



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

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

**Université Abbes Laghrou Khenchela  
Faculté des Sciences et Technologie**

**Département des Sciences de la Matière**



N° de série : .....

## **Mémoire de fin d'études**

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Filière : Physique**

**Spécialité : Physique des Matériaux**

**Intitulé :**

# **Simulation Des Diodes Electroluminescentes Emettant Dans Le Bleu**

**Dirigé par : Dr. KHEMISSI Saad-Eddine**

**Réalisé par :**

- Souisse Nor elhouda
- Belmanaa Khaoula

**Membres de jury :**

- |                         |           |
|-------------------------|-----------|
| • Dr. MELLAL Saida      | Président |
| • Dr. SAADANE Abderaouf | Examineur |

**Soutenue le : /06/ 2022**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Remerciements*

*Nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la patience de pouvoir ce modeste travail.*

*Je voudrais exprimer toute ma gratitude à notre encadreur Dr. KHEMISSE Saad-Eddine ma directrice de mémoire pour la confiance qu'elle m'a témoignée en m'acceptant de diriger ce travail de recherche, son aide précieuse dans le domaine scientifique et sa disponibilité durant cette période de formation.*

*je tiens à remercier mes chère mères, mes pères, mes sœurs, mes frères, pour sa patience et sa confiance.*

*Enfin je remercie évidemment tous mes amies qui m'ont encouragée et tous qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Un grand merci à tous.....*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A ALLAH le tout puissant, le clément le miséricordieux. Et*

*à son*

*prophète MOHAMMED paix et salut sur lui.*

*A l'homme de ma vie, à mon exemple éternel, à celui qui a*

*réussi à*

*m'inspirer, à me donner confiance en moi et en l'avenir, à*

*celui qui se sacrifie*

*pour me voir heureuse, à mon cher père.*

*A celle qui m'a donné la vie, à la lumière de mes jours, à*

*celle qui m'a*

*accompagnée par ses prières, sa douceur, c'est la flamme de*

*mon cœur et la*

*source de mon bonheur, à ma chère mère.*

*Aux purs esprits de mes chers frères*

*Aux étoiles sur la terre qui illuminent ma vie, à mes chères*

*sœurs*

*A tous ceux qui m'ont aimée et ne méritent jamais d'être*

*oubliés.*

*Houda*

## *Dédicaces*

*Louange à "ALLAH" Maître de l'Univers, et paix et salut sur notre prophète*

*MOHAMMED "صلى الله عليه و سلم"*

*A celui qui est pour moi le symbole de la force, et qui m'a encouragé dans ma vie face à toutes difficultés à mon très cher père..*

*A l'exemple de sacrifice qui m'a soutenu et encouragé, qu'ALLAH le protège ma mère.*

*A mon cher frère. A ma chère sœur.*

*À ma très chère fille **Emilya***

*Enfin, je veux dédier ce travail à qui était toujours à mes côtés, qui m'a beaucoup soutenu et encouragé, ma source de bonheur et de joie, que dieu te garde pour moi mon mari*

*Khaoula*

## *Liste des tableaux*

---

<b>Tableau N°</b>	<b>Titre du tableau</b>	<b>La page</b>
<b>I.1</b>	Extrait de la classification périodique des éléments	<b>7</b>
<b>I.2</b>	Paramètres des principaux composés binaires(III-V)	<b>8</b>
<b>I.3</b>	Les différentes familles des diodes électroluminescentes	<b>23</b>
<b>I.4</b>	Comparaison des différentes méthodes pour obtenir de la lumière blanche les LED	<b>25</b>
<b>II.1</b>	Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe.	<b>36</b>
<b>III.1</b>	Paramètres utilisés pour la simulation (la structure à 4QW)	<b>45</b>

## *Liste des figures*

---

Figure N°	Titre	La page
<b>Chapitre I</b>		
I.1	Bandes d'énergie pour les matériaux :Isolant , Semi-conducteur et Conducteur	4
I.2	Semi-conducteurs, type N et type P	5
I.3	Formation d'une jonction PN	6
I.4	Processus de recombinaison radiative: (a) direct, (b) indirecte	9
I.5	Processus de recombinaison Auger : (a) direct, (b) indirecte	9
I.6	Processus de recombinaison Shockley-Read-Hall	10
I.7	Processus de recombinaison en surface	11
I.8	Maile unitaire, (a) Zinc-blende, (b) Wurtzite	12
I.9	Gap énergétique et spectre visible par rapport à la constante de réseau pour divers semi-conducteurs, y compris les matériaux à large bande interdite	13
I.10	Puits quantique InGaN/GaN	15
I.11	Jonction P -N d'une diode	16
I.12	Structure de base d'une diode électroluminescente LED	17
I.13	Principe de fonctionnement de LED	19
I.14	Circuit de polarisation de la LED	18
I.15	Caractéristique courant-tension de la diode à base de: (a) Ge, (b)Si, (c)GaAs , (d)GaAsP	19
I.16	Schéma de principe d'une LED à homojonction	20
I.17	Schéma de principe d'une hétérojonction PN	21
I.18	Schéma de principe d'un puits quantique PN	21
I.19	Schéma de principe d'une LED de faible puissance	22
I.20	Schéma de principe d'une LED de forte puissance vue en coupe PHI	24
<b>Chapitre II</b>		
II.1	La suite d'outils TCAD de Silvaco	31
II.2	Entrées et sorties d'ATLAS	32
II.3	Environnement Deckbuild	34

II.4	Fenêtre de Base Tonyplot	34
II.5	Environnement Virtual Wafer Fabrication	36
II.6	Exemple démaillage d'une diode électroluminescente	37
II.7	Régions avec les matériaux définis.	38
II.8	Définition des électrodes	38
II.9	Distribution du dopage dans les régions	39
<b>Chapitre III</b>		
III.1	Schéma représentatif de la structure simulée (structure à quatre puits quantiques).	44
III.2	Diagramme énergétique d'une hétérojonction GaN/InGaN	46
III.3	Puits de potentiel GaN/InGaN/GaN	46
III.4	le diagramme énergétique	47
III.5	Variation du courant électrique en fonction de la tension de polarisation	49
III.6	Variation de la puissance optique en fonction de la tension de polarisation	49
III.7	Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique	50
III.8	La densité spectrale de puissance en fonction de l'énergie	51
III.9	Variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la tension de polarisation	53
III.10	Concentration des électrons n et des trous p en fonction d'épaisseur	53
III.11	Variation du courant électrique en fonction de la tension de polarisation(2QW)	54
III.12	Variation de la puissance optique en fonction de la tension de polarisation (2QW).	55
III.13	Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique (2QW)	56
III.14	La densité spectrale de puissance en fonction de l'énergie (2QW)	56
III.15	La concentration en fonction d'épaisseur(2QW)	58
III.16	Variation du courant électrique en fonction de la tension de polarisation(4QW)	58
III.17	Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique (4QW)	59



III.18	Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique (4QW)	59
III.19	Le spectre d'émission en fonction de l'énergie (4QW)	60
III.20	La concentration en fonction d'épaisseur(4QW)	61
III.21	Variation du courant électrique en fonction de la tension de polarisation pour 1 QW , 2QW et 4QW.	62
III.22	Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique pour 1QW , 2QW et 4QW	62
III.23	Comparaison de la densité spectrale d'émission à V=4V en fonction de l'énergie pour les trois LED 1QW , 2QW et 4QW	63

## Sommaire

Introduction générale .....	1
<i>Chapitre I: Etude bibliographique</i>	
I-1 Introduction.....	3
I-2 Différents types des matériaux solides.....	3
I-2-1 Conducteurs .....	3
I-2-2 Isolants .....	3
I-2-3 Semi-conducteurs .....	4
I-3 Dopage des semi-conducteurs .....	4
I-3-1 Semi-conducteur type N.....	5
I-3-2 semi-conducteur type P .....	5
I-4 Jonction PN.....	6
I-5 Hétérojonction.....	6
I-6 Matériaux semi-conducteur III-V.....	7
I-6-1 Composé binaires .....	7
I-6-2 Composés ternaires et quaternaires.....	8
I-7 Mécanismes de recombinaison .....	8
I-7-1 Recombinaison radiative.....	8
I-7-2 Recombinaison Auger .....	9
I-7-3 Recombinaison Shockley-Read-Hall.....	10
I-7-4 Recombinaison en surface .....	11
I-8 Matériaux utilisés pour fabriquer les LED .....	11
I-8-1 Structure cristallographique.....	12
I-8-2 Bande interdite .....	13
I-9 Propriétés d'InGaN.....	14
I-9-1 Description d'InGaN .....	14
I-9-2 Couche d'AlGaN .....	14
I-9-3 Puits quantique InGaN/GaN .....	14
I-10 Diodes électroluminescentes .....	15
I-10-1 Définition.....	15
I-10-2 Structure de base d'une diode LED.....	16
I-10-3 Principe de fonctionnement.....	17
I-10-4 Caractéristiques I-V d'une diode LED .....	18

I-11 Classification de diodes électroluminescentes.....	19
I-11 -1 Classification selon la structure .....	19
I-11 -1-1 LED à homo-jonction .....	19
I-11 -1-2 LED à hétérojonction .....	20
I-11 -1-3 LED à puits quantique.....	21
I-11 -2 Classement selon la puissance.....	22
I-11 -2 -1 LED à faible puissance .....	22
I-11 -2-2 LED à forte puissance .....	22
I-11 -3 Classement selon le spectre d'émission.....	24
I-12 Rendement lumineux de diodes électroluminescentes.....	26
I-12-1 Rendement quantique interne .....	26
I-12-2 Rendement global.....	26
I-12-3 Rendement optique .....	26
I-13 Propriétés des Diodes électroluminescents .....	27
I-13-1 Propriétés physiques.....	27
I-13-2 Propriétés électriques .....	27
I-14 Application des LED.....	28
I-15 Avantages et inconvénients des Diodes électroluminescents .....	28
I-15-1 Avantage.....	28
I-15-2 Inconvénients .....	29

***Chapitre II: Logiciel ATLAS SILVACO***

II-1 Introduction.....	30
II-2 Présentation du logiciel de simulation SILVACO.....	30
II-2-1 TCAD-SILVACO .....	30
II-2-2 ATLAS Silvaco .....	32
II-2-2-1 DECKBUILD.....	33
II-2-2-2 Tonyplot .....	34
II-2-3 Virtual Wafer Fabrication(VWF) .....	36
II-3 Syntaxe d'un programme dans ATLAS .....	37
II -3-1 Mesh.....	37
II -3-2 Région.....	37
II-3-3 Electrode .....	38
II-3-4 Doping .....	39
II-4 Spécification matériaux et modèles physique.....	39

II -4-1 Matériaux .....	39
II -4-2 Modèles .....	40
II-5 Sélection de la méthode numérique.....	40
II -6 Spécification de la solution.....	40
II -6-1 Log .....	40
II -6-2 Solve .....	41
II-6-3 Save .....	41
II -7 Equations de base des semi-conducteurs en ATLAS-SILVACO .....	41

**Chapitre III: Résultats et Interprétations**

III-1 Introduction.....	43
III-2 Présentation de la structure étudiée .....	43
III-3 Paramètres de simulation .....	44
III-4 Diagramme énergétique .....	44
III-4-1 Hétérojonction GaN/InGaN .....	44
III-4-2 Puits quantiques GaN/ InGaN/ GaN.....	45
III-4-3 Présentation de diagramme énergétique .....	47
III-5 Résultats de la simulation .....	47
III-5-1 Extraction de résultats .....	47
III-5-2 simulation de la LED à seul puits quantique (1QW).....	48
III-5-2-1 Caractéristiques I(V).....	48
III-5-2-2 Caractéristique $P_{op}(V)$ .....	49
III-5-2-3 Caractéristique $P_{op}(I)$ .....	50
III.5.2.4 Spectre d'émission.....	51
III-5-2-5 Efficacité quantique externe.....	52
III-5-2-6 Distribution des électrons et des trous à $V = 4V$ .....	53
III-5-3 LED à 2QW .....	54
III-5-3-1Caractéristiques I(V).....	54
III-5-3-2 Caractéristiques $P_{op}(V)$ .....	54
III-5-3-3 Caractéristiques $P_{op}(I)$ .....	55
III-5-3-4 Spectre d'émission .....	55
III-5-3-5 Distribution des électrons et des trous .....	57
III-5-4 LED à 4QW .....	57
III-6 Comparaison des caractéristiques optoélectroniques des trois diodes .....	61

## *Sommaire*

---

Conclusion générale.....	65
Référence Bibliographie.....	67
Annexe .....	70
Résumé	

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

Ecrans de Smartphone, sources de lumière colorée ou blanche, écrans de télévision incurvés, ... ne sont que quelques exemples de la présence croissante de l'électronique dans notre vie quotidienne. Bien que les petits composants aux semi-conducteurs comme les diodes, les transistors et les circuits intégrés soient toujours au cœur de la révolution technologique moderne, l'amélioration des performances ainsi que la réduction des coûts de production forment un défi continu de la communauté scientifique à travers le monde.

La réduction des tailles des nouveaux composants à l'échelle nanométrique, le développement des nouvelles techniques de réalisation et de caractérisation et la recherche continue de nouveaux matériaux avec des propriétés électroniques et optiques performants doivent conduire l'électronique et l'optoélectronique vers un développement et un essor dans le domaine des hautes technologies, ils permet également l'émergence de nouvelles applications bien ciblées, qui seront formé la technologie de demain.

Les diodes électroluminescentes (DEL -ou LED en anglais pour Light Emission Diode-) est une source de lumière à semi-conducteur qui émet de la lumière lorsqu'un courant électrique la traverse. Les électrons de la bande de conduction d'un semi-conducteur se recombinent avec les trous de la bande de valence, libérant de l'énergie sous forme de photons [1]. La couleur de la lumière (correspondant à l'énergie des photons) est déterminée par l'énergie nécessaire aux électrons pour traverser la bande interdite du semi-conducteur[2], La lumière blanche est obtenue en utilisant plusieurs semi-conducteurs ou une couche de luminophore luminescent sur le dispositif à semi-conducteur[3].

