9. Structures *cristallines* et les séquences d'empilement des plans cristallins du *GaN*. (a) structure *wurtsite*, (b) structure *zinc-blende* [17].

II.2.1.2 La polarisation

La non superposition des barycentres des charges positives avec celui des charges négatives dans les structures *wurtzites* a des conséquences importantes sur les propriétés de polarisation. Deux types de polarisations sont ainsi observés dans les nitrures d'éléments III, l'une existant à l'équilibre (la polarisation spontanée), l'autre sous l'action d'une contrainte extérieure (la polarisation piézoélectrique)

En l'absence de toute contrainte extérieure dans une couche de nitrure de *structure wurtzite*, celui-ci peut présenter une polarisation spontanée. Cette dernière s'explique par le fait que la structure *würtzite* n'est pas symétrique par rapport au plan (0001). En effet, lors de la croissance d'une couche GaN, par exemple, il peut y avoir deux arrangements possibles des atomes de gallium et d'azote. Dans la direction de croissance [0001], la dernière couche atomique déposée sera composée d'atomes de gallium, on dit que l'on a une polarité gallium ou face Ga [18]. Inversement, dans la direction de croissance [0001], la dernière couche atomique déposée sera composée d'azote, on dit alors qu'on a une polarité azote ou face N (Voir figure II.10).

En somme, la polarisation spontanée va entraîner une séparation spatiale des porteurs de charges, créant ainsi une accumulation de charges aux interfaces qui peut changer les propriétés électriques du matériau (Figure II.11).

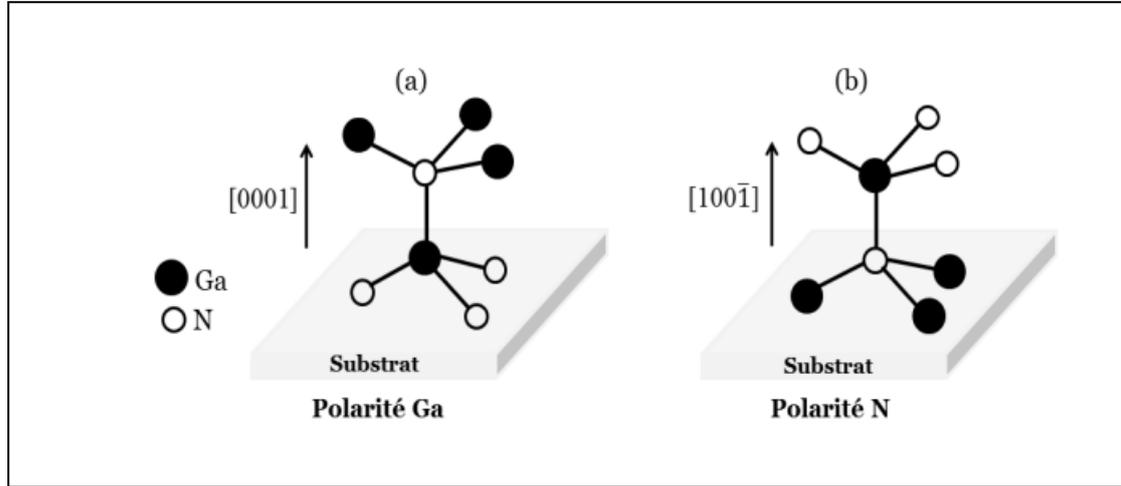


Figure II.10. Polarisations Ga et N pour le *GaN* hexagonal.

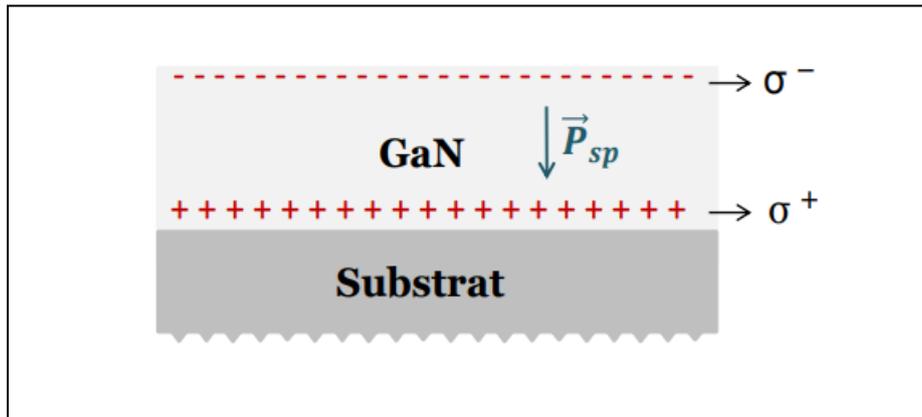


Figure II.11. Génération de la densité surfacique de charge (σ) par la polarisation spontanée dans un cristal *GaN wurtzite* polarité gallium.

Pour le nitrure de gallium indium (*InGaN*), la polarisation spontanée (P_{sp}) est modélisée par une interpolation quadratique reliant les valeurs des PSP des deux éléments binaires qui le composent (*InN* et *GaN*) et la composition d'indium (x) avec un paramètre de courbure $b = 0,038\text{C/m}^2$ [19]. On a donc l'expression suivante.

$$P_{sp}(\text{InGaN}) = x \times P_{sp}(\text{InN}) + (1 - x) \times P_{sp}(\text{GaN}) - b \times x \times (1 - x), \quad (\text{II.4})$$

Où x est la concentration en indium dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, b est le paramètre de courbure, $P_{sp}(\text{InGaN})$ est la polarisation spontanée de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $P_{sp}(\text{InN})$ et $P_{sp}(\text{GaN})$ sont les polarisations spontanées de InN et GaN respectivement. Leurs valeurs sont reportées dans le tableau II.1.

TABLEAU II.1. Valeurs de la polarisation spontanée pour le *GaN* et l'*InN*

$P_{sp}(\text{C}/\text{m}^2)$	InN		GaN	
	Vurgaftman et al.	Bernardini et al.	Vurgaftman et al.	Bernardini et al.
	-0,042	-0,032	-0,034	-0,029

Outre la polarisation interne, la déformation de la maille cristalline sous l'effet d'une contrainte (tension ou compression) entraîne l'apparition d'une polarisation piézoélectrique (P_{pi}) dans le matériau [21]. Cette polarisation est définie comme la création d'un champ électrique suite à la déformation de la maille. Cette déformation est généralement due au désaccord de maille entre le matériau et le substrat lors de la croissance épitaxiale. L'effet inverse existe également, à savoir la création de déformations mécaniques lorsqu'on applique un champ électrique dans le matériau.

Comme la polarisation spontanée, la polarisation piézoélectrique trouve essentiellement son origine dans la non centrosymétrie de la structure cristalline et la nature fortement ionique des liaisons chimiques. Cependant, elle n'est pas orientée forcément dans la même direction que la polarisation spontanée. Sa direction dépend de la nature de la déformation, si le matériau subit une déformation en compression ou une déformation en tension. La polarisation piézoélectrique va donc, selon sa direction, renforcer ou affaiblir la polarisation spontanée.

Pour l'alliage *InGaN*, la polarisation piézoélectrique peut être calculée à partir d'une interpolation linéaire (loi de Vegard) du type [19] :

$$P_{pi}(\text{InGaN}) = xP_{pi}(\text{InN}) + (1 - x)P_{pi}(\text{GaN}), \quad (\text{II.5})$$

Où x est la concentration d'indium dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $P_{pi}(\text{InGaN})$ est la polarisation piézoélectrique de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $P_{pi}(\text{InN})$ et $P_{pi}(\text{GaN})$ sont les polarisations piézoélectriques de *InN* et GaN.

La polarisation piézoélectrique dépend de la déformation du paramètre de maille et peut s'exprimer par la relation suivante [21] :

$$P_{pi} = 2 \times \frac{a_s - a_0}{a_0} \times (e_{31} - \frac{c_{13}}{c_{33}} \times e_{33}), \quad (\text{II.6})$$

Où a_s est le paramètre de maille du substrat et a_0 , celui de la couche épitaxiée. e_{31} et e_{33} sont des constantes piézoélectriques, c_{13} et c_{33} sont des constantes élastiques [GPa].

Les valeurs des paramètres piézoélectriques et élastiques du *GaN* et de l'*InN* sont reportées dans le tableau II.2, on peut remarquer que la valeur de cette expression ($e_{31} - c_{13}/c_{33} \times e_{33}$) est toujours négative. Le signe de la polarisation piézoélectrique des nitrures

TABLEAU II.2 .Paramètres piézoélectriques et élastiques du *GaN* et de l'*InN*

	e_{33} (C/m ²)	e_{31} (C/m ²)	c_{13} (GPa)	c_{33} (GPa)
InN	0,81	-0,41	94	200
	0,97	-0,57	92	224
GaN	0,67	-0,34	100	392
	1,27	-0,35	106	398

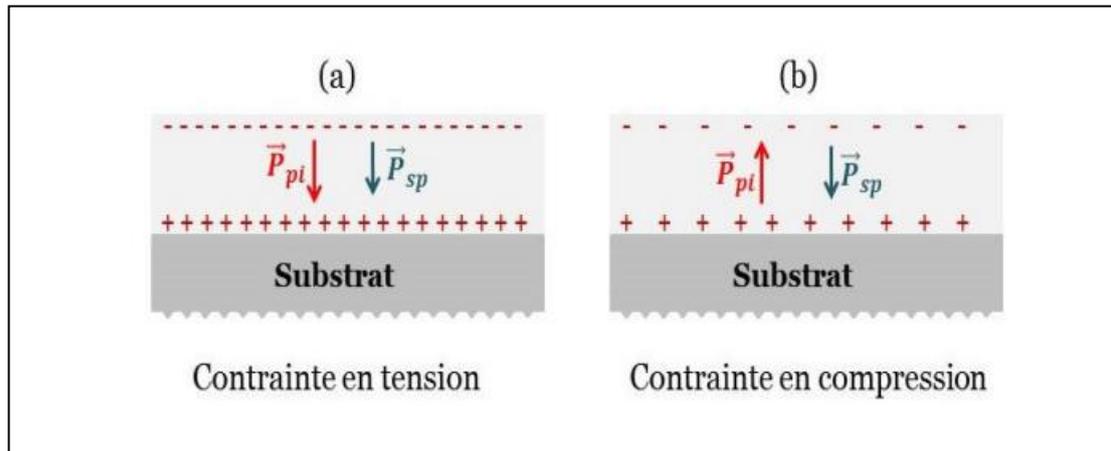


Figure II.12. Orientation de la polarisation piézoélectrique et de la polarisation spontanée d'une couche d'*InGaN* polarité Gallium contrainte en tension a) et contrainte en compression b)

D'éléments III dépend donc du signe de l'expression ($a_s - a_0$). Si $a_s > a_0$, la structure est en tension sur son substrat, P_{pi} est négative. Si $a_s < a_0$, structure en compression, P_{pi} est positive.

La polarisation totale (P_{totale}) du matériau InGaN est alors la somme des polarisations spontanée et piézoélectrique :

$$P_{totale} = P_{sp} + P_{pi}. \quad (II.7)$$

Considérons une couche *d'InGaN* de polarité gallium élaborée sur un substrat. Deux cas de figure peuvent se présenter : dans le cas où la couche d'InGaN est en tension, la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique seront de même sens et la polarisation totale dans le matériau se verra augmenter. Par contre, si la couche *d'InGaN* est en compression, les deux polarisations seront de sens opposés et la polarisation totale va diminuer (Figure II.12). Cette polarisation du matériau peut interférer dans le comportement d'une cellule solaire selon l'orientation et l'intensité de la polarisation, et avoir, selon les cas, un effet néfaste ou bénéfique sur les performances photovoltaïques.

II.2.1.3 Les propriétés optiques du matériau

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent les propriétés dues à l'interaction du matériau avec la lumière. Il s'agit essentiellement de l'indice de réfraction et du coefficient d'absorption du matériau, paramètres essentiels dans le cas de cellules solaires. La définition de l'indice de réfraction d'un matériau est donnée par un nombre complexe qui s'écrit sous la forme :

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda), \quad (II.8)$$

Où n est la partie réelle de l'indice de réfraction, λ est la longueur d'onde et k le coefficient d'extinction qui traduit l'absorption.

L'indice de réfraction d'un matériau dépend de la longueur d'onde de la lumière d'excitation. Pour *InGaN*, il peut être estimé par une interpolation quadratique reliant les valeurs de l'indice du *InN* et du *GaN* avec un paramètre de courbure [24].

Le coefficient d'absorption est un paramètre important pour les cellules solaires décrit notamment par la partie imaginaire de l'indice de réfraction (k). Il permet de déterminer la profondeur de pénétration du rayonnement et l'épaisseur de matériau nécessaire. L'absorption va ainsi déterminer la fraction de photons absorbés et donc la quantité de paires électron-trou photogénérés.

Si un faisceau de lumière d'intensité I_i tombe sur le matériau, une fraction de cette intensité (I_t) sera transmise à l'intérieur. Pour une couche de semi-conducteur d'épaisseur (d), l'intensité transmise (I_t) peut être décrite par la relation suivante (*loi de Beer Lambert*) :

$$I_t(\lambda) = I_i(\lambda) \times \exp(-\alpha(\lambda)d). \quad (\text{II.9})$$

Où λ est la longueur d'onde et α le coefficient qui est lié au coefficient d'extinction (k) par la relation suivante :

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda}. \quad (\text{II.10})$$

Concernant *l'alliage InGaN*, Hori et al. [25] ont montré les variations des coefficients d'absorption dans *InGaN* pour différentes compositions d'indium (Figure I.13). Les études précédentes ont aussi montré que *l'alliage InGaN* a un coefficient d'absorption (de l'ordre de 10^5 cm^{-1}) dix fois plus élevé que celui du silicium monocristallin. Ce qui fait de *l'alliage InGaN* un matériau de choix pour la fabrication de cellules photovoltaïques en couches minces.

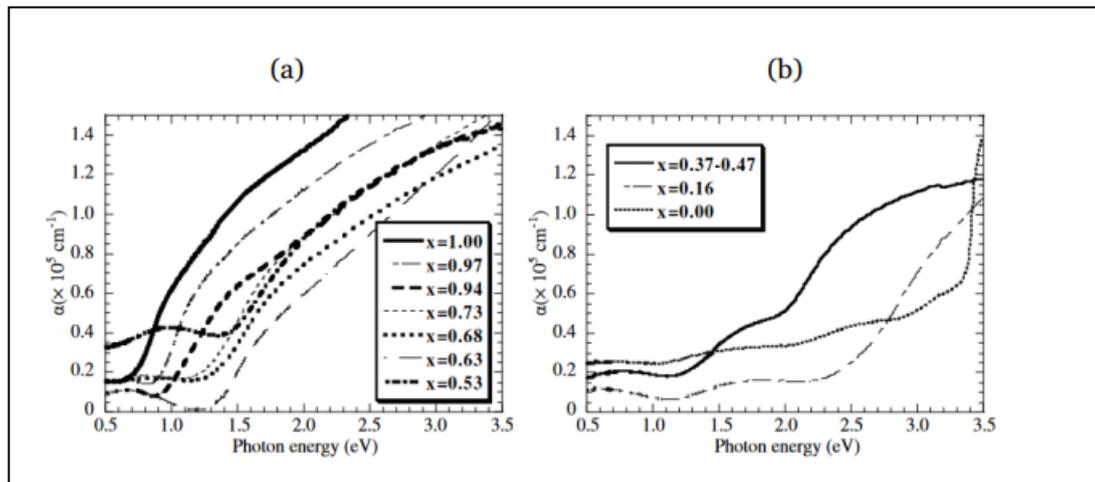


Figure II.13. Courbes d'absorption de couches d'*InGaN* élaborées avec différentes compositions d'indium :

a) avec des fortes concentrations d'indium.

b) avec des faibles concentrations d'indium [25].

II.2.2 Les propriétés électriques

II.2.2.1 L'expression du gap de l' $In_xGa(1-x)N$

Comme les autres nitrures, la principale *caractéristique d'InGaN*, pour laquelle il est largement étudié est sa bande d'énergie interdite (gap) directe [26]. Cette dernière peut être exprimée selon la loi de *Vegard* modifiée qui relie les valeurs des bandes interdites de *InN* et du *GaN*. InN et GaN sont tous deux des matériaux à gap direct. On parle de semi-conducteur à gap direct lorsque le maximum de la bande de valence est aligné au minimum de la bande de conduction dans l'espace des vecteurs d'onde des électrons. Inversement, on parle de semi-conducteur à gap indirect lorsque le maximum de bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à des valeurs distinctes dans l'espace des vecteurs d'onde.

Après plusieurs années de controverse, la structure de bande de *InN* est maintenant bien établie avec une bande d'énergie interdite de 0,7 eV [27]. Pour GaN, la bande d'énergie interdite est de 3,42 eV [27].

La loi de *Vegard* utilisée pour déterminer le gap d'*InGaN* est une loi empirique indiquant que les valeurs des propriétés d'un alliage (bande d'énergie interdite, paramètre de maille, constantes élastiques, etc.) peuvent être déterminées par une interpolation linéaire des valeurs des propriétés de ses composants. Cependant, pour le gap d'*InGaN*, les valeurs mesurées ne sont pas en totale adéquation avec les valeurs obtenues avec l'interpolation linéaire, on introduit alors un paramètre de courbure dans l'expression afin de suivre les données expérimentales. Le gap d'*InGaN* est donc donné par une loi de Vegard avec un paramètre de courbure [27–29] :

$$E_g^{InGaN} = x.E_g^{InN} + (1-x)E_g^{GaN} - x.b.(1-x), \quad (II.11)$$

Où E_g^{InGaN} est la bande d'énergie interdite d'*InGaN*, E_g^{InN} et E_g^{GaN} sont les bandes d'énergie interdites d'*InN* et GaN, x est la concentration d'indium dans $In_xGa(1-x)N$ et b le paramètre de courbure

Il faut noter que les mesures de la bande interdite d'*InGaN* n'ont été faites que pour des gammes limitées de composition en Indium et qu'il existe une disparité importante des valeurs du paramètre de courbure (b) reportées dans la littérature. Cette disparité peut être

attribuée à plusieurs facteurs : la valeur du gap $d'InN$ considérée, la méthode de mesure du gap $d'InGaN$, ou encore l'effet des contraintes.

II.3. Cellules solaires à base $d'InGaN$

Depuis une dizaine d'années déjà, plusieurs études ont été menées sur différentes structures de cellules solaires à base $d'InGaN$. Ceci, comme nous l'avons déjà souligné, grâce à sa large couverture spectrale accordable couvrant une gamme d'énergie entre 0,7 eV à 3,4 eV et un coefficient d'absorption élevé. Nous allons donc voir dans cette partie, l'état de l'art des cellules solaires à base $d'InGaN$, d'abord en présentant les structures simples de type PN et PIN qui ont été explorées d'abord et ensuite les structures complexes. Un tableau (II.4) résumera à la fin l'état de l'art des cellules solaires à base $InGaN$.

II.3.1. Cellules solaires à simple jonction

Les structures de cellules solaires PIN (Structure composée d'une couche intrinsèque (I) intercalée entre une couche dopée P et une couche dopée N) hétérojonctions à base $d'InGaN$ ont été largement étudiées ces dernières années. L'un des premiers travaux sur les cellules solaires a été celui de Jani et al. [10] en 2007. Ils ont fabriqué par MOVPE et étudié une cellule solaire à jonction PIN en double hétérojonction avec une composition d'indium de la couche $InGaN$ de 0,05. Ils ont rapporté un V_{CO} de 2,4 V, un I_{CC} de 3,7 mA/cm² et un FF de 0,78. Même si le rendement n'a pas été précisé et ne peut être calculé du fait d'un manque de données sur l'éclairement dans cet article, le V_{CO} élevé montre le potentiel de ce matériau.

Dans la même période, une équipe de l'université de Californie à Santa Barbara [10], a réalisé une autre étude sur structure de cellule solaire PIN à hétérojonction fabriquée aussi par MOVPE. La composition d'indium de la couche $InGaN$ est 0,12. La structure est sous éclairement AM0 et elle fournit les performances suivantes : un V_{CO} de 1,81V, un I_{CC} de 4,2 mA/cm² et un FF de 0,753. A partir de ces données, on détermine le rendement de la cellule qui est de l'ordre de 4,1% si on considère que l'éclairement AM0 utilisé est standard. Dans cet article, les auteurs ont montré que le rendement quantique externe η_{ext} de la cellule peut être amélioré en optimisant le contact métallique interdigité face avant (couche P). Ils ont donc montré que pour un espacement des contacts de 25 μ m le rendement quantique externe est de 51% alors que pour un espacement de 166 μ m le rendement quantique est de 63% ce qui améliore les performances de la cellule. On voit donc bien ici l'importance d'optimiser

l'espacement des contacts métalliques qui permet en effet de réduire le taux d'ombrage sur la face avant de la cellule solaire

II.3.2. Cellules solaires à multi –jonction

Pour la technologie multi jonction à base d'*InGaN*, des études ont également été réalisées sur différentes structures de cellules solaires. En 2008, Zhang et al. [10] ont simulé une cellule solaire multijonction à base d'*InGaN*. C'est une structure composée de deux jonctions : la première avec une composition d'indium de 0,48 et la seconde avec une composition d'indium de 0,73. Ils obtiennent un rendement de conversion de 35,1%. Cependant, la jonction tunnel qui devrait relier électriquement les deux sous-cellules n'a pas été considérée dans cette étude, ce qui expliquerait en grande partie ce très haut rendement. De plus, dans leur démarche de modélisation, le rendement quantique interne est égal au rendement quantique externe ; aucune perte de photons n'est donc considérée. Les phénomènes de recombinaison, les phénomènes de polarisation et les défauts structuraux ne sont pas pris en compte non plus et le coefficient d'absorption est considéré constant en composition d'indium et en longueur d'onde dans toute la structure. La modélisation utilisée par Zhang et al. [10] est donc peu réaliste, ce qui conduit à des performances surestimées.