Les premières LED sont apparues dans les années 60 du siècle précédent, elles émettaient une lumière infrarouge (IR) de faible intensité [4]. Les LED infrarouges sont utilisées au début dans les circuits de télécommande. Les premières LED à lumière visible étaient de faible intensité et limitées au rouge. Les premières LED étaient souvent utilisées comme voyants, remplaçant les petites ampoules à incandescence, et dans les affichages à sept segments. Les développements ultérieurs ont produit des LED disponibles dans les longueurs d'onde visibles, ultraviolettes (UV) et infrarouges, avec un rendement lumineux élevé, faible ou intermédiaire, par exemple des LED blanches adaptées à l'éclairage des pièces et des espaces extérieurs. Les LED ont également donné naissance à de nouveaux types d'écrans et de capteurs, tandis que leurs taux de commutation élevés sont utiles dans les technologies de communication avancées avec des applications aussi diverses que l'éclairage

de l'aviation, les guirlandes lumineuses, les phares automobiles, la publicité, l'éclairage général, les feux de circulation, les flashes d'appareils photo, les éclairages papier peint, lampes de culture horticole et dispositifs médicaux [1].

Pour les dispositifs micro et optoélectroniques en générale et les LED par exemple, les facteurs de base qui déterminent leur qualité, tels que les caractéristiques I-V et l'efficacité optique, peuvent être étudiés par des simulations numériques qui incluent la prise en compte des principaux paramètres structuraux, physiques et techniques du dispositif [5]. La dernière décennie a prouvé une utilisation accrue du logiciel de simulation pour les dispositifs aux semi-conducteurs. Les simulations des composants optoélectroniques jouent un rôle important pour améliorer leurs performances. La structures des dispositifs optoélectronique, les processus technologiques, la propagation et l'extraction de la lumière, les caractéristiques I-V et P-V ainsi que la possibilité d'augmentation de l'efficacité externe ont été étudiées et simulées d'une manière proche de la réalité.

Notre objectif dans ce mémoire est consacré sur une étude bibliographique et simulatrice de diodes électroluminescentes émettant dans le bleue ( $430 \leq \lambda \leq 510$  nm), le logiciel de simulation Tcad-Silvaco a utilisé pour concevoir la structure et le fonctionnement de ce type de dispositif.

Le travail présenté au cours de ce manuscrit est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre présente de manière succincte une brève sur les semi-conducteurs III-V ainsi une étude bibliographique sur les diodes électroluminescentes à savoir de leur structure, leur principe de fonctionnement, caractéristiques, classification, avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre contient une présentation du logiciel de simulation SILVACO, nous décrivons au cours de ce chapitre : les modules et les outils de simulation utilisés par le logiciel, les équations de base des semi-conducteurs et les méthodes numériques.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation de quelques structures multi-puits quantiques, où nous avons présenté la structure des diodes étudiées, les paramètres de simulation ainsi que les résultats obtenus et interprétations.

Nous avons terminé notre travail par une conclusion générale rassemblant les principaux résultats et les perspectives du travail que nous avons effectué.



# *Chapitre I:*

## *Etude bibliographique*

## I-1 Introduction

La diode électroluminescente est un dispositif optoélectronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est couru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens et produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique non cohérent à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse.

En raison de leur rendement lumineux, les LED pourraient représenter 75% du marché de l'éclairage domestique et automobile. Elles sont aussi utilisées dans la construction des écrans plats de télévision, pour le rétro éclairage des écrans à cristaux liquides ou comme source d'illumination principale dans les télévisions à OLED.

## I-2 Différents types des matériaux solides

Les matériaux sont des substances naturelles, artificielles ou synthétique, on peut distinguer plusieurs types de matériaux: solides (cristallin, amorphe), liquides (visqueux, non visqueux), ou gaz (parfait, réel). Les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes qui sont :les isolantes, les semi-conducteurs, et les conducteurs. On distingue ces types de matériaux en fonction de leur résistivité  $\rho$  [6].

### I-2-1 Conducteurs

Les métaux tels que le fer (Fe), le cuivre(Cu), l'or (au), l'argent (Ag) et l'aluminium (Al) sont des conducteurs de courant électrique. La présence des électrons libres dans la couche périphérique (densité  $n \approx 10^{22}$  à  $10^{23} e/cm^3$ )est à l'origine de la conduction électrique. A température ambiante la résistivité  $\rho$  des conducteurs est très faible ( $\rho \leq 10^{-5} \Omega.cm$ ). Leur niveau d'énergie est situé dans la bande conduction comme le montre la figure (I.1)[6].

### I-2-2 Isolants

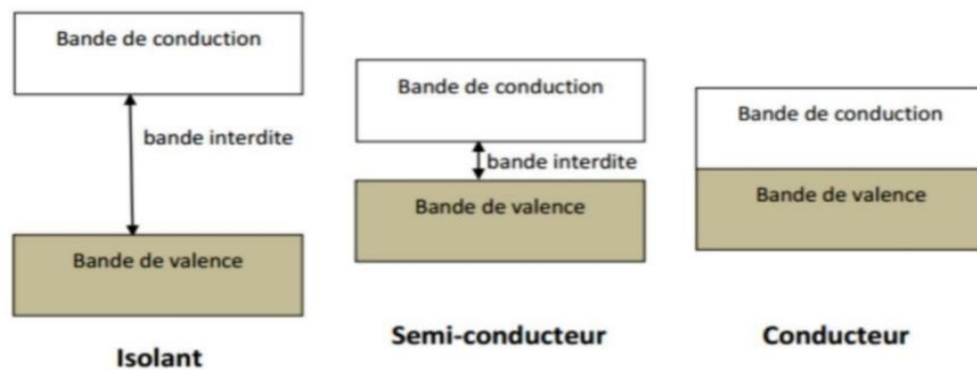
Les matériaux qui ont une résistivité  $\rho$  supérieure à  $10^8 \Omega. Cm$  sont des isolants (matériaux non conducteurs de courant électrique).Parmi ces matériaux on trouve : les verres, le mica, les oxydes comme la silice, carbone (Diamant), ...,la conductivité des isolants est très faible ( $\sigma = 1/\rho$ ),voir la figure (I.1)[6].

### I-2-3 Semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux situent entre les conducteurs et les isolants .La résistivité  $\rho$  des semi-conducteurs varie de  $10^{-3}$  à  $10^{+4}\Omega \cdot \text{Cm}$ ,les différents matériaux semi-conducteurs sont en général classés de la façon suivante:

- Les semi-conducteurs de type IV-IV également appelés de type diamant, sont essentiellement le silicium (Si) et le germanium (Ge) (ils ont une structure cristalline de type diamant, comme le carbone-diamant (C) qui lui se comporte plutôt comme un isolant.
- Les composés de type III-V comme le phosphore de gallium (Gap), l'arséniure de gallium (GaAs)..., sont des alliages entre des éléments trivalent et des éléments pentavalent.
- Les composées de type II-VI comme le ZnO résultent de l'assemblage entre un élément bivalent et un élément hexa valent.

Il existe aussi d'autre type de semi-conducteurs composés de trois atomes différents (ternaires) comme le phosphore de gallium-indium(InGaP) et même de quatre atomes (quaternaires) comme le phosphore de gallium -indium-aluminium(AlGaInP).



**Figure I.1:** Bandes d'énergie pour les matériaux : Isolant, Semi-conducteur et Conducteur [6]

### I-3 Dopage des semi-conducteurs

Afin d'améliorer la conduction d'un semi-conducteur, Le dopage est indispensable. Ce dernier est défini par la substitution d'atomes du cristal semi-conducteur par des atomes contenant un nombre d'électrons de valence immédiatement supérieur ou inférieur.

Il existe deux types de dopage[7]:

- Le dopage de type N, qui consiste à produire un excès d'électrons libres. considérés comme négativement chargés.

- Le dopage de type P, qui consiste à produire une carence en électrons, donc un excès de trous, considérés comme positivement chargés.

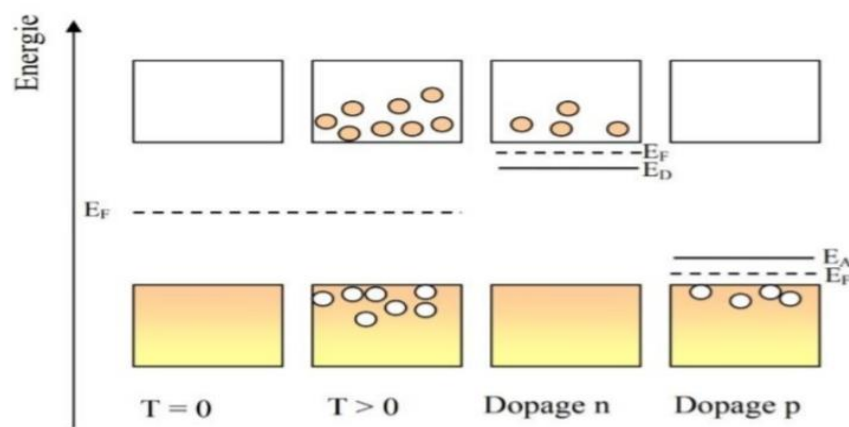
### I-3-1 Semi-conducteur type N

Les semi-conducteurs cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à quatre atomes voisins par des liaisons covalentes impliquant deux électrons pour chaque liaison.

Si on introduit un atome ayant cinq électrons de valence (Phosphore, Arsenic, ...), cet atome prend la place d'un atome du cristal, quatre électrons de l'impureté participeront aux quatre liaisons avec les quatre atomes voisins du cristal, le cinquième électron restera célibataire. A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau donneur qui se situe juste en dessous de la bande de conduction figure (I.2). L'écart entre ce niveau et la bande de conduction étant faible, un électron d'un niveau donneur peut facilement passer dans la bande de conduction sous l'action de l'agitation thermique et augmenter la conductivité électrique. A température ambiante, presque toutes les impuretés sont ionisées et la conductivité devient une conductivité de type N [7].

### I-3-2 semi-conducteur type P

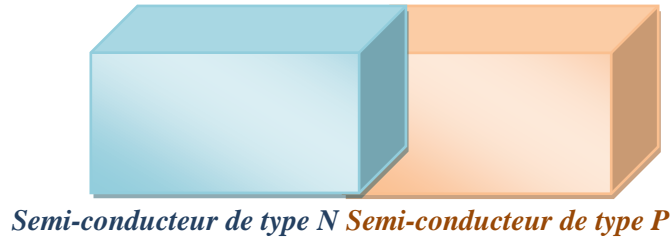
Si on introduit un atome d'impureté trivalent (Bore, Aluminium ou Gallium), cet atome en se plaçant dans le réseau ne peut saturer que trois liaisons sur quatre. Il manque donc une liaison par atome d'impureté auquel correspond un niveau d'énergie situé juste au-dessus de la bande de valence. Ce niveau est appelé niveau accepteur. A  $T=0k$ , les niveaux accepteurs sont vides figure (I.2).Lorsqu'on augmente la température, ils peuvent être occupés par des électrons provenant de la bande de valence. Les niveaux libres de cette dernière engendrent des trous et la conductivité devient de type P[7].



**Figure I.2:**Semi-conducteurs, type N et type P [7].

#### I-4 Jonction PN

La jonction PN est formée par la juxtaposition de deux semi-conducteurs l'un dopé de type P et l'autre dopé de type N, tous les deux d'un même matériau.



**Figure I.3:** Formation d'une jonction PN

Après contact les trous de la région P veulent se diffuser vers la région N et les électrons de la région N veulent se diffuser vers la région P. La diffusion des électrons et des trous crée une région appauvrie des porteurs libres donc l'apparition de deux régions (positive négative), cette nouvelle distribution de charge crée un champ électrique intrinsèque au niveau de cette région associé par une tension appelée tension de diffusion, cette tension crée une barrière énergétique qui parvient le déplacement des électrons et des trous.

#### I-5 Hétérojonction

Hétérojonction est obtenue lorsque deux matériaux semi-conducteurs différents sont associés. Sa réalisation s'effectue par croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit notamment être assez proche).

Selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs, deux hétérojonctions se distinguent:

- Les premières sont les hétérojonctions iso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage.
- Les secondes sont les hétérojonctions aniso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment.

### I-6 Matériaux semi-conducteur III-V

Les semi-conducteur III-V sont des matériaux composés d'éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev. Parmi tous les composés possibles, les composés les plus légers comme le bore, l'aluminium ou l'azote présentent une structure de bandes à large bande interdite. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à caractère métallique [6].

Le tableau (I.1) regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique).

III	IV	V
${}_{10.81}^{5}B$	${}_{12.01}^{6}C$	${}_{14.01}^{7}N$
${}_{10.81}^{13}Al$	${}_{28.09}^{14}Si$	${}_{30.97}^{15}P$
${}_{69.73}^{31}Ga$	${}_{72.59}^{32}Ge$	${}_{74.92}^{33}As$
${}_{114.82}^{49}In$	${}_{118.69}^{50}Sn$	${}_{121.75}^{51}Sb$

**Tableau I.1:**Extrait de la classification périodique des éléments [7].

#### I-6-1 Composé binaires

Les composés binaires possibles n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bandes montre que les éléments les plus légers donnent des composés dont lesquels la bande interdite est large et indirecte, et dans lesquels la masse effective des électrons est élevée. Les composés contenant du bore, de l'aluminium ou de l'azote entrent dans cette catégorie, ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs ou pour l'optoélectronique ou une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optique soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme l'arsénique ou l'antimoine donnent des composés à base de Galium (GaAs, GaSb) ou d'indium (InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes[7].

Le tableau suivant résume des paramètres physiques de quelques matériaux semi-conducteurs de la famille III-V :

Binaires III-V	$E_g$ (eV)	$m^*/m_0$	$\mu$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$a$ (A°)
BN	7.5			3.6150
AIP	2.45			5.4510
AIAs	2.16			5.6605
AlSb	1.58	0.12	200	6.1355
BP	2.0			4.5380
GaN	3.36	0.19	380	3.189
GaP	2.26	0.82	110	5.4512
GaSb	0.72	0.042	5000	6.0959
InP	1.35	0.077	4600	5.8686
InAs	0.36	0.023	33000	6.0584
InSb	0.17	0.0145	80000	6.4794

**Tableau I.2:** Paramètres des principaux composés binaires(III-V)[6].

### I-6-2 Composés ternaires et quaternaires

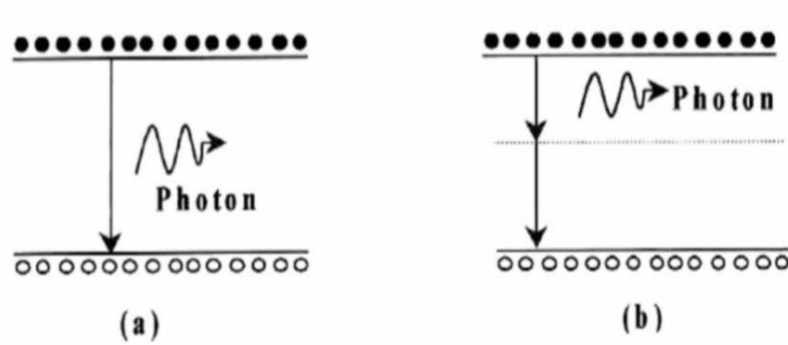
L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires du type  $In_{1-x}Mn_xP$  ou quaternaire comme  $Ga_xAl_{(1-x)}P_yAs_{(1-y)}$ [6].