En 2014, Young et al. [10] ont élaboré par MOVPE, une structure multi jonction avec une couche de puits quantiques *InGaN/GaN* (Figure II.24). Ils ont utilisé un revêtement optique à large bande pour améliorer l'absorption de la lumière. La structure sous éclairage AM0, fournit un rendement de 3,33% avec un V_{co} de 2,26 V et un I_{cc} de 2,97 mA/cm².

L'alliage *InGaN* est également étudié pour réaliser des structures hétérojonctions *InGaN/Si*. Hsu et al. [10] ont montré par simulation, qu'il est possible d'atteindre les 31% de rendement avec un gap d'*InGaN* autour de 1,65 eV et une épaisseur de silicium de 20 μm. La structure est une double jonction : une jonction PN à base d'*InGaN* connectée en série

Avec une autre jonction PN à base de silicium. L'étude ne tient pas compte de la jonction tunnel reliant les deux jonctions. Dans le tableau II.4, nous avons résumé l'état de l'art concernant les différentes structures de cellules solaires à base d'*InGaN*. Pour chaque type de structure, nous avons reporté les caractéristiques électriques de la cellule ou le rendement obtenu.

tableau II.4 l'état de l'art concernant les différentes structures de cellules solaires à base d'*InGaN*.

Année	Structures	Performances	Réalisation
Cellules solaires à hétérojonction à base d'<i>InGaN</i>			
2007	InGaN/GaN (1 soleil)	$V_{CO} = 2,4V$, $I_{CC} = 3,8mA/cm^2$	MOVPE
2008	InGaN/GaN (AM0)	$V_{CO} = 1,81V$, $I_{CC} = 4,2mA/cm^2$	MOVPE
2009	Schottky/InGaN/GaN	$V_{CO} = 0,91V$, $I_{CC} = 7mA/cm^2$	MOVPE
2014	InGaN/GaN (AM1.5G)	$V_{CO} = 0,25V$, $I_{CC} = 6mA/cm^2$	MOVPE
Cellules solaires P-(MQW)-N à hétérojonction à base d'<i>InGaN</i>			
2010	P-(MQW)-N (AM1.5)	$\eta = 2,9\%$	MOVPE
2011	P-(MQW)-N (AM1.5)	$\eta = 35\%$.	Simulation
2011	P-(MQW)-N (AM1.5)	$V_{CO} = 1.89V$, $I_{CC} = 1.06mA/cm^2$	MOVPE
2011	P-(MQW)-N (150 soleil)	$\eta = 2,23\%$	MOVPE
2016	P-(MQW)-N (AM1.5G)	$\eta = 2,3\%$	MOVPE
2017	P-(MQW)-N (AM1.5G)	$\eta = 3,56\%$	MOVPE
Cellules solaires à homojonction à base d'<i>InGaN</i>			
2009	InGaN homo (AM1.5)	$V_{CO} = 2,24V$, $I_{CC} = 1,40mA/cm^2$	MOVPE
2009	InGaN homo (AM1.5)	$V_{CO} = 2,36V$, $I_{CC} = 1,71mA/cm^2$	MOVPE
2013	InGaN homo (AM1.5)	$V_{CO} = 1,5V$, $I_{CC} = 0,5mA/cm^2$	MOVPE
2014	InGaN homo (AM1.5)	$\eta = 17\%$	Simulation
cellules solaires multijonction à base d'<i>InGaN</i>			
2008	InGaN/Si (AM1.5)	$\eta = 31\%$	Simulation
2008	InGaN homo (AM1.5)	$\eta = 35,1\%$	Simulation
2014	InGaN/GaN MQW (AM0)	$\eta = 3,33\%$	MOVPE

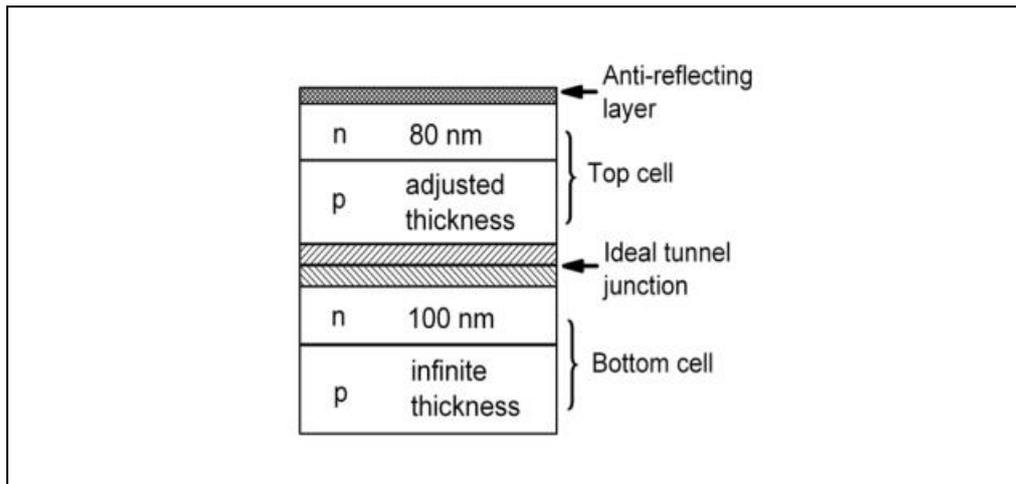


Figure II.14. Schéma de la cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al. [12]

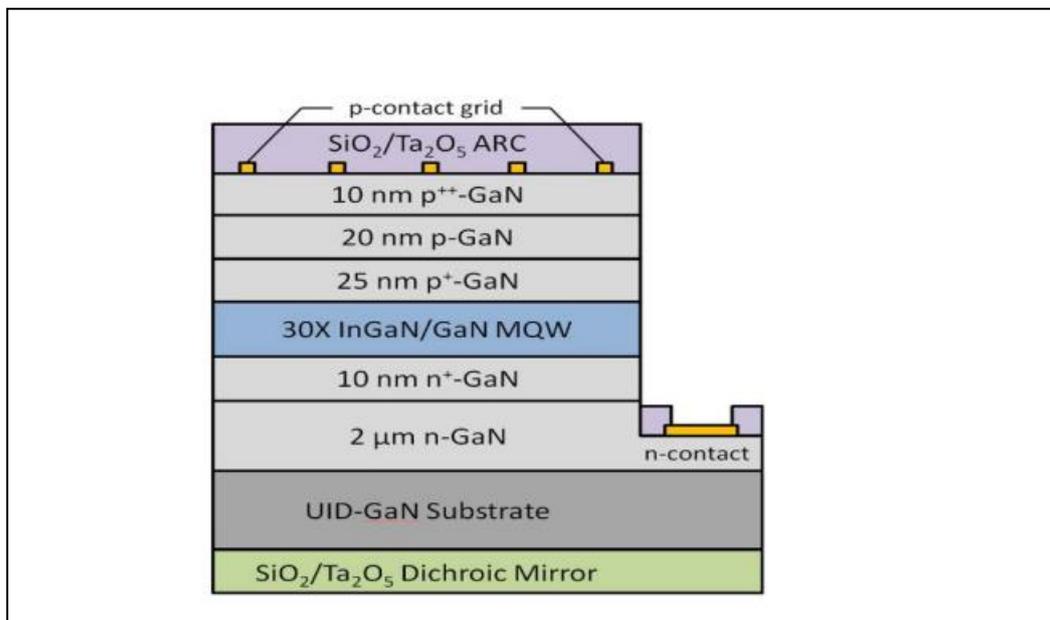


Figure II.15. Schéma de la cellule solaire multi jonction proposée par Young et al. [12]

II.4. Conclusion

L'électricité photovoltaïque est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules PV. Dans ce chapitre Nous avons présenté l'influence de variation de propriété sur le rendement de cellule , comme les propriétés structurales « cristallographie , propriétés optiques , propriétés électriques .

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Le but de l'étude de simulation est de comprendre physiquement la structure développée d'une cellule solaire donnée et d'analyser la tension de circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit J_{sc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un logiciel capable de simuler de tels paramètres cellulaires. Plusieurs logiciels de simulation existent, dont nous avons utilisé le logiciel wxAMPS (Microelectronic and Photonic Structural Analysis).

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation des caractéristiques électriques, du courant-tension et de la réponse spectrale d'une cellule solaire InGaN de type PN à l'aide du logiciel wxAMPS. Pour chaque structure, une recherche spécifique a été effectuée pour trouver les paramètres simulés de la cellule qui présentaient la meilleure efficacité de conversion. À cette fin, l'influence de l'épaisseur et du dopage de l'élément de cellule solaire sur les paramètres de sortie de la cellule, c'est-à-dire la tension de circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit J_s , la forme du facteur FF et le rendement de conversion η ont été établis.

III.2. Logiciel de simulation wxAMPS

Le programme wxAMPS est un nouveau logiciel de simulation de structure de cellules solaires basé sur le logiciel original bien connu AMPS (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures) [1].

wxAMPS est conçu avec une bibliothèque C++ multiplateforme. Son interface est développée à l'aide de la bibliothèque multiplateforme wxWidgets, le noyau est basé sur une version plus récente d'AMPS (Analysis of Microelectronics and Photonics Structures).

III.2.1. Utilisation du logiciel wxAMPS

wxAMPS est un logiciel de simulation populaire pour simuler des cellules solaires à couches minces. C'est un outil très flexible et polyvalent pour simuler des dispositifs semi-conducteurs 1D, notamment des diodes, des photodiodes et des cellules photovoltaïques. Les couches de ces structures peuvent être monocristallines, polycristallines, amorphes ou une combinaison [2].

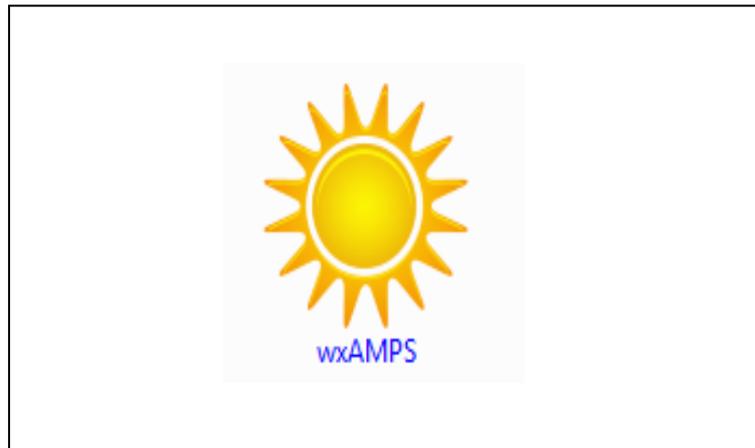


Figure III.1. Icône du logiciel wxAMPS sur PC [2].