### I-7 Mécanismes de recombinaison

La recombinaison est la réoccupation d'un trou de la bande de valence par un électron de la bande de conduction, le paragraphe suivant représente les trois mécanismes les plus courants pour la recombinaison de porteurs excédentaires[8].

#### I-7-1 Recombinaison radiative

C'est une transition d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence accompagnée de l'émission d'un photon figure (I.4.a). La recombinaison radiative peut aussi se produire par l'intermédiaire de niveaux profonds, figure (I.4.b)[8].



**Figure I.4:**Processus de recombinaison radiative: (a) direct, (b) indirecte [8].

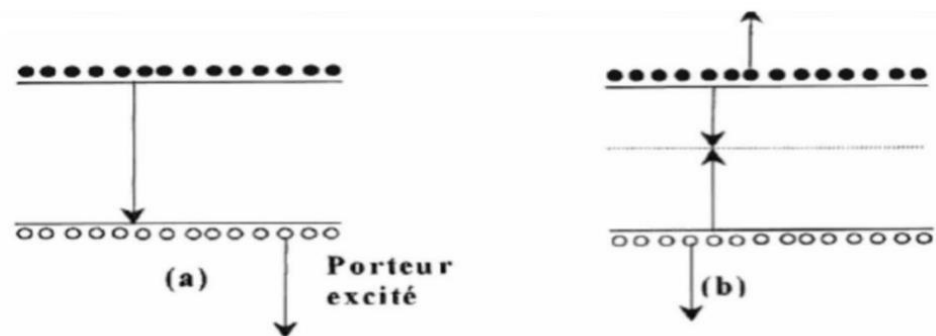
Le taux de recombinaison est proportionnel à la fois au nombre d'électron et au nombre de trous :

$$R_d = B(pn - n_i^2) \quad (\text{I.1})$$

Avec: B est le coefficient de recombinaison radiative.

### I-7-2 Recombinaison Auger

Dans ce mécanisme un électron se recombine avec un trou de la bande de valence, l'énergie dissipée est gagnée par un troisième porteur. La recombinaison Auger peut être directe figure (I.5.a) et indirecte figure (I.5.b). La recombinaison Auger indirecte peut se produire lorsque le semi-conducteur est fortement dopé [8].



**Figure I.5:**Processus de recombinaison Auger : (a) direct, (b) indirecte [3].

Dans ce cas, le taux de recombinaison est donné par la relation [4,5]:

$$R_{Auger} = C_{Aug,n}(pn^2 - nn_i^2) + C_{Aug,p}(np^2 - pn_i^2) \quad (\text{I.2})$$

avec:  $C_{Aug,n}$  et  $C_{Aug,p}$  sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous.



### I-7-3 Recombinaison Shockley-Read-Hall

Ce processus de recombinaison (SRH) est indirect figure (I.6). En effet, il se produit par un intermédiaire de niveaux profonds  $E_t$  situés dans la bande interdite et s'accompagne de vibrations de réseau (émission de photons)[8].

La relation suivante donne le taux de recombinaison (SRH):

$$R_{RSH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n \left( p + n_{ie} e^{\frac{-E_t}{KT}} \right) + \tau_p \left( n + n_{ie} e^{\frac{E_t}{KT}} \right)} \quad (I.3)$$

Où:

$E_t$  représente l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite

$E_i$  est le niveau de fermi dans le semi-conducteur intrinsèque

$\tau_n$  et  $\tau_p$  sont respectivement la durée de vie pour les électrons et les trous, donnée par la relation suivante :

$$\tau_p = \frac{1}{c_n N_T}, \tau_n = \frac{1}{c_p N_T} \quad (I.4)$$

$n_{ie}$  est la concentration intrinsèque effective donnée par la relation suivante:

$$n_{ie}^2 = p \cdot n \cdot \exp\left(\frac{\Delta E g_n + \Delta E g_p}{KT}\right) \quad (I.5)$$

Elle est due au rétrécissement de la bande interdite, pour un semi-conducteur fortement dopé  $\Delta E g_n$  et  $\Delta E g_p$  présentent le rétrécissement de la bande interdite.

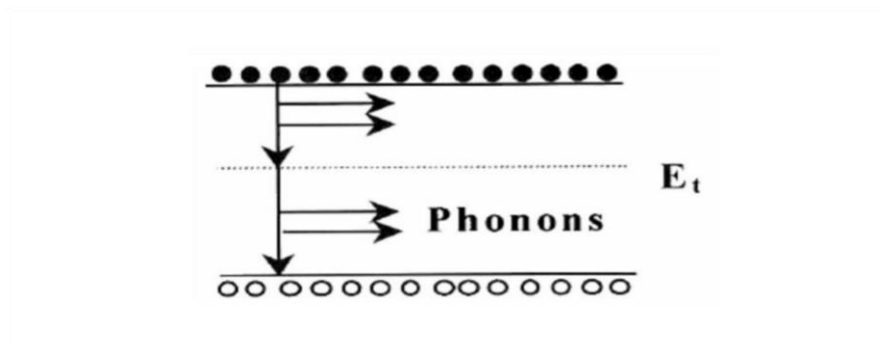


Figure I.6: Processus de recombinaison Shockley-Read-Hall[8].

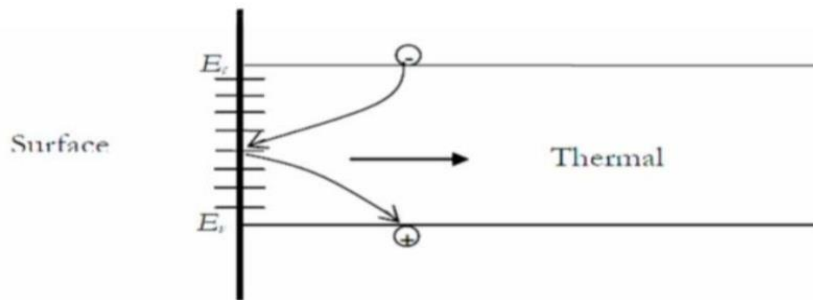
#### I-7-4 Recombinaison en surface

L'ensemble des mécanismes précédents constitue des recombinaisons ayant lieu en volume du matériau. Il faut également précédents constitue les recombinaisons en surface dont le mécanisme est représenté sur la figure (I.7). Le formalisme du mécanisme de recombinaisons par unité de surface plutôt que par unité de volume [8].

Ils sont données par la relation suivante:

$$R_{Surf} = \frac{n_s p_s - n_i^2}{\tau_n \left( p_s + n_i e^{\frac{-E_t}{kT}} \right) + \tau_p \left( n_s + n_i e^{\frac{E_t}{kT}} \right)} \quad (I.6)$$

avec :  $n_s$  et  $p_s$  sont les concentrations de porteurs à la surface [8].



**Figure I.7:** Processus de recombinaison en surface [8].

#### I-8 Matériaux utilisés pour fabriquer les LED

Le premier dépôt de nitrure de gallium (GaN) a été développé en 1969 par épitaxie en phase vapeur aux hydrures (EPVH) (hybride vapor phase epitaxy HVPE). GaN est un semi-conducteur à large gap direct (3.4 eV) ; il est très utilisé pour des applications électroniques et optoélectronique, allié avec d'autres composés III-V, pour réaliser divers dispositifs. Il admet une grande stabilité chimique et thermique, de très bonnes propriétés mécaniques, et des propriétés physiques très intéressantes pour opérer en haute température, haute puissance et haute fréquence.

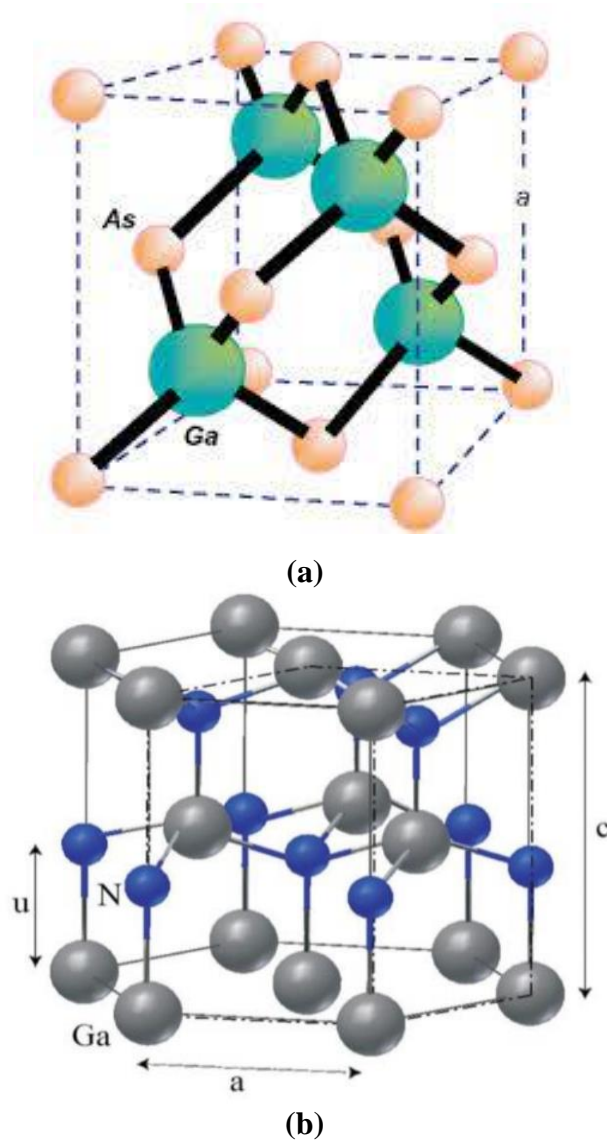
### I-8-1 Structure cristallographique

Les semi-conducteurs III-V se cristallisent majoritairement sous la forme d'une structure de type Zinc-Blende, stable à température ambiante. D'autres formes comme Wurtzite sont également possibles.

La structure Zinc-Blende est similaire à celui du carbone diamant, ce compose de deux CFC l'un de l'autre du quart de la diagonale principale.

La structure Wurtzite est hexagonale et comprend deux réseaux hexagonaux formés chacun décalés d'une distance  $u=3/8$  dans la direction 001.

La figure suivante représente les deux structures Zinc-blende et Wurtzite.

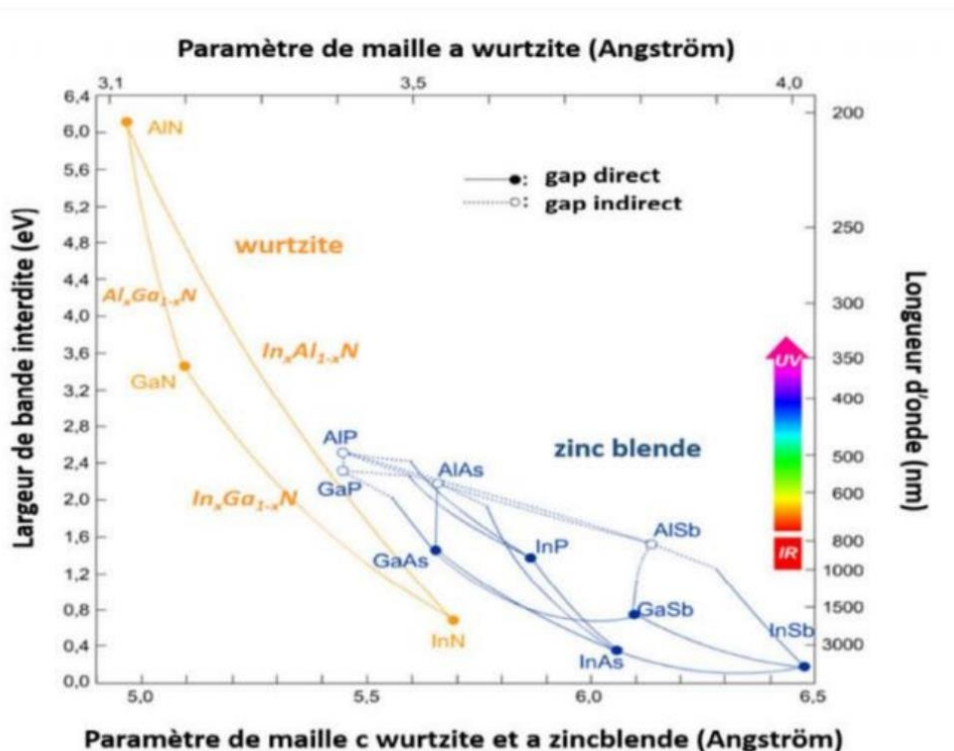


**Figure I.8:** Maile unitaire, (a) Zinc-blende, (b) Wurtzite[11,12].

### I-8-2 Bande interdite

Comme nous l'avons déjà signalé, l'intérêt majeur des semi-conducteurs III-V réside dans leur bande interdite directe. Le minimum de la bande de conduction (BC) et le maximum de la bande de valence (BV) se trouvent aligner dans l'espace du vecteur d'onde K. En effet, lorsqu'un électron se déplace de la bande de conduction à la bande de valence, le photon libéré possède une énergie correspondante à la valeur du gap .

A 300 K, le gap de GaN par exemple est de 3.4 eV, ce qui correspond à une longueur d'onde dans la région proche ultraviolette (UV) du spectre optique. L'ajout d'In ou Al permet de réaliser des alliages ternaires d'InGaN ou d'AlGaN .En fonction de la concentration d'Al ou In, on peut faire varier l'énergie de la bande interdite de  $\sim 0.7$  eV (pour l'InN) à  $\sim 6.3$  eV (pour l'AlN). Ceci permet de couvrir presque la totalité de la gamme spectrale allant du rouge aux UV profonds .La figure (I.9) montre la variation possible de la largeur de la bande interdite de quelques semi-conducteurs de type III-V[8].