III.2.2. Caractéristiques du logiciel wxAMPS

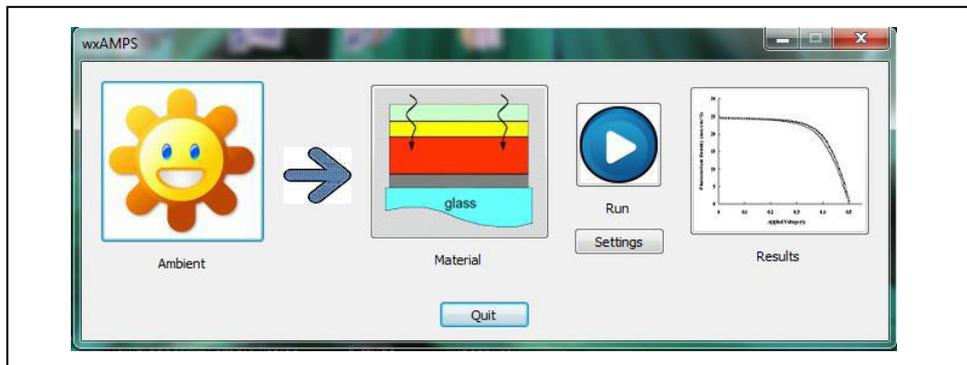
Elle peut définir les propriétés du matériau (ex : sa bande interdite (bande interdite), affinité, dopage, mobilité, etc.) et la conception du dispositif, la structure contrôle les propriétés physiques globales du dispositif et sa réponse à la lumière, à la tension appliquée et à la température.

Utilisez le logiciel wxAMPS pour obtenir des réponses de l'appareil à des situations données telles que la polarisation de la lumière, les changements de tension ou de température et explorez les changements dans les paramètres internes de l'appareil tels que les diagrammes de bande, les composants de courant, les taux de recombinaison et les champs électriques comme la position, l'intensité lumineuse, la tension et la température Une fonction de l'appareil [2].

Les caractéristiques électriques qu'il peut produire sont :

- ✚ Caractéristiques éclairées et non éclairées (J-V).
- ✚ Efficacité quantique (QE) des cellules solaires et des photodiodes sous tension de polarisation et illumination.

L'interface AMPS Figure III.2 se compose de trois boîtes de dialogue. Chaque paramètre donne les paramètres nécessaires avant que wxAMPS ne démarre la simulation



.Figure III.2. Page d'accueil de l'interface utilisateur [2].

III.2.3 Dialogues

Ils donnent:

- ✚ Conditions environnementales.
- ✚ Propriétés matérielles de chaque couche
- ✚ Paramètres de modélisation : type de modèle, pas de grille pour le calcul numérique, tension de polarisation qui doit produire les sorties (J-V) et (QE) [3].

III.2.3.1. Conditions environnementales

Nous contrôlons la température à 300°K (température ambiante). Si nous augmentons ou diminuons la température, nous entrons le facteur de température dans la simulation.

- ✚ Si nous simulons avec de la lumière, nous cochons la case correspondante.
- ✚ Si nous définissons l'éclairage comme le spectre FullAM1.5.spe, ici l'angle de 41,8° correspond à la position du soleil au lever ou au coucher du soleil.
- ✚ Si on coche la case QE, le calcul inclura également le calcul du rendement quantique QE On définit le biais appliqué dans la case « Bias Voltage », en cliquant sur « Load » on sélectionne la tension souhaitée, par exemple en sélectionnant (Light0_0.4_1.vol) (Fig. III.3) représente la plage de tension de 0 volt à 1 volt par pas de 0,4 volt.

Enfin, nous appuyons sur le bouton "OK"

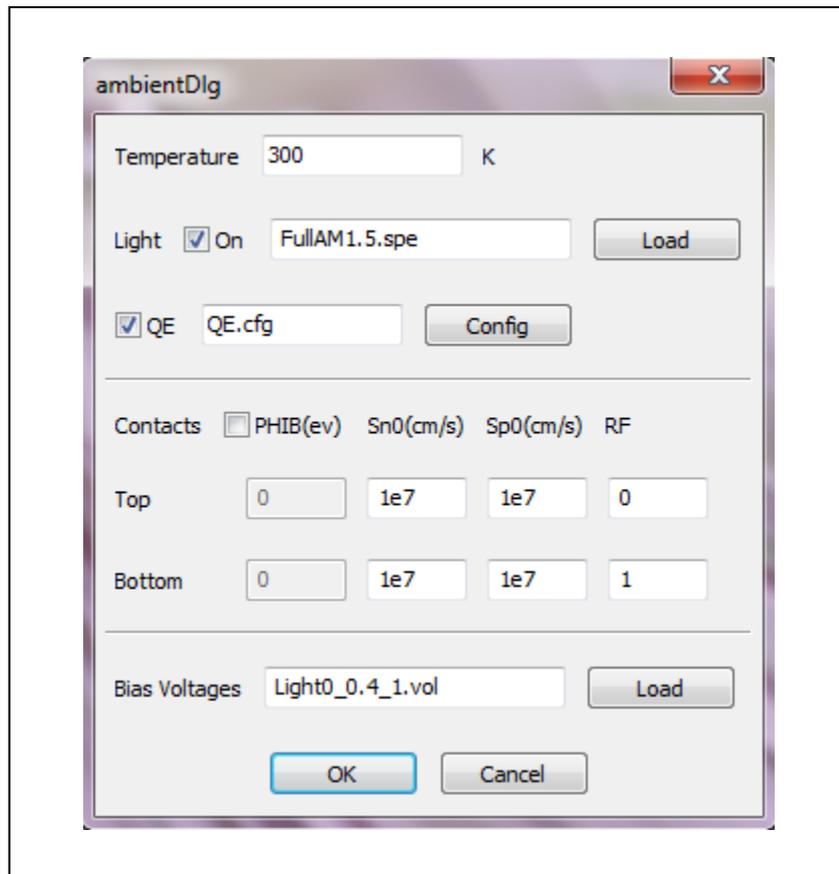


Figure III.3. Interface des conditions environnementales.

III.2.3.2. Propriétés du matériau de chaque couche

La Figure III.4 montre l'interface de saisie des paramètres de matériau pour chaque couche. Ces paramètres sont : l'épaisseur de la couche, les paramètres électriques (constante diélectrique, bande interdite, affinité électronique, densité effective, mobilité électrique et dopage), les paramètres de défaut (section efficace de piégeage, densité, niveau d'énergie), les paramètres optiques (absorption lumineuse) et les paramètres avancés (paramètres de convergence numérique).

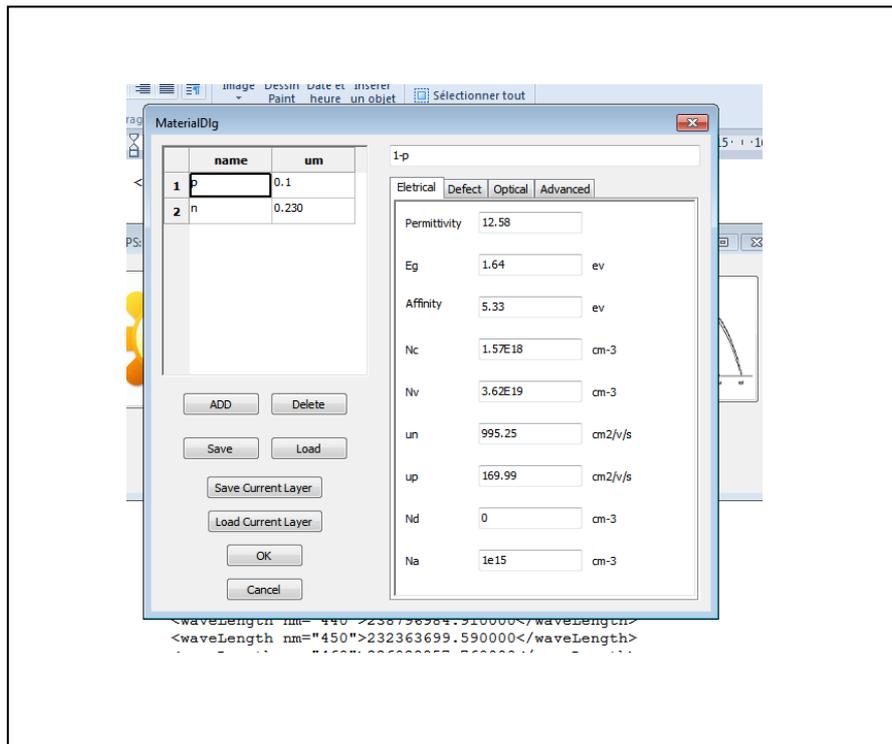


Figure III.4. Boîte de dialogue pour la saisie des paramètres du matériau.

III.2.3.3. Paramètres de modélisation

Pour la simulation, nous cochons la case `oui` et ainsi le logiciel commence l'exécution Figure III.5.

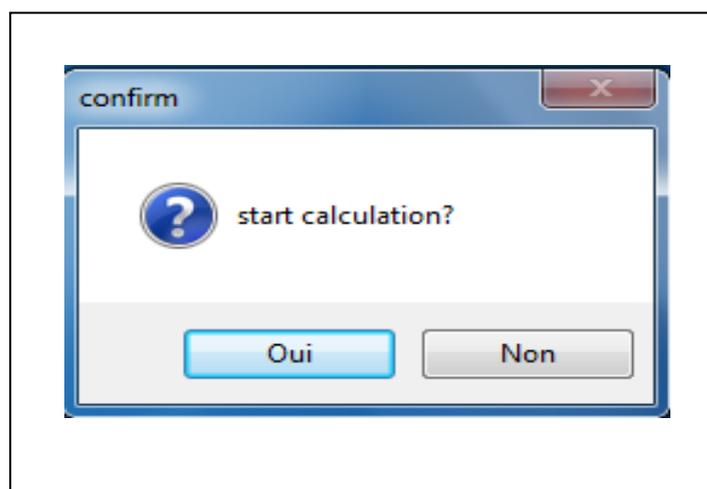


Figure III.5. Interface de l'exécution.

Pendant le processus de simulation, une boîte de dialogue de progression s'affiche, qui permet aux utilisateurs de savoir que le calcul s'effectue normalement.