**Figure I.9:** Gap énergétique et spectre visible par rapport à la constante de réseau pour divers semi-conducteurs, y compris les matériaux à large bande interdite[8].

## **I-9 Propriétés d'InGaN**

### **I-9-1 Description d'InGaN**

Dans les années 90, on a vu l'apparition des premières LED bleues réalisées des couches de nitrure de gallium déposées par épitaxie sur des substrats saphir ou SiC. Par adjonction d'un matériau luminescent, il est possible d'étendre le spectre bleu et d'obtenir une émission sur plusieurs longueurs d'onde, aboutissant à la lumière blanche.

L'InGaN est un semi-conducteur faisant partie des composés III-V, 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). Il apparaît à l'heure actuelle comme le matériau le plus prometteur pour les applications photovoltaïques. Il est activement étudié parce qu'il représente une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés sophistiquées.

Un large gap d'énergie interdite direct, lui permettant une large couverture spectrale, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique. Son gap est modulable avec le taux de substitution de l'Indium dans l'alliage.

Les propriétés du composé ternaire InGaN sont fortement liées à celles de ses composés binaires, il convient donc de décrire les propriétés de ces deux semi-conducteurs binaires, pour ensuite décrire les propriétés de l'alliage ternaire résultant [14].

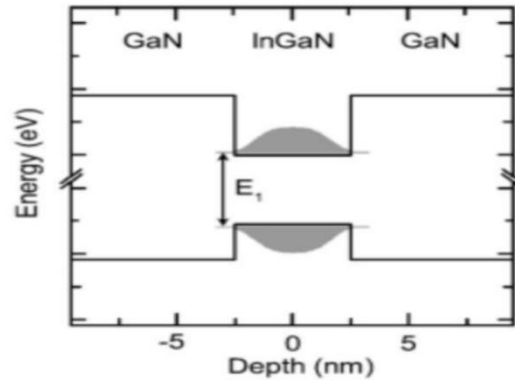
### **I-9-2 Couche d'AlGaN**

Dans le cas des LEDs nitrures à puits quantiques, un problème majeur se pose qu'est la faible concentration en trous du type P comparée à la concentration en électrons du type N. Les électrons ont alors tendance à sortir des puits quantiques et à aller se recombiner dans le GaN de type P. Pour limiter ce problème, il a été nécessaire de Co-doper la couche P afin d'augmenter le taux de recombinaison dans le puits quantique ainsi une barrière à électrons AlGaN est insérée entre les puits quantiques et le GaN de type P [15].

### **I-9-3 Puits quantique InGaN/GaN**

Les puits quantiques InGaN/GaN occupant une place centrale dans l'éclairage à solide. Les puits quantiques sont insérés à la jonction entre deux couches de GaN l'une de type N et l'autre de type P comme il montre dans la figure (I.10). Dans un cas idéal, les électrons venant du type N diffusent vers la bande de conduction du puits quantique, de même, les trous venant du type P et diffusent vers la bande de valence du puits quantique. Les porteurs se

localisent alors dans le puits et la densité des porteurs N et P augmente dans le puits, la recombinaison radiative devient plus rapide que la recombinaison non radiative, de sorte que l'efficacité du dispositif sera améliorée dans le puits quantique que dans la jonction PN classique[16].



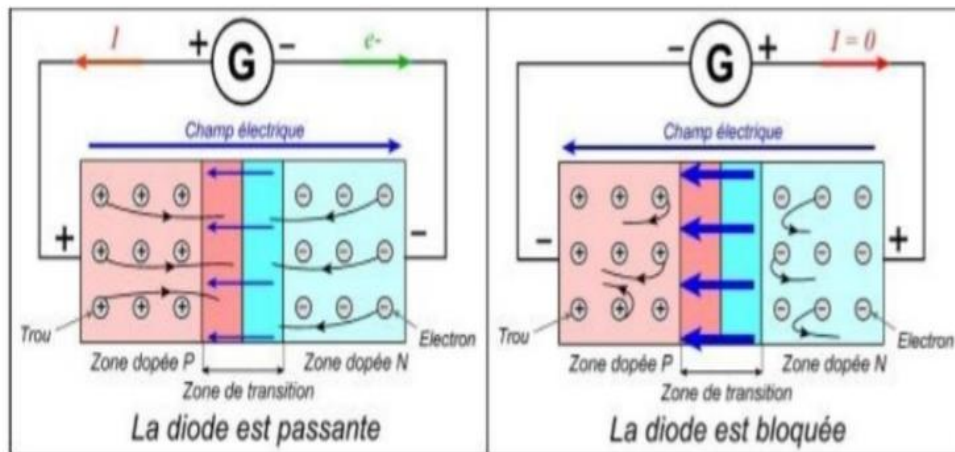
**Figure I.10:** Puits quantique InGaN/GaN [16].

## I-10 Diodes électroluminescentes

### I-10-1 Définition

La diode électroluminescente LED est assez proche des diodes électroniques, classiques. Ainsi elle nécessite des techniques de conception technologique et des matériaux semi-conducteurs identiques.

En première approche, une LED peut être définie comme un composant électronique constitué par la juxtaposition de deux matériaux semi-conducteurs. Cette association se comporte ensuite comme la jonction P-N. Pour cela, et encore une fois comme pour une diode, l'un des matériaux doit être dopé fortement en porteurs positifs, reproduisant ainsi la zone P, et le second en porteurs négatifs, reproduisant la zone N, l'association des deux donne donc une jonction P-N telle que décrite dans les figures(I.11)[17].



**Figure I.11:** Jonction P -N d'une diode [17].

### I-10-2 Structure de base d'une diode LED

Les LEDs sont structurées pour assurer la plupart des recombinaisons à lieu sur la surface par deux façons.

- En augmentant la concentration de dopage du substrat, de sorte que plus les charges libres minoritaires porteurs d'électrons se déplacent vers le haut, se recombinent et émettent de la lumière à la surface.
- En augmentant la longueur de diffusion :

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (I.7)$$

avec :  $D$  est le coefficient de diffusion et  $\tau$  est la durée de vie.

Mais quand elle est augmentée au-delà d'une longueur critique il y a une possibilité de réabsorption des photons dans le dispositif.

La LED doit être structuré de telle sorte que les photons générés par le dispositif sont émis sans être absorbé. Une solution consiste à rendre la couche P sur la partie supérieure mince, assez pour créer une couche d'appauvrissement. Dans la figure suivante structure en couches. Il existe différentes façons de structurer le dôme pour l'efficacité d'émission [16].

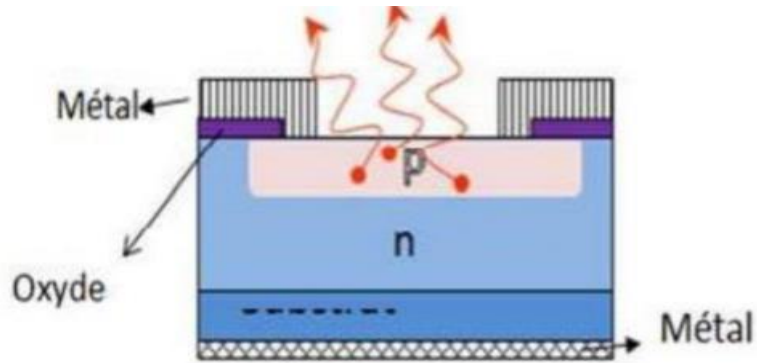


Figure I.12: Structure de base d'une diode électroluminescente LED[18].

### I-10-3 Principe de fonctionnement

Lorsqu'une jonction P-N est polarisée dans le sens direct, les électrons, qui sont majoritaires dans la région de type N, sont injectés dans la région de type P où ils se recombinent avec les trous [19].

Les recombinaisons des porteurs excédentaires se manifestent dans trois régions différentes qui sont d'autre part la zone de charge d'espace, et d'autre part les régions neutres N et P. Dans chacune de ces dernières, la zone émettrice est limitée à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. La zone de charge d'espace joue quant à elle un rôle mineur dans la mesure où elle est pratiquement inexistante en raison du fait que la jonction est fortement polarisée dans le sens direct. C'est lors de la recombinaison d'un électron avec un trou, un photon d'énergie  $h\nu \geq E_g$  est émis. En effet, la transition d'un électron entre la bande de conduction et la bande de valence peut se faire avec la conservation du vecteur d'onde. La face émettrice de la LED est la zone P car c'est la plus radiative du fait qu'elle contient la zone de recombinaison [20].

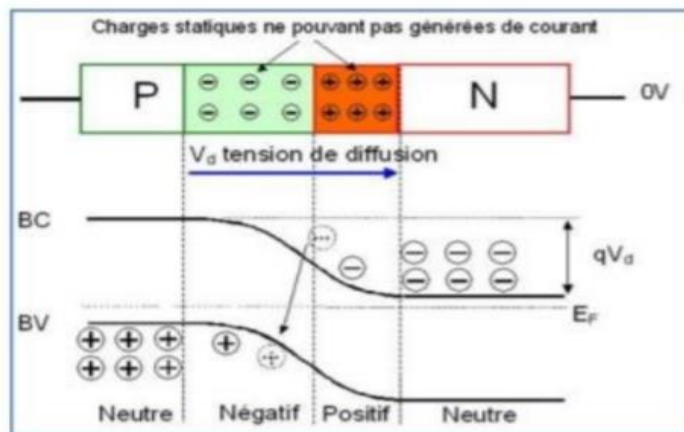


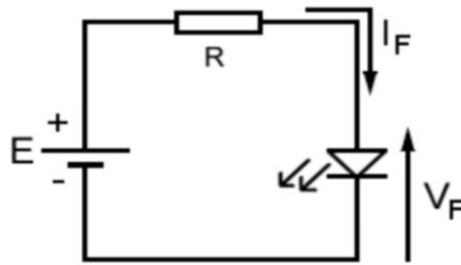
Figure I.13: Principe de fonctionnement de LED



#### I-10-4 Caractéristiques I-V d'une diode LED

La diode électroluminescente fonctionne sous polarisation directe. Lorsque la tension d'alimentation est assez importante, la LED doit être protégée par une résistance pour limiter le courant qui la traverse à des valeurs inférieures à l'intensité maximale de courant tolérée. Ainsi, l'alimentation de la LED se fait plutôt en courant qu'en tension, et ceci à travers la résistance. Le courant qui travers la jonction est donné par l'expression suivante [18].

$$I = I_S(e^{V_d/KT} - 1) \quad (I.8)$$



**Figure I.14:** Circuit de polarisation de la LED.

Où :

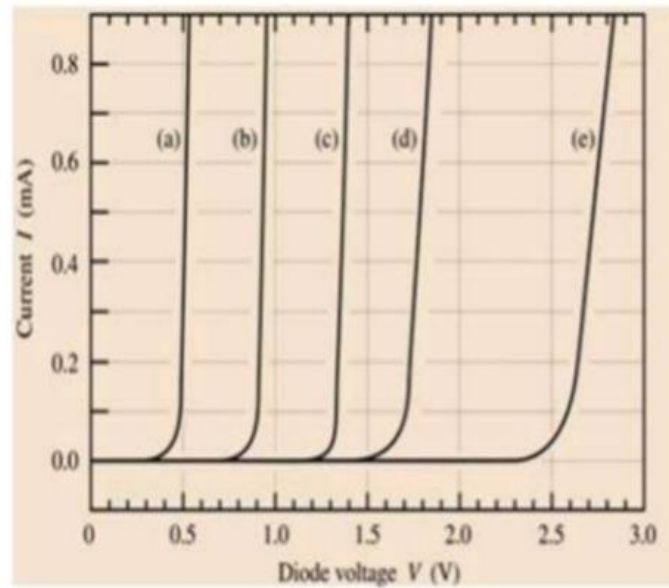
$I_S$ : Le courant de saturation de la diode.

$K$  : La constante de Boltzmann.

$T$ : La température.

$V_d$ : La tension aux bornes de la diode.

La caractéristique (I-V) de la LED, illustrée sur la figure (I.15), est semblable à celle d'une diode au silicium avec une tension de seuil  $V_{th}$  assez élevée-en relation directe avec l'énergie du photon émis[21].



**Figure I.15:**Caractéristique courant-tension de la diode à base de: (a) Ge, (b)Si, (c)GaAs, (d)GaAsP[18].

La tension directe appliquée à la LED est :

- de l'ordre de 1,1 V pour les diodes à émission dans l'infrarouge.
- varie de 1,8 V à 2,5 V pour les LED à émission dans le rouge, le jaune et le vert.
- supérieur à 3,5 V pour l'émission dans le bleu est le violet.

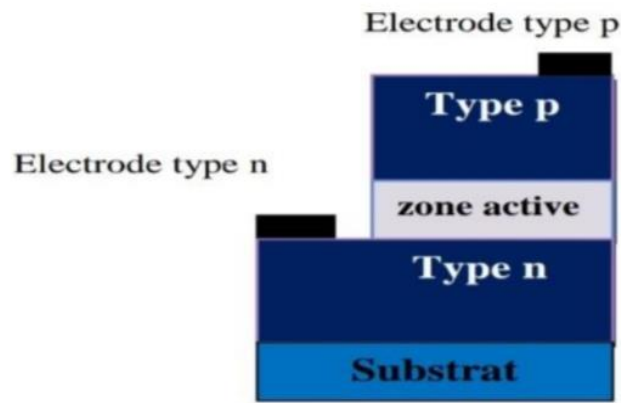
Le courant nominal d'une diode électroluminescente est de l'ordre de 10 à 50mA.

## I-11 Classification de diodes électroluminescentes

### I-11 -1 Classification selon la structure

#### I-11 -1-1 LED à homo-jonction

Elle est constituée du même semi-conducteur pour les deux régions dopées de type P et N. Elle résulte de la juxtaposition dans un même matériau semi-conducteur de deux zones: une de type P et l'autre de type N. Cette juxtaposition entraîne des courants de diffusion d'électrons et de trous au voisinage de la jonction. Une barrière de potentiel est alors créée. Elle s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Cette barrière ne dépend que des travaux de sortie des deux régions ( $V_{bi}$  est déterminée par la différence entre les niveaux de Fermi).