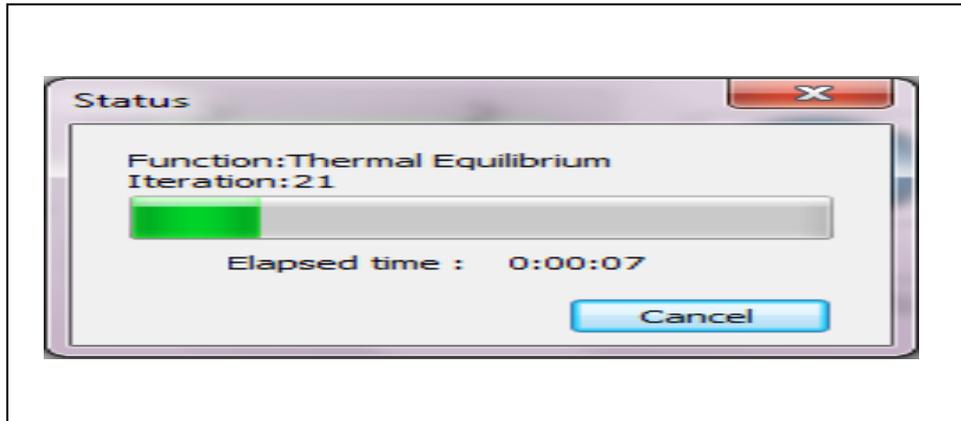


Figure III.6. Boîte de dialogue pour progression s'affiche.

III.3. Simulation des paramètres influençant sur les caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire à base d'*InGaN*

Pour avoir l'effet des paramètres initialement mentionnés fixes sur les caractéristiques photovoltaïques de la cellule, nous avons varié ceux-ci un par un, tout en fixant les autres. Ainsi, plusieurs paramètres sont retenus :

- ✚ L'effet de l'épaisseur de la couche (p) de l'*InGaN* varie de 0.05 à 2 μm .
- ✚ L'effet de la composition du dopage de la couche (p) de l'*InGaN* varie de $(1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} - 9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3})$.
- ✚ L'effet de l'épaisseur de la couche (n) de l'*InGaN* varie entre 0.2 à 4.5 μm .
- ✚ L'effet de la composition du dopage de la couche (n) de l'*InGaN* varie entre $(1 \times 10^{15} - 9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3})$.

Le paramètre x correspondant à la concentration d'Indium a été choisi égal à $x=0.52$. En se basant sur les équations du chapitre précédent, nous pouvons calculer les différents paramètres de simulations comme suit :

Coefficient d'absorption :

$$a(\chi) = 2.2 \times 10^5 \sqrt{\left(\frac{1.24}{\lambda}\right) - E_g} \quad (\text{III.1})$$

Affinité électronique :

$$\chi = 4.1 + 0.7(3.4 - E_g) \quad (\text{III.2})$$

Mobilité des charges porteuses :

$$u_i(N) = u_{min,i} + \frac{u_{max,i} - u_{min,i}}{1 + \left(\frac{N}{N_{g,i}}\right)^{\gamma_i}} \quad (\text{III.3})$$

Permittivité relative :

$$\varepsilon_r = 14.6x + (1 - x)10.4 \quad (\text{III.4})$$

Les paramètres physiques de $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ définis dans l'interface du logiciel wxAMPS sont présentés dans le tableau III.1 ci-dessous :

Paramètres	Couche (p)	Couche (n)
Epaisseur de la couche (μm)	0.05	0.950
Permittivité relative	5.33	5.33
Affinité électronique (eV)	12.58	12.58
Energie du gap E_g (eV),	1.64	1.64
Densité effective des états dans la bande de conduction, N_c (cm^{-3})	1.57E18	1.57E18
Densité effective des états dans la bande de valence, N_v (cm^{-3})	3.62E19	3.62E19
Mobilité des électrons un ($\text{cm}^2/\text{v.s}$)	955	685
Mobilité des électrons up ($\text{cm}^2/\text{v.s}$)	169.8147	153.34
Concentration des atomes accepteurs, N_a (cm^{-3})	0	1E17
Concentration des atomes donneurs, N_d (cm^{-3})	1E16	0

Tableau III.1. Paramètres de la cellule solaire utilisés dans le logiciel wxAMPS.

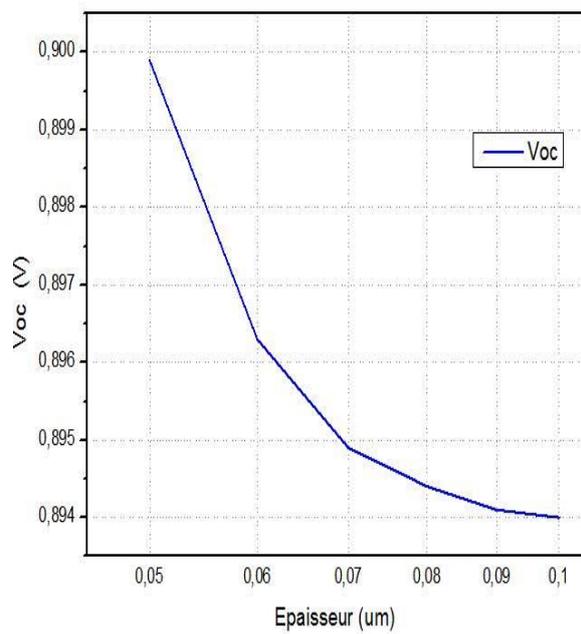
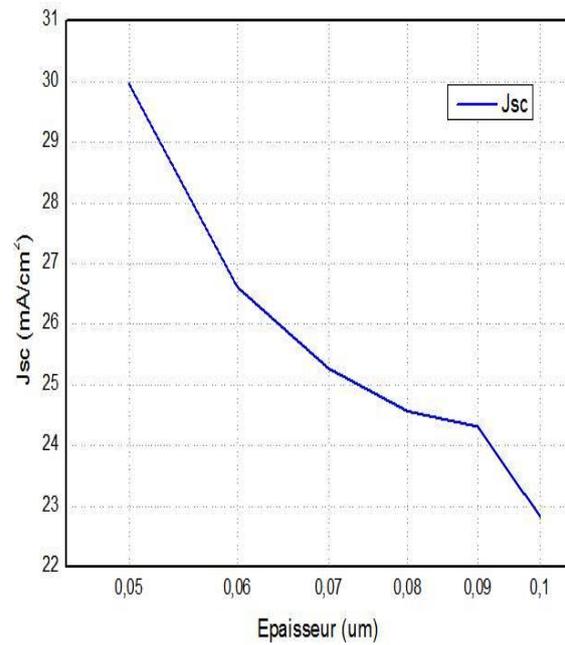
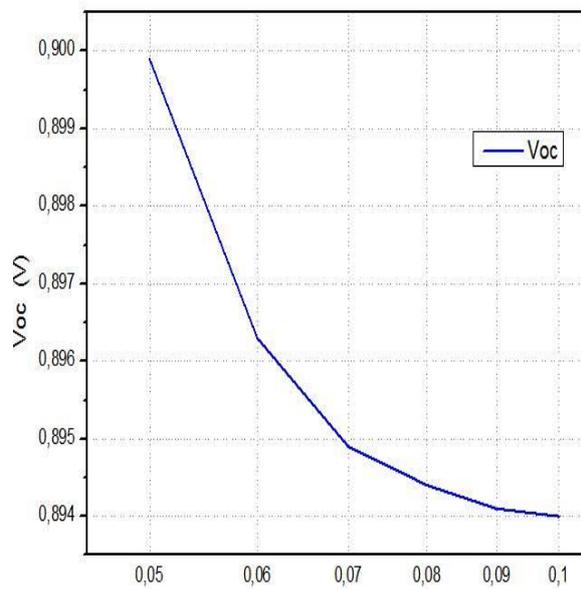
III.4. L'effet des paramètres sur les performances de la cellule

III.4.1. L'effet de l'épaisseur de la couche (p)

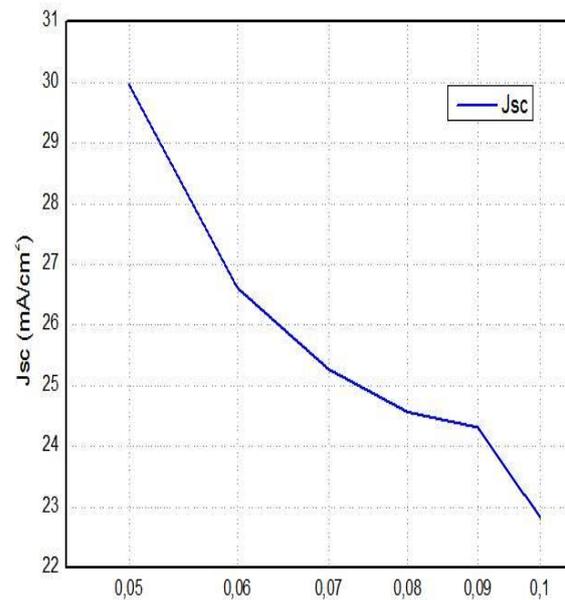
Les principaux paramètres initiaux utilisés dans la structure $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ sont cités comme suit :

- ✚ L'épaisseur de la couche (p) est égale à $0.05 \mu\text{m}$
- ✚ La composition du dopage de la couche (p) : $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
- ✚ L'épaisseur de la couche (n) : $0.950 \mu\text{m}$
- ✚ La composition du dopage de la couche (n) : $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$

En introduisant les paramètres de simulation dans le logiciel wxAMPS et en faisant varier l'épaisseur de la couche (p), nous obtenons les courbes de la tension de circuit ouvert V_{CO} , le courant de court-circuit J_{sc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η tracées sur les Figures III.7, a, b, c et d.

a) Variation du V_{co} b) Variation du J_{sc} 

c) Variation du facteur FF



d) Variation de l'efficacité (%).

Figure III.7. Caractéristiques de la cellule solaire à base $\text{In}_{0,52}\text{Ga}_{0,48}\text{N}$, a) V_{co} , b) J_{sc} , c) FF et d) η pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche (p).

D'après les Figures ci-dessus, nous pouvons remarquer que les performances de la cellule diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche (p), ce qui signifie que l'épaisseur est importante pour l'absorption des photons. Donc, les porteurs photo générés doivent parcourir une grande distance avant d'être collectés par le contact. Cette grande distance augmente la probabilité de recombinaison, ce qui conduit généralement à une diminution du courant de court-circuit J_{sc} et par suite le rendement de la cellule solaire.

III.4.2. L'effet de l'épaisseur de la couche (n)

En fixant la valeur de l'épaisseur de la couche (p) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ à $0.05 \mu\text{m}$ et en faisant varier l'épaisseur de la couche (n) en préservant les mêmes paramètres initiaux du tableau, nous obtenons les courbes des Figures III.8 ci-dessous.

D'après les Figures obtenues, nous pouvons remarquer que les performances de la cellule augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche (n), ce qui signifie que l'augmentation de l'épaisseur améliore l'absorption des photons, l'efficacité de la collection et un nombre plus important de porteurs photo générés. Le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche (n) jusqu'à atteindre la valeur maximale à $0.8 \mu\text{m}$ puis commence à diminuer. Cette perte est due à la perte de porteurs avant d'atteindre le contact n. Le rendement de la cellule solaire augmente avec l'épaisseur de la couche n.