**Figure I.16:** Schéma de principe d'une LED à homo-jonction [15].

#### **I-11-1-2 LED à hétérojonction**

Elle se forme au contact de deux matériaux semi-conducteurs ayant des valeurs de gaps différentes. On remarque sur la figure (I.17), contrairement à l'homojonction, l'apparition d'un pic qui peut également apparaître dans la bande de valence selon la nature et le dopage des deux semi-conducteurs.

Dans ce cas la barrière d'énergie dépend du gap, de l'affinité électronique et de la concentration des dopants des deux semi-conducteurs[16].

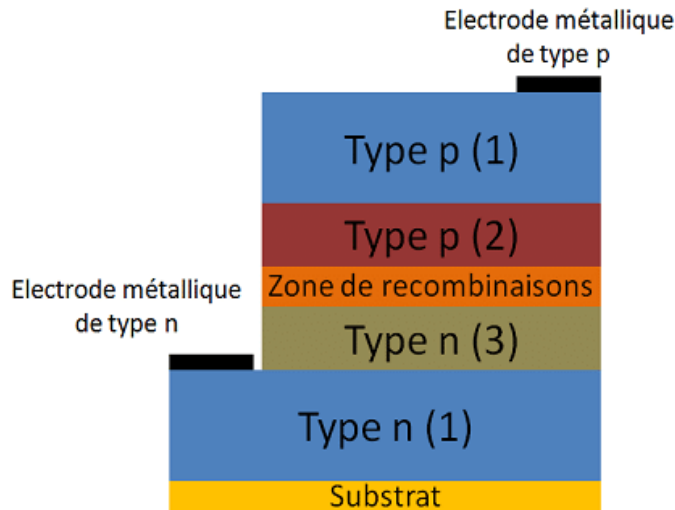


Figure I.17:Schéma de principe d'une hétérojonction PN [16].

### I-11-1-3 LED à puits quantique

Ce type de LED est obtenu en faisant croître une couche d'un matériau semi-conducteur A (typiquement quelques dizaines de nanomètres) entre deux couches d'un autre matériau semi-conducteur B. ce dernier présente un gap d'énergie supérieur à celui du matériau A, la discontinuité entre les bandes d'énergie dans les deux matériaux crée une barrière de potentiel qui confine les porteurs dans le puits quantique.

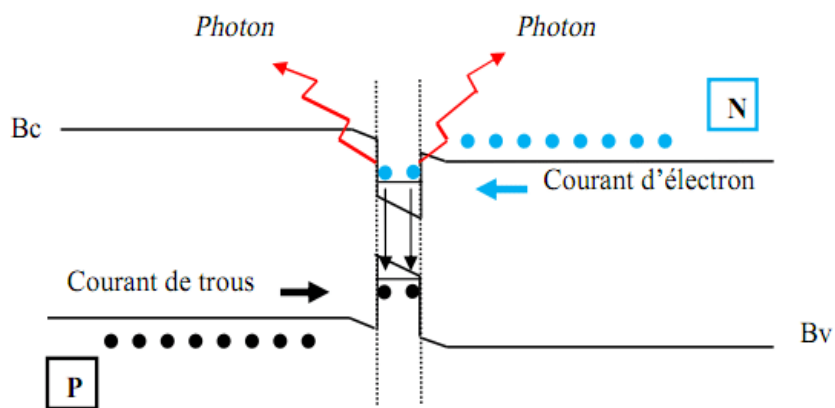
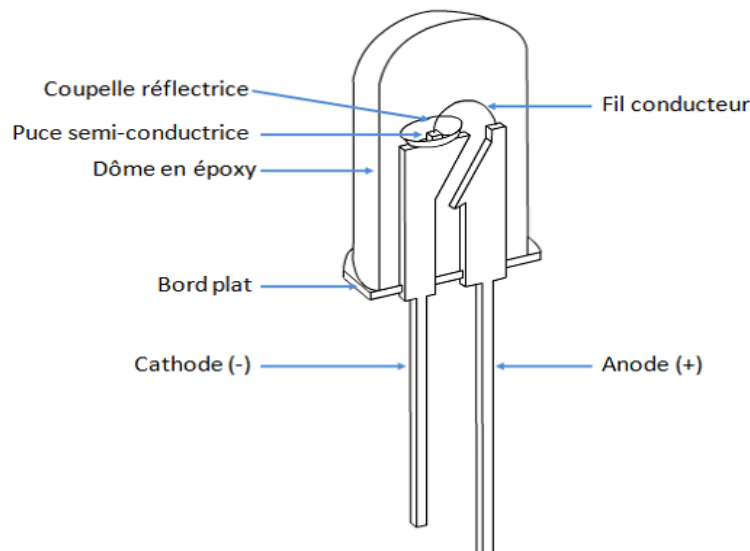


Figure I.18:Schéma de principe d'un puits quantique PN[15].

## I-11-2 Classement selon la puissance

### I-11-2-1 LED à faible puissance

Les diodes électroluminescentes de faible puissance ce sont les plus connues du grand public, car elles sont présentées dans notre quotidien depuis des années. Ce sont elles qui jouent le rôle de voyant lumineux sur les appareils électroménagers par exemple. Ce type de diode est un dôme en époxy qui n'a pas de symétrie de révolution autour de son axe central, mais possède un bord plat du côté de la cathode. Cette caractéristique permet à l'utilisateur de pouvoir distinguer l'anode de la cathode lorsque l'identification de la longueur des pattes de le LED n'est plus possible. Ce dôme a pour rôles, d'une part, de protéger la puce semi-conductrice (jonction PN) de l'environnement extérieur, et d'autre part, de servir de lentille optique permettant l'extraction de la lumière émise[16].



**Figure I.19:**Schéma de principe d'une LED de faible puissance[22].

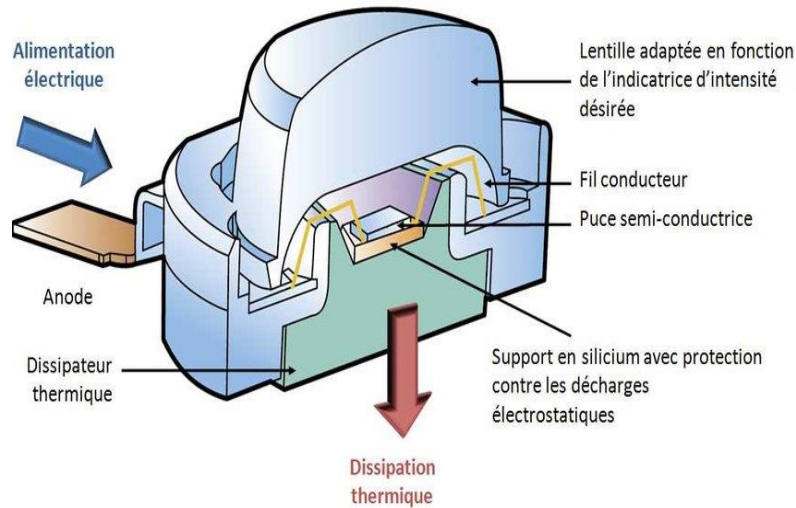
### I-11-2-2 LED à forte puissance

Les LED de forte puissance souvent méconnues du grand public, elles sont pourtant en plein essor et leurs applications sont souvent ignorées : flash de téléphones portables, éclairage domestique, éclairage de spectacle, lampe de poche ou frontales. Le principe de base reste identique à la précédente architecture. L'alimentation de la puce semi-conductrice est assurée par deux électrodes reliées par deux fils conducteurs. Contrairement à l'architecture précédente, dans celle-ci il y a une dissociation du chemin de l'alimentation électrique et de la dissipation thermique. La dissipation thermique se faisant sous le composant.

Le Tableau(I.3) résume les différentes familles des diodes électroluminescentes avec leurs caractéristiques.

LEDs	Paramètres
<p><b>LED conventionnelles</b> (faible puissance)</p> <p><u>Domaine d'application privilégié:</u> Applications nomades et signalisation.</p>	<p>Surface de la jonction : <math>350 \times 350 \mu\text{m}^2</math></p> <p>Alimentation : 30mA, 3.5V</p> <p>Puissance &lt; 200 mW</p> <p>Flux lumineux: 1-3 lumen.</p> <p>Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) 201 m/W</p> <p>Encapsulation epoxy ( en dome)</p>
<p><b>HB-LED à forte luminosité</b> (forte puissance)</p> <p><u>Domaine d'application privilégié:</u> Rétro-éclairage, automobile, éclairage</p>	<p>Surface de la jonction : <math>1 \times 1 \text{mm}^2</math></p> <p>Alimentation : 350 mA, 3.5V</p> <p>Puissance maximale 1W</p> <p>Flux lumineux 5-30 lumens</p> <p>Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) &gt; 301 m/W</p> <p>Encapsulation spécifique ( silicone)</p>
<p><b>UHB-LED à très forte luminosité</b></p> <p><u>Domaine d'application privilégié:</u> Éclairage général.</p>	<p>Surface de la jonction : <math>2 \times 2 \text{mm}^2</math></p> <p>Densité surfacique de courant &gt;50 A/ <math>\text{cm}^2</math></p> <p>Puissance maximale 5W</p> <p>Flux lumineuse (pour diodes Blanches) 501 m/W</p> <p>Encapsulation spécifique (silicone)</p>

**Tableau I.3:** Les différentes familles des diodes électroluminescentes[15].



**Figure I.20:** Schéma de principe d'une LED de forte puissance vue en coupe PHI [23].

### I-11-3 Classement selon le spectre d'émission

Une autre manière de classer les LED est de considérer la répartition de l'énergie dans la gamme de longueur d'onde couvrant le visible (longueurs d'ondes de l'ordre de 380-780nm) ou l'invisible (principalement l'infrarouge). La raison de la distinction réside dans le fait que certaines diodes peuvent servir à éclairer, ce qui est l'une des applications phares du futur (proche):

- Les chromatiques: l'énergie est concentrée sur une plage étroite de longueur d'onde (20 à 40nm). Ces sources ont un spectre quasiment monochromatique.
- Les infrarouges: l'énergie est émise hors du spectre de la lumière visible, au-delà de 700nm de longueur d'onde. Elles sont utilisées pour transmettre des signaux de télécommandes ou pour de la télémétrie exploités par exemple dans la détection de position des consoles de jeux, ou servir d'éclairage pour les caméras infrarouge, etc
- Les blanches: l'énergie est répartie dans le visible sur toute la gamme de longueurs d'onde 380 à 780nm environ.

Le tableau suivant donne un classement des différentes méthodes pour obtenir de la lumière blanche à partir de LED de différentes couleurs [15].

Méthodes	Avantage	Inconvénients
Synthèse RGB	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bonne efficacité lumineuse.</li> <li>✓ Contrôle de la qualité de la lumière.</li> <li>✓ La minimisation des pertes électriques</li> <li>✓ Permet de faire varier le blanc suivant les désirs de l'utilisation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Taille du package plus importante.</li> <li>✓ Contrôle individuel de chaque LED</li> <li>✓ Il faut inclure dans un unique boîtier trois puces possédant chacune leur propre valeur de courant d'alimentation.</li> <li>✓ Le vieillissement n'est pas identique le rouge se détériore plus rapidement que le bleu ce qui provoque également une évolution de la qualité de la lumière.</li> </ul>
LED bleue + Phosphore jaune	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bonne efficacité lumineuse.</li> <li>✓ Produire de la lumière blanche à partir d'une seule LED bleue.</li> <li>✓ Technologie maîtrisée et économique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ La lumière blanche obtenue est dite "froide". Pour obtenir un blanc plus chaud, une couche de phosphore qui produit un rayonnement rouge doit être ajoutée mais cette couche réduit fortement le rendement.</li> <li>✓ Mauvais Rendement 75%.</li> <li>✓ Phénomène de "halo" coloré.</li> </ul>
LED ultraviolet + Phosphores	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bonne uniformité (pas de phénomène de "halo").</li> <li>✓ Bon indice de rendu de couleurs</li> <li>✓ Large gamme de blancs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rendement lumineux inférieur à la méthode bleu+phosphore(s).</li> <li>✓ L'émission d'UV détériore le package, ce qui réduit la durée de vie et opacifie le boîtier</li> <li>✓ Combiner la fabrication de LEDs avec celle des phosphores.</li> </ul>

**Tableau I.4:** Comparaison des différentes méthodes pour obtenir de la lumière blanche par les LED[15].



## I-12 Rendement lumineux de diodes électroluminescentes

### I-12-1 Rendement quantique interne

Le rendement quantique interne est défini comme étant le rapport du nombre de recombinaisons radiatives sur le nombre total de recombinaisons.

$$\eta_{\text{int}} = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nr}}} \quad (\text{I.9})$$

avec:

$R_r$ : taux de recombinaison radiative

et  $R_{nr}$ : taux de recombinaison non radiative[24].

### I-12-2 Rendement global

Le rendement global d'une LED est le rapport de la puissance lumineuse émise par la diode sur la puissance électrique consommée.

La puissance électrique est donnée par l'expression suivante :

$$P_{\text{élect}} = V \times I \quad (\text{I.10})$$

$$\text{Avec : } I = I_s \left( e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

$I$  : est fourni par la réponse en courant de la jonction p-n. La puissance lumineuse émise est proportionnelle au courant

La puissance électrique consommée est le produit de la tension appliquée  $V_a$  multipliée par la charge de l'électron (notée  $e$  ou  $e$ ), multipliée par le courant traversant la jonction (le courant étant le nombre d'électrons passant la jonction par seconde).

Le rendement global d'une LED est donc donné par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{\text{Puiss.lumineuse}}{\text{Puiss.électrique}} = \frac{\hbar\omega \cdot \text{Nbre de photons émis/sec}}{eV_a \cdot \text{Nbre d'électr.passant la jonc./sec}} \quad (\text{I.12})$$

### I-12-3 Rendement optique

En introduisant le nombre de photons créés, en le multipliant au numérateur et au dénominateur, on trouve le rendement interne qui n'est que le rapport du nombre de photons créés sur le nombre d'électrons passant dans la jonction (ce dernier étant le nombre de paires électron-trou créées). Le rendement optique est le rapport entre le nombre de photons émis et le nombre de photons créés il limite l'efficacité d'une LED.

$$\eta = \frac{hw}{eV_a} \times \frac{\text{Nbre de photons \u00e9mis/sec}}{\text{Nbre de photons cr\u00e9es/sec}} \times \frac{\text{Nbre de photons cr\u00e9es/sec}}{\text{Nbre d'\u00e9lectr.passant la jonc./sec}} \quad (\text{I.13})$$

L'expression du rendement d'une LED est :

$$\eta = \frac{hw}{eV_a} \times \eta_{\text{opt}} \times \eta_{\text{int}} \quad (\text{I.14})$$

## I-13 Propri\u00e9t\u00e9s des Diodes \u00e9lectroluminescents

### I-13-1 Propri\u00e9t\u00e9s physiques

Le gap est la diff\u00e9rence entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande valence ; pour les mat\u00e9riaux semi-conducteurs le gap conditionne un bon nombre de propri\u00e9t\u00e9s optiques ou \u00e9lectroniques.

Pour les mat\u00e9riaux \u00e0 gap direct : le haut de la bande valence et le bas de la bande de conduction se trouvent dans le m\u00eame vecteur d'onde  $k$  et la transition se fait verticalement (se situe \u00e0 la valeur voisine du vecteur d'onde  $k$  sur le diagramme  $E(k)$ ).

Pour les mat\u00e9riaux \u00e0 gap indirect : le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction se situent \u00e0 des valeurs distinctes du vecteur d'onde  $k$  sur le diagramme  $E(k)$ .

On pr\u00e9f\u00e8re les mat\u00e9riaux \u00e0 gap direct pour les applications d'\u00e9metteurs de lumi\u00e8re, o\u00f9 les recombinaisons radiatives des porteurs sont plus importantes[25].

### I-13-2 Propri\u00e9t\u00e9s \u00e9lectriques

Une diode \u00e9lectroluminescente est une jonction p-n ; l'expression du courant en fonction de la tension appliqu\u00e9e dans une diode de largeur  $A$  est donn\u00e9e par l'\u00e9quation [26]:

$$I = eA \left( \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} N_A + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} N_D \right) e^{\frac{e(V-V_D)}{k_B T}} \quad (\text{I.15})$$

O\u00f9 :

$D_n$  et  $D_p$ : constantes de diffusion des \u00e9lectrons et des trous

$\tau_n$  et  $\tau_p$ : temps de vie de ces porteurs minoritaires

$N_D$ : concentration de donneurs

$N_A$ : concentration d'accepteurs

Le terme exponentiel montre une augmentation brusque du courant lorsque la tension  $V_D$  est atteinte (tension de seuil : tension \u00e0 partir de laquelle des photons sont \u00e9mis)

### **I-14 Application des LED**

Avec l'évolution technologique, l'utilisation des LED a connu un progrès considérable. On les trouve plus particulièrement :

- Dans les télécommandes, pour transmettre des données.
- Dans la fabrication des écrans de grande taille à LED.
- Dans le secteur de la santé et en biologie, elles trouvent aussi leur place : (LED UV utilisées pour la polymérisation des composites pour réparer les dents, l'intégration de ce type de LED dans les microscopes électroniques pour l'observation des cellules biologiques.

En télémétrie (émetteur et récepteur ultrasonique) [27].

### **I-15 Avantages et inconvénients des Diodes électroluminescentes**

#### **I-15-1 Avantage**

Les avantages des diodes électroluminescentes sont nombreux à savoir :

- Facilité de montage sur un circuit imprimé, traditionnel ou CMS (Composant Monté en Surface).
- Consommation inférieure aux lampes à incandescence et du même ordre de grandeur que les tubes fluorescents
- Excellente résistance mécanique (chocs, écrasement, vibrations).
- Taille beaucoup plus réduite que les lampes classiques ce qui offre la possibilité de réaliser des sources de lumière très ponctuelles, de faible à très faible consommation électrique.
- Durée de vie (20000 à 50000 heures environ) beaucoup plus longue qu'une lampe à incandescence classique (1000 heures) ou qu'une lampe halogène (2000 heures).
- Fonctionnement en très basse tension (TBT), gage de sécurité et de facilité de transport.
- Atout non négligeable en matière de sécurité, par rapport aux systèmes lumineux classiques, leur inertie lumineuse est quasiment nulle.
- Les LEDs RVB (rouge-vert-bleu) permettent des mises en valeur colorées avec des possibilités de variations sans limite.

### **I-15-2 Inconvénients**

Les diodes électroluminescentes ont quelques inconvénients, on peut citer par exemple :

- Le prix d'achat des lampes à LEDs reste plus un peu élevé que celui d'une lampe à incandescence halogène.
- Les LEDs, comme tout composant électronique, ont des limites maximales de température de fonctionnement, de même que certains composants passifs constitutifs de leur circuit d'alimentation (comme les condensateurs chimiques qui s'échauffent en fonction du courant efficace), ce qui conditionne en partie la durée de vie des lampes à LED. La dissipation thermique des composants des ampoules à LED est un facteur limitant leur montée en puissance notamment en assemblages multi-puces. Les recherches portent sur des moyens de limiter la température et de mieux dissiper la chaleur des LEDs de puissance.
- Les LEDs bleues ainsi que les LEDs blanches contiennent un spectre bleu de forte intensité potentiellement dangereux pour la rétine si elles entrent dans le champ de vision, même périphérique. Ceci est bien sûr proportionnel à leur puissance. Cela devient de plus en plus préoccupant puisque des LEDs toujours plus puissantes sont mises sur le marché. Toutefois sont récemment apparues des LEDs à tons chauds, au spectre appauvri en lumière bleue.

Selon le constructeur Philips, l'efficacité lumineuse de certaines LEDs baisse rapidement (comme pour la plupart des technologies lumineuses) pour ne plus produire en fin de vie que 20% de la quantité de lumière initiale, mais pour les LEDs les plus performantes du marché, la quantité de lumière produite en fin de vie serait encore d'au moins 70%. La température accélère la baisse de l'efficacité lumineuse. Philips précise également que la couleur peut varier sur certaines LEDs blanches et tirer sur le vert vieillissant[28].

***Chapitre II:***  
***Logiciel ATLAS***  
***SILVACO***

## **II-1 Introduction**

Le simulateur TCAD (Technology computer-Aided Design) est un ensemble complet d'outils indépendants permettant la simulation physique de dispositifs et systèmes électronique. Il permet d'associer l'aspect conception technologique à la simulation électrique. Ceci dans le but d'économiser le temps et le cout de développement, de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs.

Dans ce chapitre, nous présenterons le logiciel de simulation TCAD-SILVACO (ATLAS), avec leurs principales outils et instructions.

## **II-2 Présentation du logiciel de simulation SILVACO**

« Silvaco International » est une société de logiciels qui offre des programmes pour la modélisation de tous les domaines de l'électronique, y compris les circuit sa analogique est numériques. Cette société dispose de logiciel allant de la simple modélisation « Spice » jusqu'aux schémas des circuit sintégrés de pointe et des outils d'extraction

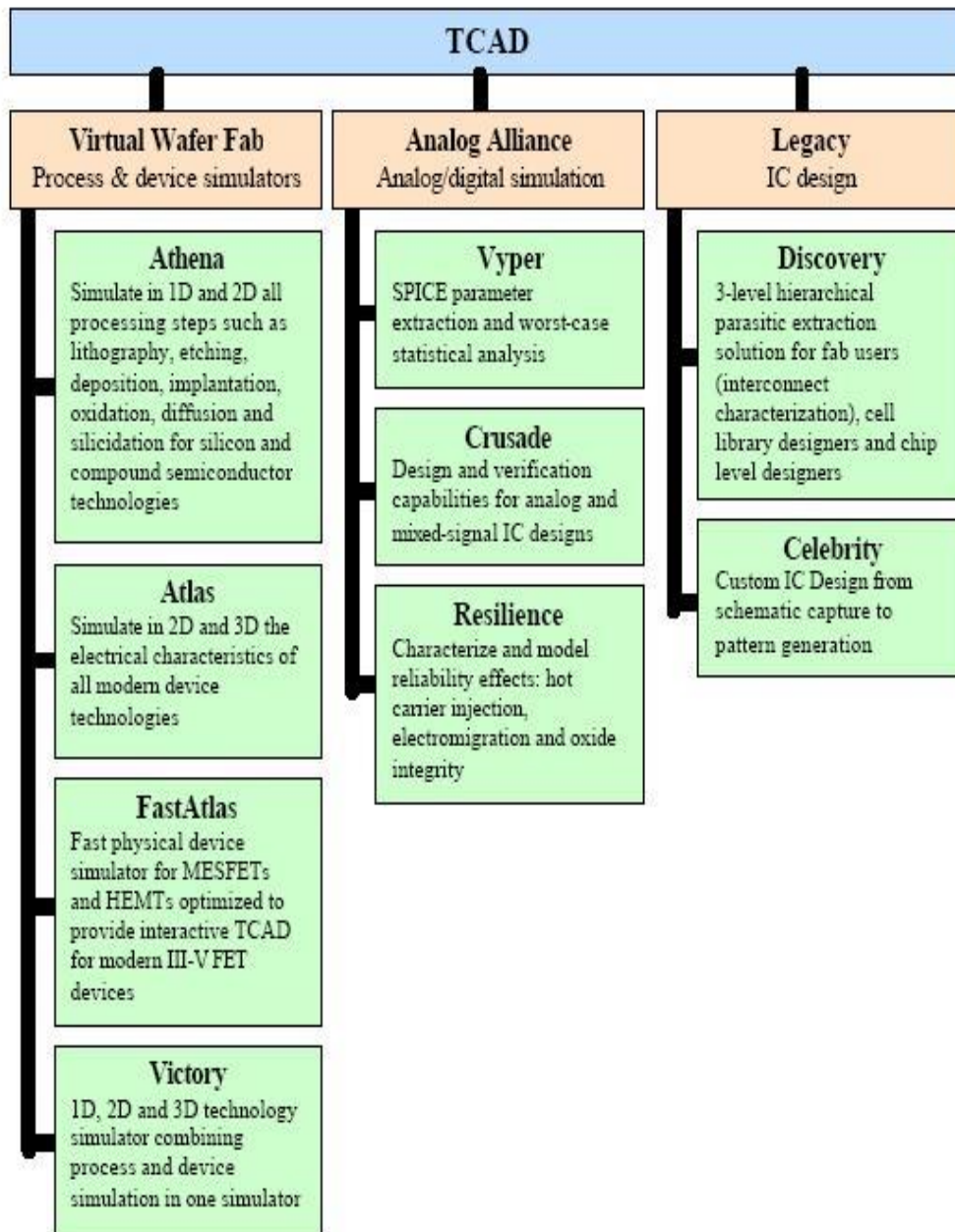
Le SILVACO (Silicon Valley Corporation) est un simulateur de dispositifs semi-conducteurs basé sur les principes physiques à deux et à trois dimensions, ce qui signifie qu'il peut prédire les caractéristiques électriques quis ont associé saux structures physiques bien spécifiées et des conditions de polarisation. Ceci est obtenu en rapprochant le fonctionnement d'un dispositif sur une grille à deux ou trois dimensions, comprenant un certain nombre de points de grille appelés nœuds. En appliquant un ensemble d'équations différentielles, dérivées des lois de Maxwell, sur cette grille, vous pouvez simuler le transport des porteur sa travers une structure. Cela signifie que le rendement électrique ou optique d'un dispositif peut maintenant être modélisé en courant continu, alternatif ou en mo des de fonction nuement transitoires[ 29].

### **II-2-1 TCAD-SILVACO**

Le TCAD-SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui utilisent des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, des solutions linéaires d'optimisation, etc., tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateurs est de visualiser dans l'espace des phénomènes physiques difficilement accessibles et observables et de s'approprier de manière pédagogique les procédés de fabrication.

Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour:

- La simulation des étapes de fabrication technologique (ATHENA, Supreme3, etc.).
- La simulation électrique des dispositifs tels que, les diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires, etc. (ATLAS).
- Virtual Wafer Fabrication, pour automatiser la simulation de fabrication des Wafers[ 29].

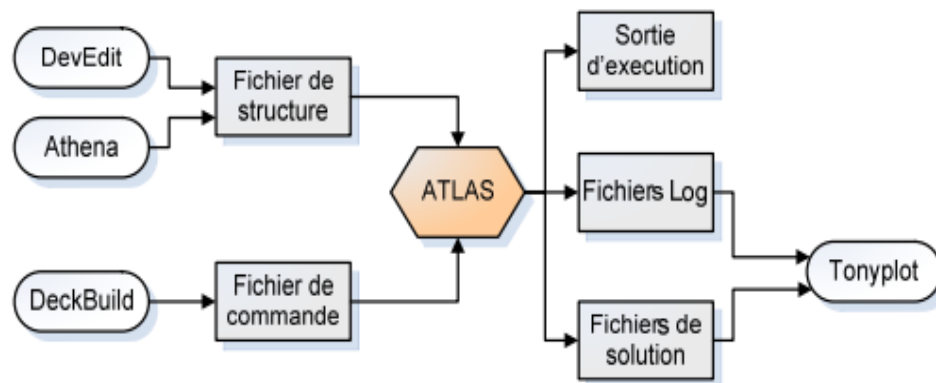


**Figure II.1:** La suite d'outils TCAD de Silvaco

### II-2-2 ATLAS Silvaco

ATLAS Silvaco est un simulateur 2D ou 3D des dispositifs basés sur la physique des semi-conducteurs. Il prédit le comportement électrique de dispositifs à base de semi-conducteurs et fournit des informations sur les mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des dispositifs.

Dans le schéma de la figure (II-2) nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie d'ATLAS. La plupart des simulations réalisées par ATLAS utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'ATLAS s'exécute (représente par fichier de commande). Le second fichier est un fichier de structure qui définit la structure qui va être simulée. A la sortie d'ATLAS, nous avons trois types de fichiers. Le premier de ces fichiers est la sortie "Runtime" qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le fichier " log " qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique). Le troisième fichier de sortie est le fichier de solution, ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation TONYPLOT.



**Figure II.2:**Entrées et sorties d'ATLAS

ATLAS calcule les distributions internes des paramètres physiques et prédit le comportement électrique des dispositifs en régime permanent ou transitoire. Il peut donc simuler la distribution des potentiels, des champs électriques, des porteurs et des courants,



modéliser les courbes (I-V) et (C-V), les réponses en alternatif et les caractéristiques en régime transitoire.