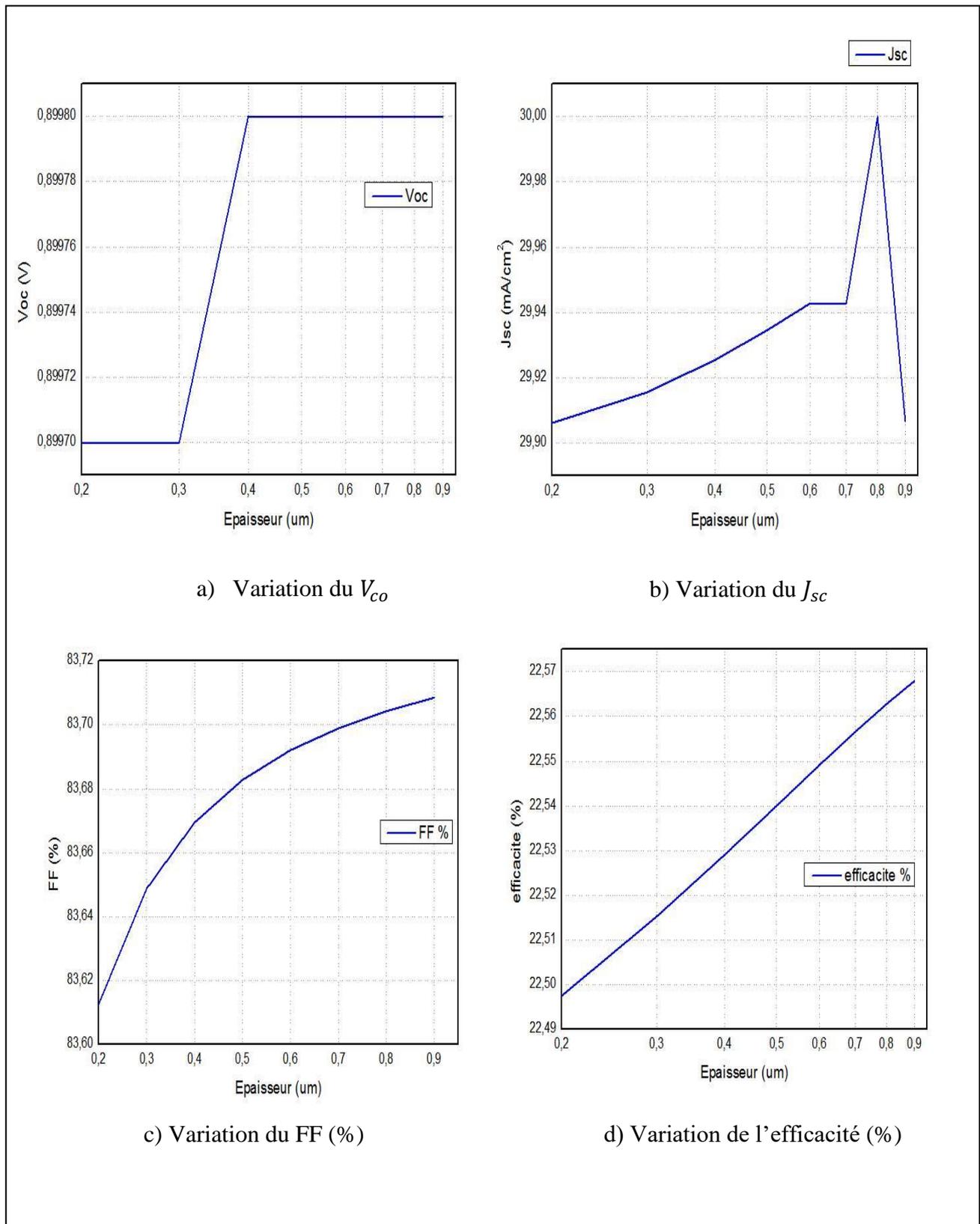


Figure III.8. Caractéristiques de la cellule solaire à base $In_{0.52}Ga_{0.48}N$,

a) V_{oc} , b) J_{sc} , c) FF et d) η pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche (n).

III.4.3. L'effet de la composition du dopage (p)

Dans cette section, la valeur de l'épaisseur de la couche (p) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ est prise égale à $0.05\mu\text{m}$, l'épaisseur de la couche (n) est prise égale à $0.950\mu\text{m}$ et la concentration du dopage de la couche (p) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ est variable. Et la concentration du dopage de la couche (n) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ est égale à $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. En préservant les mêmes paramètres initiaux du tableau, nous obtenons les courbes des Figures III.9.1 et III.9.2 respectivement.

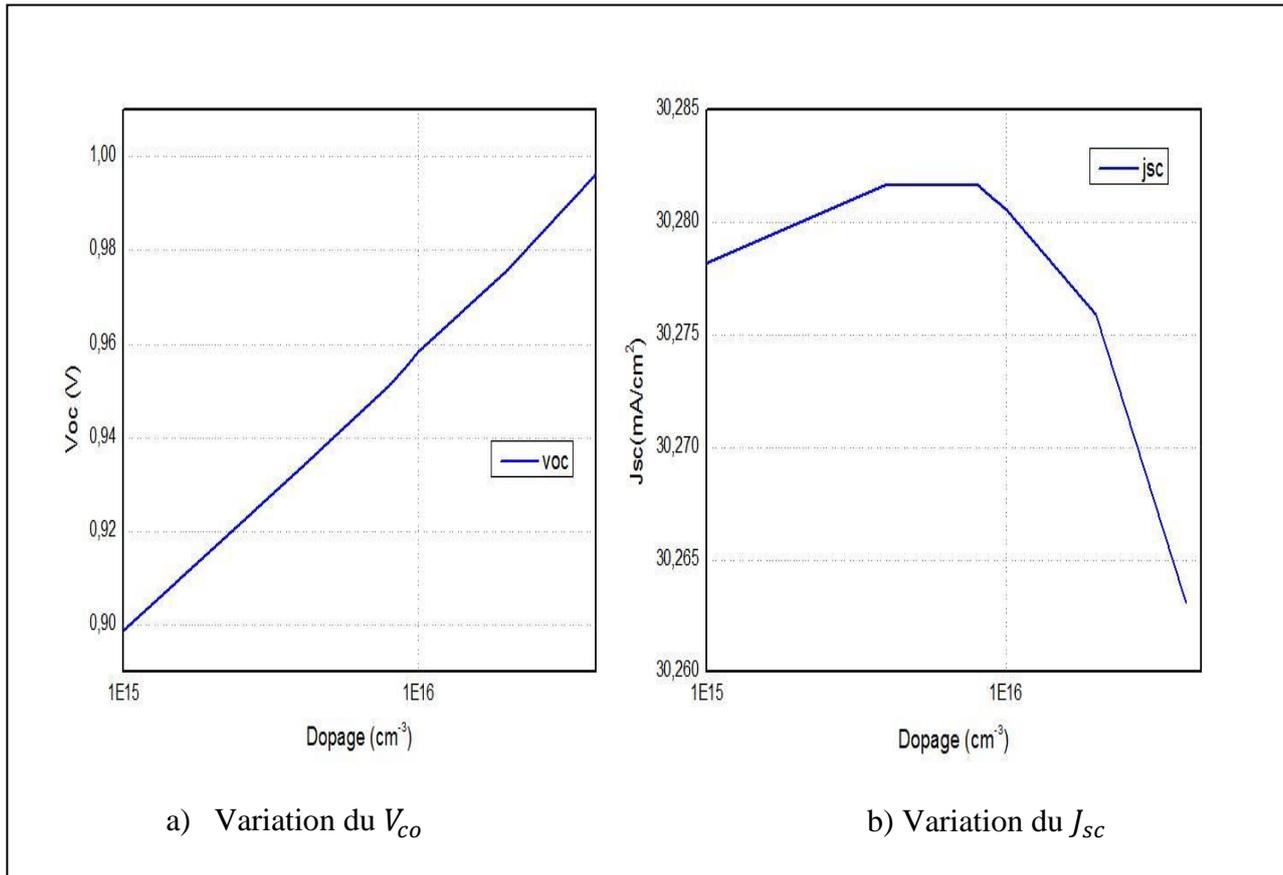
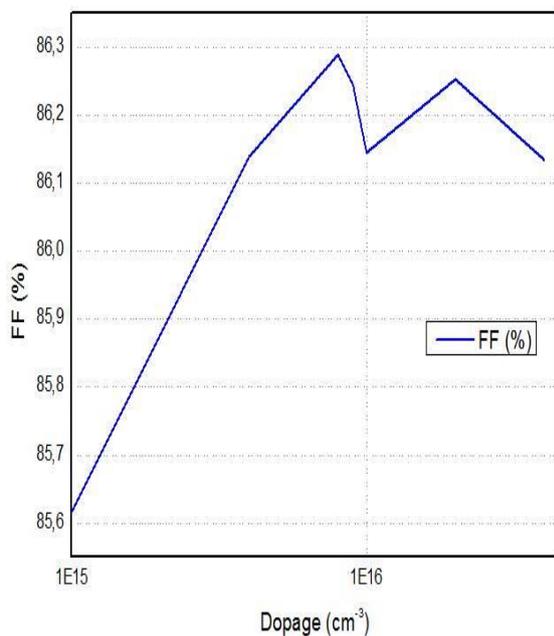


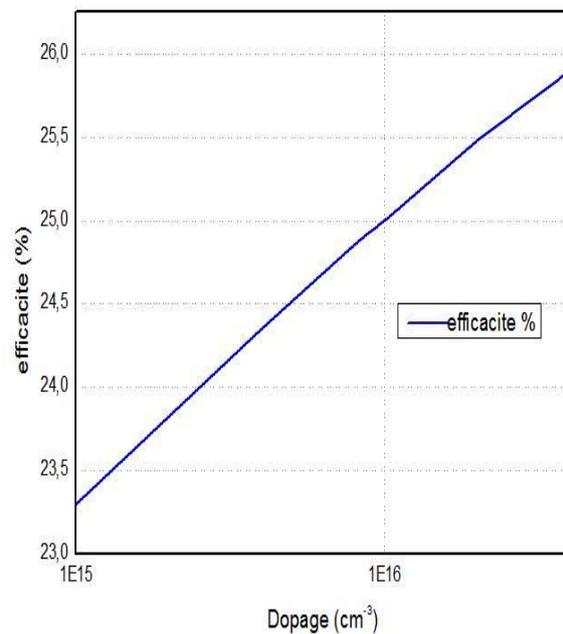
Figure III.9.1. Caractéristiques de la cellule solaire à base de $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$, a) V_{oc} , b) J_{sc} , pour différentes valeurs de la composition du dopage de la couche (p) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$.

D'après les Figures III.9.1 et III.9.2 tracées, nous pouvons remarquer que le courant de court-circuit J_{sc} augmente pour atteindre une valeur maximum à $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ puis commence à diminuer rapidement. La diminution de la concentration du dopage entraîne une augmentation de la mobilité des porteurs μ , qui provoque l'augmentation du coefficient de diffusion des porteurs D et c'est ainsi que la longueur de diffusion augmente, conduisant à une meilleure collecte des porteurs de charges libres générés par la lumière conformément aux équations : II.5, II.6 et III.3. L'augmentation de la concentration de la couche p conduit à une

diminution de la largeur de la zone de charge d'espace, ce qui augmente la perte par recombinaison et diminue par la suite le courant de court-circuit J_{sc} . Cependant, la tension du circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme et le rendement (efficacité) augmentent avec la concentration du dopage.



c) Variation du FF (%).



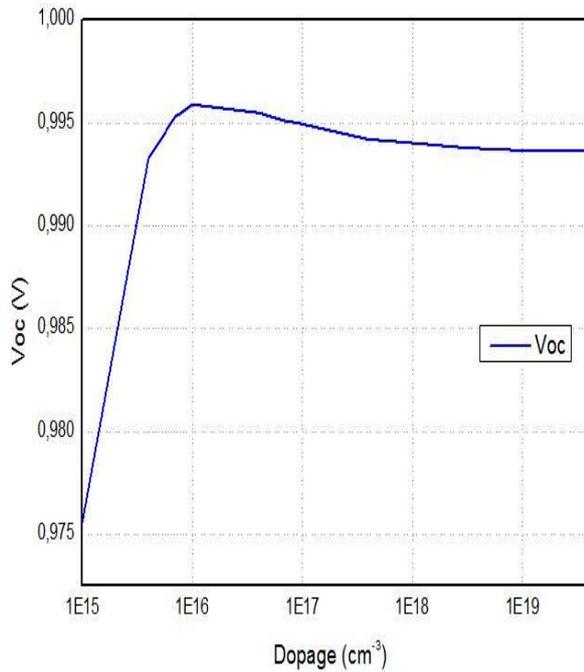
d) Variation de l'efficacité (%).

Figure III.9.2. Caractéristiques de la cellule solaire à base d' $\text{In}_{0,52}\text{Ga}_{0,48}\text{N}$, c) FF et d) η pour différentes valeurs de la concentration du dopage de la couche (p) $\text{In}_{0,52}\text{Ga}_{0,48}\text{N}$.

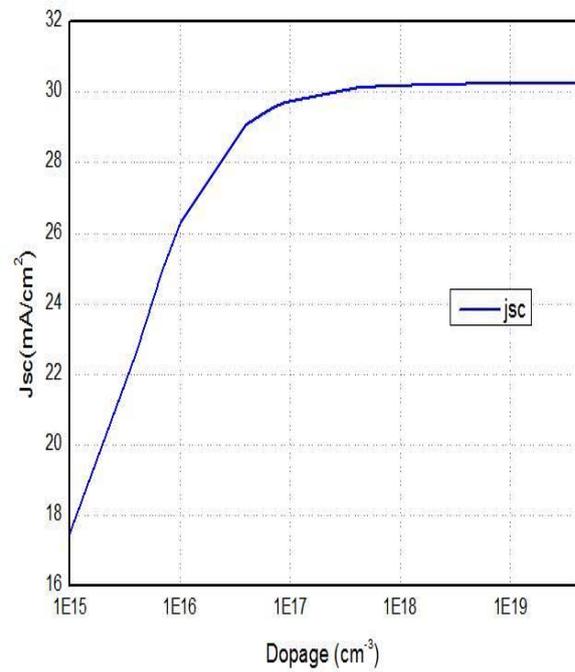
III.4.4. L'effet de la composition du dopage de la couche (n)

Nous fixons les valeurs des paramètres de la cellule solaire comme suit : l'épaisseur de la couche (p) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ prise égale à $0.05 \mu\text{m}$, l'épaisseur de la couche (n) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ égale à $0.950 \mu\text{m}$ et la contraction du dopage de la couche (p) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ est égale à $4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. En faisant varier la contraction du dopage de la couche (n) $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$, nous obtenons les courbes des Figures III.10 ci-dessous.

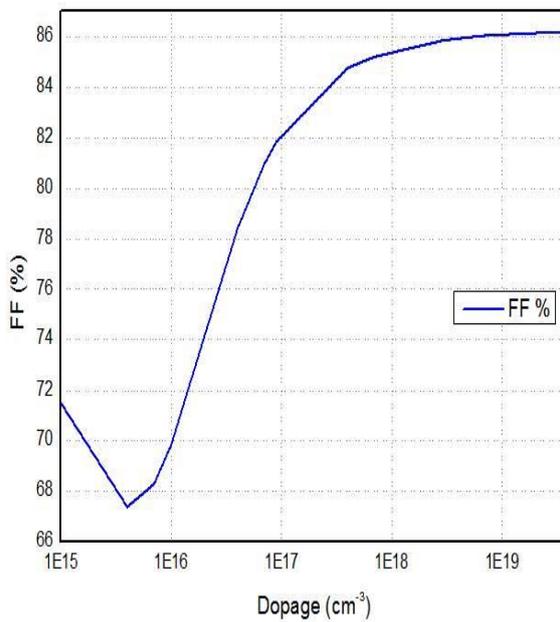
D'après les Figures III.10, nous pouvons remarquer que les paramètres caractérisant la cellule, la tension V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement η augmentent avec la concentration du dopage jusqu'à atteindre des valeurs maximales puis restent constantes. De la même manière, la diminution de la concentration du dopage de la couche n conduit à une meilleure collecte de porteurs de charges libres générés par la lumière. Le rendement de collecte de la zone de charge d'espace diminue lorsqu'il est très proche de la surface où intervient l'effet de la recombinaison en surface. En conséquence, lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente, le rendement augmente d'abord puis diminue à la fois.



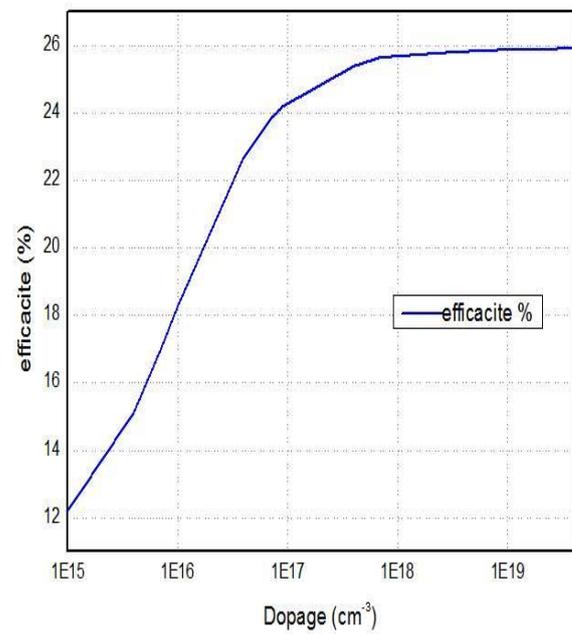
b) Variation du V_{co}



b) Variation du J_{sc}



c) Variation du FF (%).



d) Variation de l'efficacité

Figure III.10. Caractéristiques de la cellule solaire à base $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$, a) V_{co} , b) J_{sc} , c) FF et d) η pour différentes valeurs de la concentration du dopage de la couche (p).

III.5. Caractéristique courant-tension de la cellule solaire $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$

La caractéristique courant-tension de la cellule solaire $\text{In}_x\text{G}_{1-x}\text{N}$ pour les valeurs des paramètres de la cellule optimale est représentée sur la Figure III .11. La tension de circuit ouvert V_{co} est égale à 0.9584 V, le courant de court-circuit J_{sc} égale 30.2846 mA/cm^2 , le facteur de forme FF est de 86.145 % et le rendement de conversion η égale à 25.0034%.

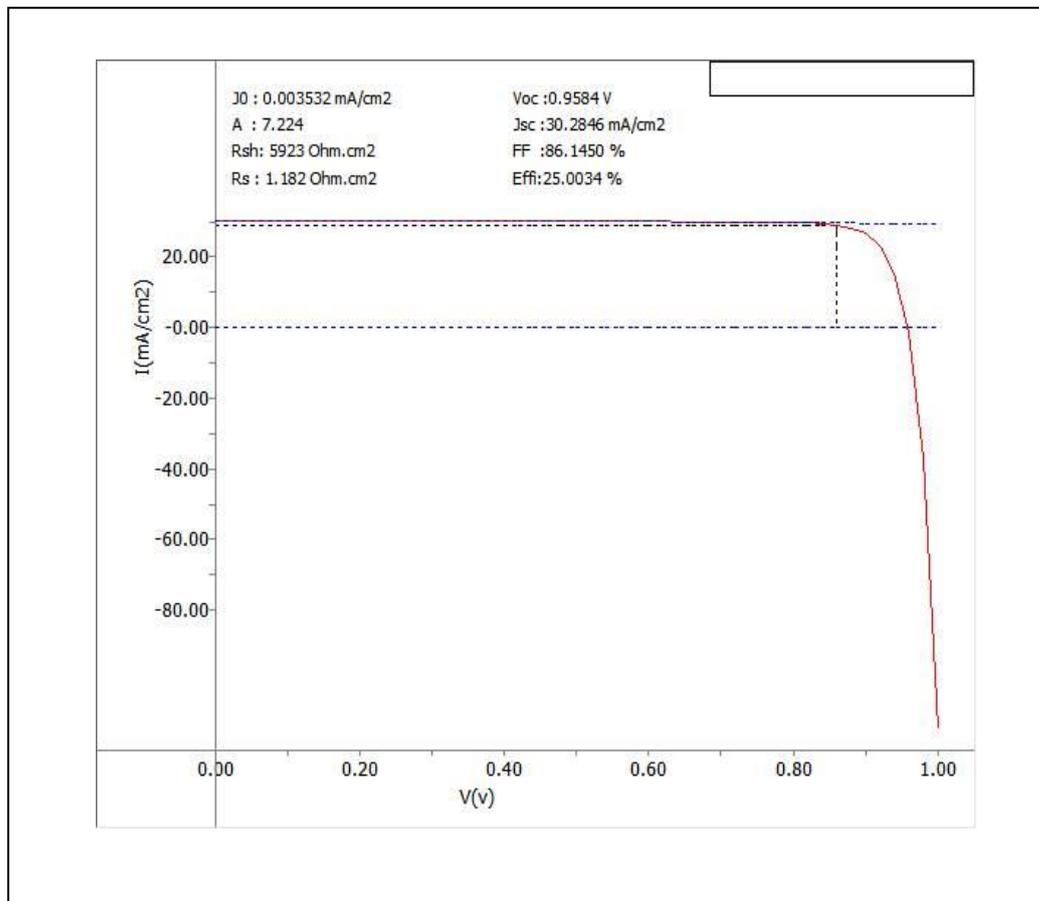


Figure III.11. Caractéristique courant-tension de la cellule PN à base $\text{In}_{0.52}\text{G}_{0.48}\text{N}$.