La structure du dispositif à simuler peut être complètement arbitraire. Une fois celle-ci réalisée, elle est découpée en éléments finis, formant ainsi ce qu'on appelle un maillage. Le potentiel électrostatique et les concentrations de porteurs en fonction de l'espace et du temps sont alors calculés à chaque nœud du maillage à partir de la résolution de l'équation de Poisson et des équations de continuité.

ATLAS est conçu pour être utilisé avec les outils interactifs de VIRTUAL WAFER FAB(VWF). Ils' agit de DECKBUILD, TONYPLOT, DEVEDIT, MASKVIEWS et OPTIMIZER:

- DECKBUILD: fournit un environnement d'exécution interactive.
- TONYPLOT: fournit des capacités de visualisation scientifique.
- DEVEDIT: est un outil inter actif pour la spécification de la structure et du maillage ainsi que le raffinement.
- MASKVIEWS : est une dit eur de masque pour le circuit intégré IC.
- OPTIMIZER :supports d'optimisation à travers de multiples simulateurs.

### **II-2-2-1 DECKBUILD**

Deckbuild est un outil d'environnement d'exécution puissant qui permet à l'utilisateur de manière transparente d'aller de la simulation de processus à la simulation de dispositifs à l'extraction de modèles SPICE. Il est facile d'utiliser l'environnement de l'exécution pour exécuter des simulateurs de base tels qu'ATLAS. Deckbuild contribue à créer des fichiers d'entrée à ATLAS. Plusieurs fenêtres fournissent des ponts d'entrés à base de menus ou à base de textes pour les informations saisies. Il comprend également un grand nombre d'exemples pour tous les types de technologies. Autres outils de simulation, tels que Tonyplot, DEVEDIT et MASKVIEW peuvent également être invoqué à partir de Deckbuild. Les optimiseurs de Deckbuild contribuent à l'optimisation des cibles comme les dimensions structurelles et les paramètres des dispositifs après des tests électriques compliqués et des outputs intermédiaires [30].

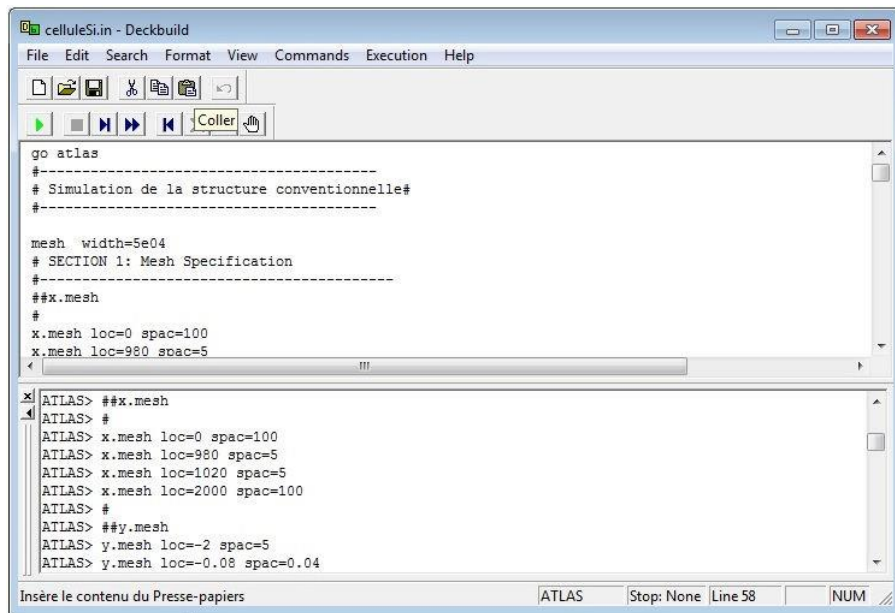


Figure II.3: Environnement Deckbuild [30].

### II-2-2-2 Tonyplot

Tonyplot est un outil de traitement graphique utilisé avec tous les simulateurs SILVACO et fait partie intégrante des VWF. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil du dopage, et caractéristiques électriques). Tonyplot peut fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme Deckbuild ou SPDB [31].

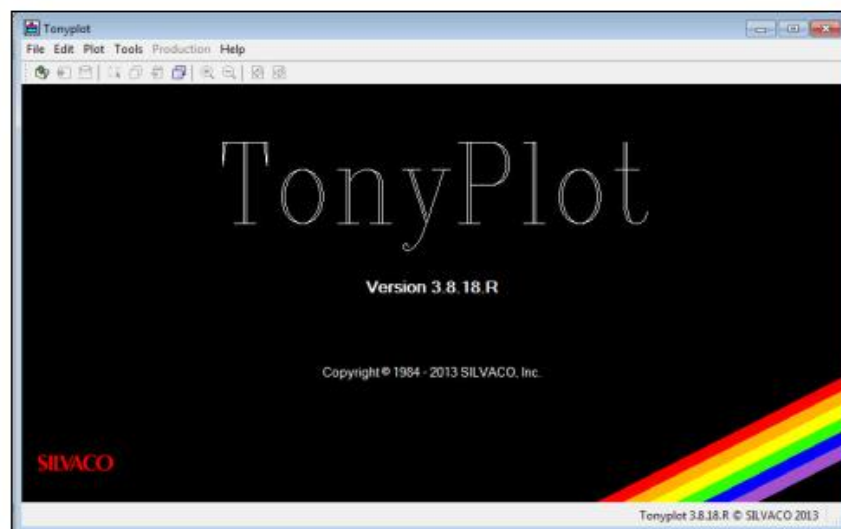


Figure II.4: Fenêtre de Base Tonyplot.

Un fichier de commande ATLAS est une liste de commandes pour ATLAS à exécuter. Cette liste est stockée sous forme de fichier texte ASC II qui peut être préparé dans DECKBUILD ou en utilisant n'importe quel éditeur de texte. La préparation du fichier d'entrée en DECKBUILD est préférée, et peut être facilitée par l'utilisation appropriée du menu Commandes de DECKBUILD. Le fichier d'entrée contient une séquence d'instructions. Chaque déclaration se compose d'un mot clé qui identifie la déclaration et un ensemble de paramètres. Le format général est:

<STATEMENT>

<PARAMETER>=<VALUE>

Quelques conseils sur la structure appropriée des déclarations sont énumérés ci-dessous:

- 1- La déclaration doit venir en premier, mais après cela, l'ordre des paramètres dans une instruction n'est pas important.
- 2- Il est seulement nécessaire d'utiliser suffisamment de lettres de n'importe quel paramètre pour le distinguer de tout autre paramètre sur la même déclaration. Ainsi, le paramètre Concentration peut être raccourci à Conc. Cependant, le paramètre Région ne peut pas être réduit à R car il y a également le paramètre RATIO associé à la déclaration du dopage.
- 3- Les Valeurs Logiques peuvent être explicitement définies comme fausses (False) en les faisant précéder par le symbole  $\wedge$ .
- 4- Toute ligne commençant par  $\wedge$  est ignorée. Ces lignes sont utilisées comme des commentaires.
- 5- ATLAS peut lire jusqu'à 256 caractères sur une ligne. Cependant, il est préférable de répartir les longues déclarations d'entrée sur plusieurs lignes pour rendre le fichier d'entrée plus lisible. Le caractère  $\backslash$  à la fin d'une ligne indique la continuation.

L'ordre dans lequel les déclarations se produisent dans un fichier d'entrée d'ATLAS est important. Il y a cinq groupes de déclarations, et ceux-ci doivent se produire dans l'ordre correct. Ces groupes sont indiqués dans le tableau (II.1).

Chaque fichier d'entrée doit contenir cinq groupes dans l'ordre. Sinon, cela entraîne généralement un message d'erreur à la fin du programme, mais il pourrait également conduire à un mauvais fonctionnement du programme. Par exemple, les paramètres matériels ou les modes figurant dans le mauvais ordre ne peuvent pas être utilisés dans les calculs.

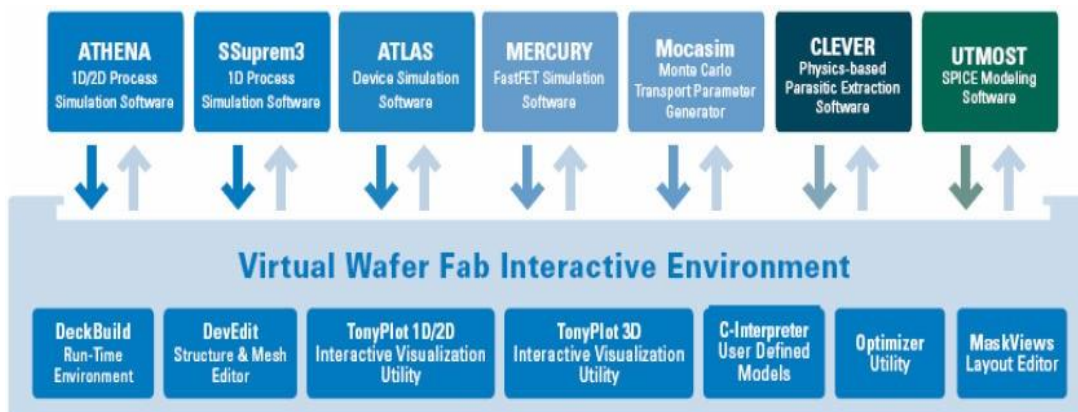
L'ordre des déclarations dans la définition du maillage, la définition structurelle, et les groupes de la solution est également important.

Group		Statements
1. Structure specification	_____	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material models specification	_____	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical method selection	_____	METHOD
4. Solution specification	_____	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results analysis	_____	EXTRACT TONYPLOT

**Tableau II.1:** Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe.

**II-2-3 Virtual Wafer Fabrication(VWF)**

Virtual Wafer Fabrication (VWF) aid ent à effectuer la simulation efficacement. La figure(II.1) montre que Silvaco avec VWF propose des logiciels de simulation puissante[32].

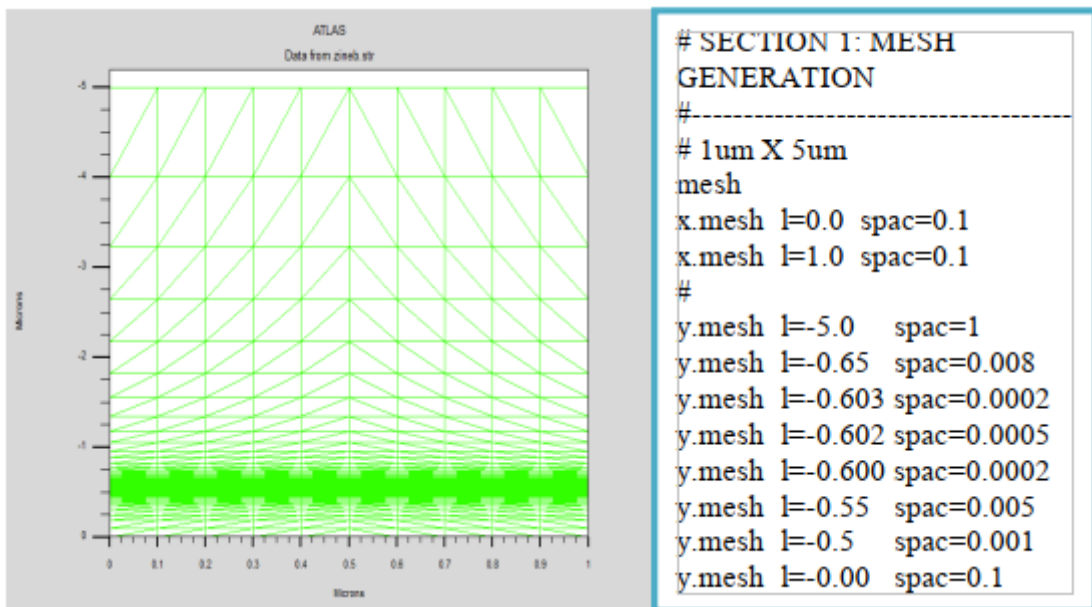


**Figure II.5:** Environnement Virtual Wafer Fabrication[32].

### II-3 Syntaxe d'un programme dans ATLAS

#### II -3-1 Mesh

Le programme met une grille sur la structure, où il joue un rôle important pour obtenir une bonne simulation, qui est un ensemble de lignes horizontales et verticales. Dans notre étude, nous utilisons une grille bidimensionnelle et donc seuls les arguments  $x$  et  $y$  sont définis. Nous avons utilisé le maillage représenté sur la figure (II.5).



**Figure II.6:** Exemple de maillage d'une diode électroluminescente.

#### II -3-2 Région

Après l'opération du maillage, vient l'étape de définition des régions. Ces dernières déterminent les différentes couches formant la diode électroluminescente. La figure (II.6) montre les zones avec les matériaux utilisés dans cette étude.

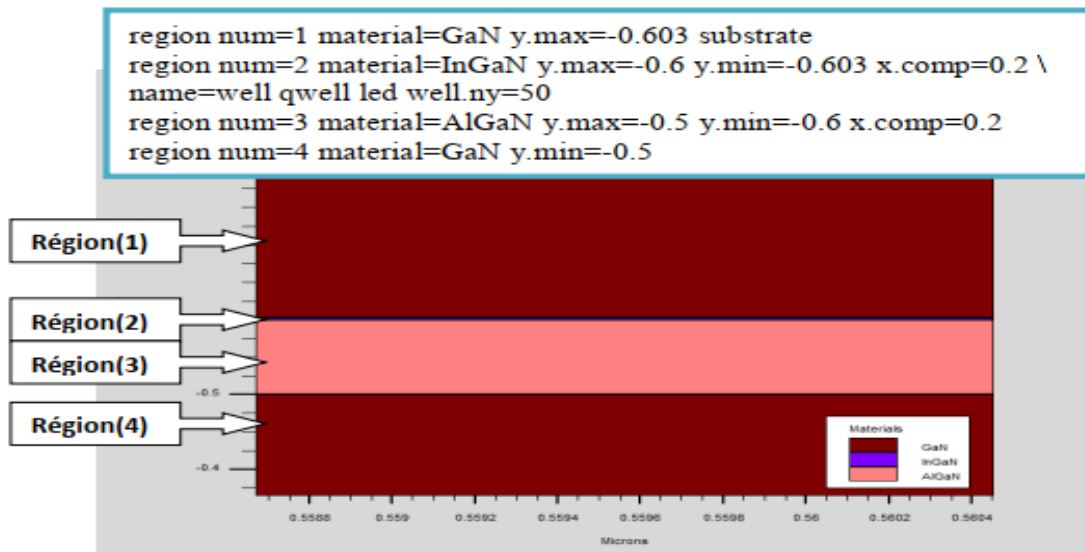


Figure II .7: Régions avec les matériaux définis.