III.6. Courbe du rendement quantique de la cellule solaire $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$

Nous pouvons remarquer que lorsque la longueur d'onde augmente, le rendement quantique de la cellule solaire, c'est-à-dire le nombre de paires électrons-trous produites par photon incident, diminue jusqu'à atteindre la valeur nulle à la longueur d'onde de $740 \mu\text{m}$ comme le montre la Figure. III.12.

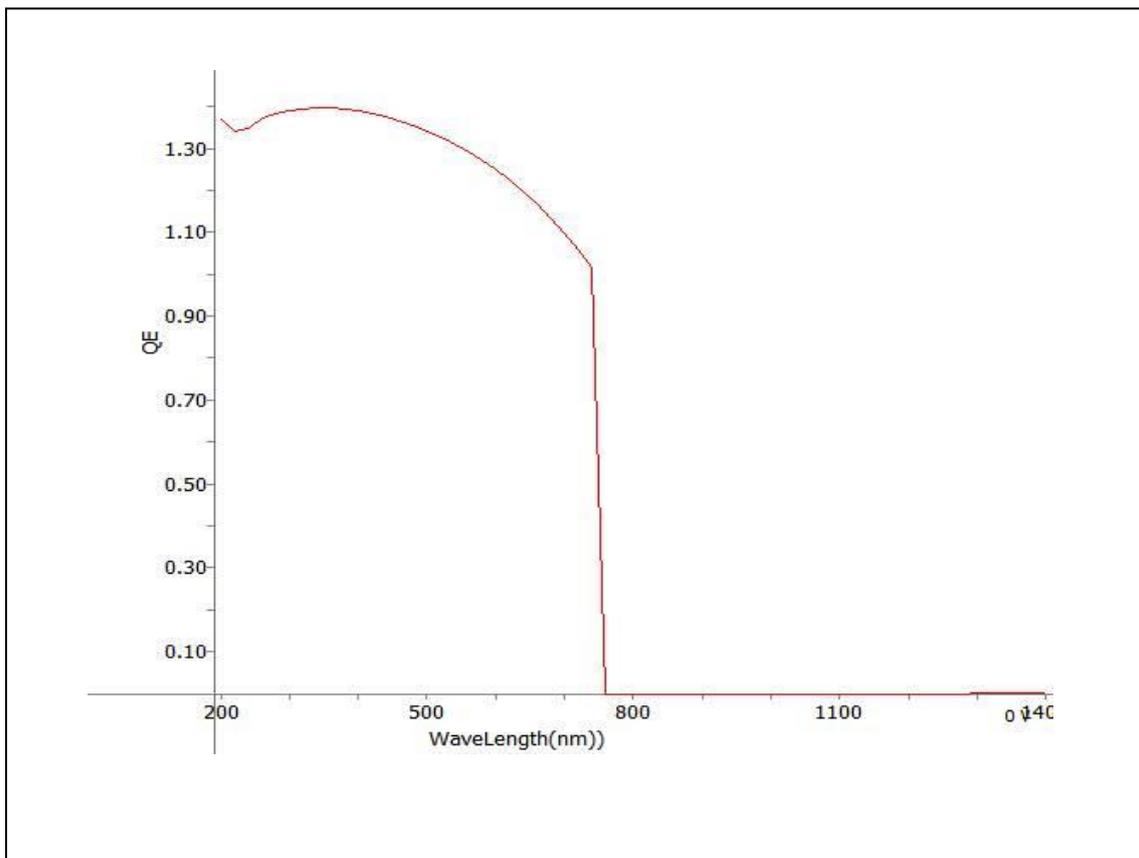


Figure III .12. Courbe du rendement quantique de la cellule solaire à base $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations d'une cellule solaire de type PN à base d'*InGaN*. Après optimisation, les meilleures performances photovoltaïques ont été obtenues pour les valeurs des paramètres de la structure suivantes :

L'épaisseur de la couche (p) est $0.05\mu m$, la concentration du dopage de la couche (p) est $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, l'épaisseur de la couche (n) est $0.950 \mu m$ et la concentration du dopage de la couche (n) est $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

D'après les résultats de simulation, les caractéristiques de cette cellule sont les suivantes :

La tension de Circuit ouvert V_{oc} égale à 0.9584 V, le courant de court-circuit J_{sc} égale à 30.2846 mA/cm^2 , le facteur de forme FF est de 86.1450 % et le rendement de conversion η obtenu optimal égale à 25.0034%.

Conclusion générale

Depuis plus d'une décennie, les matériaux III-V sont intensément étudiés pour des applications optoélectroniques et photovoltaïques. En particulier, l'alliage *InGaN* fut largement étudié pour des applications photovoltaïques grâce à sa large couverture spectrale pouvant couvrir le spectre solaire de l'infrarouge à l'ultraviolet, ses bonnes caractéristiques électriques et sa résistance à de fortes puissances.

Dans ce mémoire, nous avons présenté en détails le principe de fonctionnement, les caractéristiques et propriétés électroniques et optiques de l'*InGaN*. Les optimisations des caractéristiques électriques, courant-tension et réponse spectrale, d'une cellule solaire en *InGaN* simple jonction de type PN ont été effectuées en utilisant le logiciel wxAMPS. Pour chaque structure, on a procédé à une recherche particulière pour retrouver les paramètres de optimisation des cellules présentant le meilleur rendement de conversion. Pour ce faire, une étude sur les effets de l'épaisseur et du dopage des éléments des cellules solaires sur les paramètres de sortie de la cellule qui sont, la tension de circuit ouvert V_{oc} , le courant de court circuit J_s , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η a été établie.

Après optimisation, les meilleures performances photovoltaïques ont été obtenues pour les valeurs des paramètres de la structure suivantes :

L'épaisseur de la couche (p) est $0.05 \mu m$, la concentration du dopage de la couche (p) est $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, l'épaisseur de la couche (n) est $0.950 \mu m$ et la concentration du dopage de la couche (n) est $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

D'après les résultats de optimisation, les caractéristiques optimales de cette cellule sont les suivantes : La tension de Circuit ouvert V_{oc} égale à 0.9584 V , le courant de court-circuit J_{sc} égale à 30.2846 mA/cm^2 , le facteur de forme FF est de 86.145% et le rendement de conversion η obtenu optimal égale à 25% .

ملخص

الطاقة الشمسية الكهروضوئية هي طاقة كهربائية تنتج من الإشعاع الشمسي وهي جزء من الطاقات المتجددة. يحول الطاقة الضوئية مباشرة إلى طاقة كهربائية من خلال الخلايا الشمسية. من بين المواد الجديدة التي تعتبر واعدة للخلايا الكهروضوئية ، تمت دراسة سبيكة InGaN بشكل مكثف لأكثر من عشر سنوات. منذ أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين ، تمت دراسته من أجل الخلايا الكهروضوئية بفضل فجوة الطاقة المحظورة الواسعة والمباشرة والقابلة للتعديل والتي يمكن أن تغطي الطيف الشمسي من الأشعة تحت الحمراء إلى الأشعة فوق البنفسجية.

في هذا السياق ، درسنا تشغيل خلية ضوئية أحادية الوصلة (PN) تعتمد على InGaN عن طريق محاكاة رقمية أحادية البعد تحت الإضاءة باستخدام طيف AM1.5 يتم إجراؤه باستخدام برنامج المحاكاة Wxamps. بدأنا بتذكر الخصائص الرئيسية للخلية الشمسية مع جميع المعلمات الفيزيائية المقابلة من أجل تحليل تأثيرها على كفاءة التحويل. وبالتالي ، يتم الاحتفاظ بالعديد من المعلمات مثل سمك طبقات الخلية الشمسية PN وتركيز المنشطات في منطقتي n و p من الخلية. تظهر نتائج المحاكاة بعد التحسين أن تركيز الإنديوم 0.52 يؤدي إلى كفاءة تحويل مثالية تبلغ 25٪ ، تيار دائرة قصر 30.2846 مللي أمبير / سم² ، جهد دائرة مفتوحة 0.95 فولت وعامل شكل 86.145٪.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الضوئية، الخلايا الشمسية، V_{oc} ، $wxAMPS$ ، η ، FF ، J_{sc} ، ..

Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire qui fait partie des énergies renouvelables. Elle convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par des cellules solaires. Parmi les nouveaux matériaux considérés prometteurs pour le photovoltaïque, l'alliage *InGaN* étudié intensément depuis plus d'une dizaine d'années. Depuis le début des années 2000, il est étudié pour le photovoltaïque grâce à son large, direct et modulable gap d'énergie interdite pouvant couvrir le spectre solaire de l'infrarouge à l'ultraviolet.

Dans ce contexte, nous avons étudiés le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque simple jonction (PN) à base d'*InGaN* par la simulation numérique à une dimension sous éclairage avec un spectre AM1.5 effectuée avec le logiciel de simulation Wxamps. Nous avons commencé par rappeler les caractéristiques principales de la cellule solaire avec l'ensemble des paramètres physiques correspondants afin d'analyser leurs influences sur le rendement de conversion. Ainsi, plusieurs paramètres sont retenus tels que l'épaisseur des couches de la cellule solaire PN et la concentration du dopage des régions n et p de la cellule. Les résultats de simulations après

optimisation montrent qu'une concentration d'Indium de 0.52, conduit à un rendement de conversion optimum de 25%, un courant de court-circuit de 30.2846 mA/cm², une tension de circuit ouvert 0.95 V de et un facteur de forme 86.145 %.

Mots clés : Photovoltaïque, cellules solaires, V_{CO} , J_{SC} , FF, η , wxAMPS

Abstract

Photovoltaic solar energy is electrical energy produced from solar radiation which is part of renewable energies. It converts light energy directly into electrical energy through solar cells. Among the new materials considered promising for photovoltaics, the InGaN alloy has been studied intensely for more than ten years. Since the early 2000s, it has been studied for photovoltaics thanks to its wide, direct and adjustable forbidden energy gap that can cover the solar spectrum from infrared to ultraviolet.

In this context, we have studied the operation of a single junction (PN) photovoltaic cell based on InGaN by one-dimensional numerical simulation under illumination with an AM1.5 spectrum performed with the simulation software Wxamps. We started by recalling the main characteristics of the solar cell with all the corresponding physical parameters in order to analyze their influences on the conversion efficiency. Thus, several parameters are retained such as the thickness of the layers of the PN solar cell and the concentration of the doping of the n and p regions of the cell. The results of simulations after optimization show that an Indium concentration of 0.52 leads to an optimum conversion efficiency of 25%, a short-circuit current of 30.2846 mA/cm², an open circuit voltage of 0.95 V and a form factor 86.145%.

Keywords : Photovoltaic, solar cells, V_{CO} , J_{SC} , FF, η , wxAMPS.