### II-3-3 Electrode

Une fois les régions et les matériaux sont spécifiés, l'étape suivante est la définition des électrodes. Dans cette simulation, nous n'avons utilisé que deux électrodes, une anode et une cathode. La figure (II.7) présente les électrodes utilisées dans cette étude.

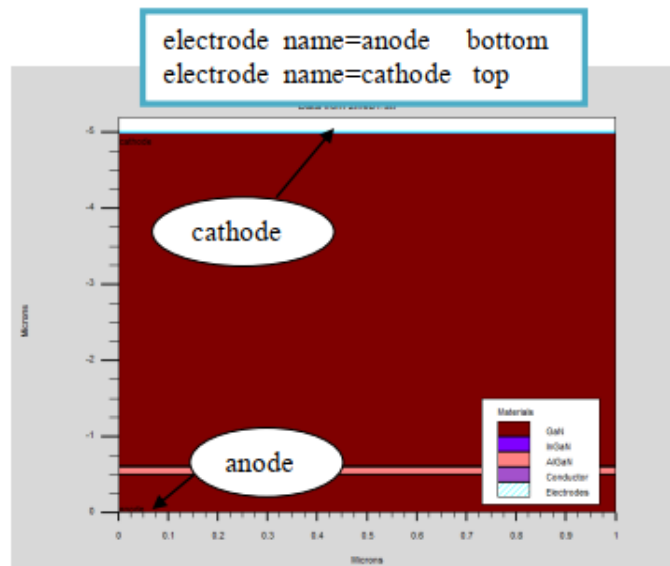


Figure II.8: Définition des électrodes

### II-3-4 Doping

C'est le dernier médiateur de la structure, et il est d'un type N ou P. Sa distribution est également uniforme. La figure (II.8) représente la distribution du dopage dans les différentes régions.

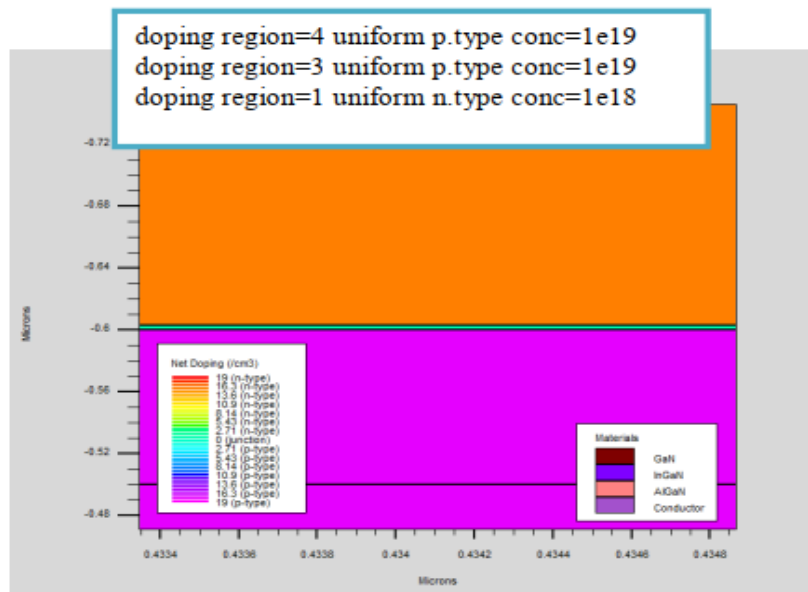


Figure II.9 : Distribution du dopage dans les régions.

### II-4 Spécification matériaux et modèles physique

Après la définition de la structure, il faut spécifier les matériaux et les modèles adaptés.

#### II -4-1 Matériaux

Le format de la déclaration d'Atlas pour les matériaux est comme suit[16]:

MATERIAL <identification><material\_parameters>

Exemple: Material material =GaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt =1.1e-8 augn =1.0e-34  
augp=1.0e-34.

## II -4-2 Modèles

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: la mobilité, la recombinaison, les statistiques des transporteurs, l'impact ionisation, et l'effet tunnel. La syntaxe de la déclaration des modèles est comme suit [33]:

MODEL< paramètres généraux > / < paramètres du modèle >

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple suivant montre les modèles étudiés dans cette simulation:

Models region=2 k. pchuang spontaneous lorentz.

## II-5 Sélection de la méthode numérique

Après la définition des matériaux et la précision du modèle choisi, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types sont utilisées dans «SILVACO-ATLAS»:

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des blocs

La méthode numérique utilisée dans cette simulation pour calculer les solutions est la méthode de blocs Newton.

## II -6 Spécification de la solution

Après avoir terminé la sélection de la méthode numérique, la prochaine étape est la spécification de la solution. Elle se décompose en ces déclarations: Log, Solve, et Save.

### II -6-1 Log

Log enregistre toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données. L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction Log[33]:



Log outf=led320.log

L'exemple montre l'enregistrement de données dans le fichier led320.log.

### II-6-2 Solve

La déclaration Solve suit la déclaration Log. Solve effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Cette déclaration a le format de base suivant [33]:

SOLVE «bias\_points»

Exemple:

Solve vstep=0.1 vfinal=5.5 name=anode

### II-6-3 Save

L'instruction Save sauvegarde toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvegardées correspondent à un état électrique bien précis. L'instruction pour Save est[33]:

Save outf=ledex1\_5p5.str

## II -7 Equations de base des semi-conducteurs en ATLAS-SILVACO

De façon très succincte, nous pouvons dire que ce simulateur de dispositifs est basé sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique. L'équation de Poisson montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs[29].

$$\operatorname{div}(\varepsilon \Delta V) = q(n - p - N_d^+ + N_a^-) \quad (\text{II.1})$$

Où:

$\varepsilon$  est la constante diélectrique,

V est le potentiel,

q est la charge élémentaire d'électrons,

$n$  et  $p$  sont les densités des électrons et des trous

$N_d^+$  et  $N_a^-$  sont les densités de donneurs et d'accepteurs ionisés

L'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité pour les électrons et les trous:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p + \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p \quad (\text{II.3})$$

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \operatorname{grad} n \quad (\text{II.4})$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} + qD_p \operatorname{grad} p \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{E} = - \operatorname{grad} V \quad (\text{II.6})$$

Où:  $G$  et  $R$  sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs,

$J_p$  et  $J_n$  sont respectivement les densités de courant des électrons et des trous.

Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entraînement diffusion. Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique, le second correspond à la diffusion des porteurs.

***Chapitre III:***  
***Résultats et***  
***Interprétations***

### III-1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons donné un aperçu du logiciel de simulation SILVACO que nous allons utiliser. Ce troisième chapitre est consacré à l'étude des diodes électroluminescentes LED uni et multi-puits quantiques émettant dans le bleu ( $380 < \lambda < 500\text{nm}$ ) à base d'hétérojonctions GaN/InGaN. Dans ce contexte, nous allons présenter le diagramme énergétique d'hétérojonction GaN/InGaN, le diagramme énergétique d'un puits de potentiel, en incluant les paramètres technologiques des diodes étudiées ainsi que les propriétés électriques et optiques des matériaux constitutifs nous pouvons alors déterminer les caractéristiques optoélectroniques des structures simulées à la fois internes (concentration des porteurs, diagramme de bande) et externes (courbes  $I(V)$ ,  $P_{op}(I)$ , spectre d'émission, efficacité quantique,...).

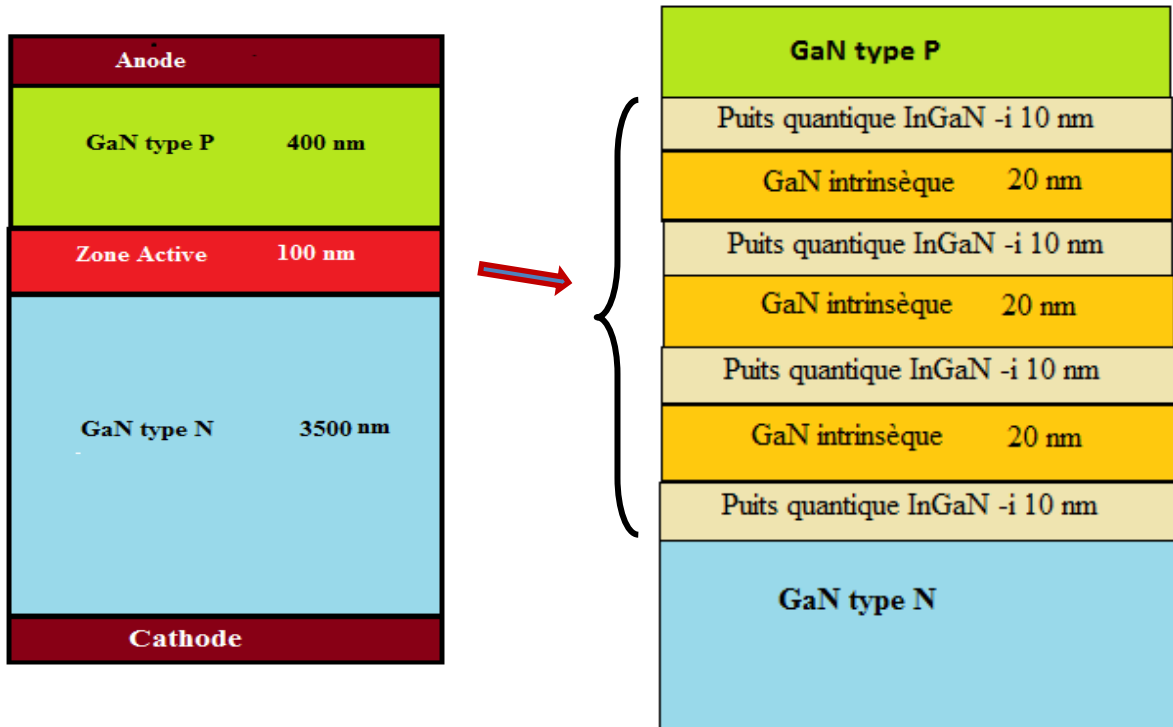
### III-2 Présentation de la structure étudiée

Dans ce travail, nous avons étudié trois structures de diodes électroluminescentes uni et multi-puits quantique (MQW) à base de GaN/InGaN, la première à un seul puits quantique (1WQ), la deuxième à deux puits quantiques (2WQ) et la troisième à quatre puits quantiques (4WQ), la figure (III-1) représente un schéma représentatif de cette dernière (la structure à quatre puits quantiques).

La structure constituée de trois régions principales :

- La première région à base de GaN de type **P** d'épaisseur de 400 nm.
- La deuxième région c'est la zone active constituée par plusieurs couches : InGaN/GaN intrinsèques (non-dopés) qui forme un multi-puits quantique.
- La dernière à base de région GaN de type **N** d'épaisseur de 3500 nm, constituée en même temps le substrat.

Pour la structure à deux puits quantiques (2WQ), la zone active constituée de deux couches d'InGaN chaque une d'épaisseur de 10nm séparées par une couche de GaN d'épaisseur de 20nm. Alors que pour la structure à un seul puits quantique (1WQ), la zone active constituée juste d'une couche d'InGaN d'épaisseur de 10nm.



**Figure III.1:** Schéma représentatif de la structure simulée (structure à quatre puits quantiques).

### III-3 Paramètres de simulation

Le tableau (III-1) résume les paramètres technologiques, géométriques et physiques utilisés pour simuler les trois structures de LED étudiées au cours de ce travail. La différence entre les trois structures est juste dans la constitution de la zone active (comme indiqué dans le paragraphe précédent).

### III-4 Diagramme énergétique

#### III-4-1 Hétérojonction GaN/InGaN

L'hétérojonction GaN/InGaN est la juxtaposition de deux semi-conducteurs différents: le binaire GaN d'un côté et l'alliage InGaN de l'autre côté. Sachant que le gap de GaN est supérieur à celui d'InGaN, il en résulte une hétéro-structure où GaN joue cette fois-ci le rôle de barrière et l'alliage InGaN joue le rôle de barrière de potentiel [34], la figure suivante représente un diagramme énergétique de cette hétéro-structure, où nous pouvons remarquer l'existence d'un puits de potentiel au niveau de la bande de valence à l'interface de deux matériaux.

<b>Matériaux :</b>
<b>GaN</b> ; $E_g = 3,19\text{eV}$
<b>In<sub>0.10</sub> Ga<sub>0.90</sub>N</b> ; $E_g = 2.82\text{eV}$
<b>Structure</b> (multi-hétéro-structures avec (1, 2 ou 4) multi-puits quantiques MQW)
<b>Surface</b> $S = 100 \times 100 = 10^4 \mu\text{m}^2$
<b>Région 1</b> : GaN de <b>typeP</b> dopée avec $N_A = 10^{20} \text{cm}^{-3}$ , épaisseur 400 nm
<b>Région 2 (zone active)</b> , on considère la structure à 4MQW.
Couche1 : InGaN intrinsèque, épaisseur 10 nm
Couche2 : GaN intrinsèque, épaisseur 20 nm
Couche3 : InGaN intrinsèque, épaisseur 10 nm
Couche4 : GaN intrinsèque, épaisseur 20 nm
Couche5 : InGaN intrinsèque, épaisseur 10 nm
Couche6 : GaN intrinsèque, épaisseur 20 nm
Couche7 : InGaN intrinsèque, épaisseur 10 nm
<b>Région 3</b> : GaN de type <b>N</b> dopée avec $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , épaisseur 3500 $\mu\text{m}$ (substrat)
<b>Paramètres physiques</b>
$T = 300 \text{K}$
$\mu_n (\text{InGaN}) = 150 \text{cm}^2/\text{Vs}$
$\mu_p (\text{InGaN}) = 20 \text{cm}^2/\text{Vs}$
$\mu_n (\text{GaN}) = 100 \text{cm}^2/\text{Vs}$
$\mu_p (\text{GaN}) = 10 \text{cm}^2/\text{Vs}$
$\tau_n = \tau_p = 10^{-9} \text{s}$

**Tableau III.1:** Paramètres utilisés pour la simulation (la structure à 4QW).

### III-4-2 Puits quantiques GaN/ InGaN/ GaN

La figure (III-3) décrit un schéma représentative d'un des puits de potentiel (GaN/InGaN/GaN) à l'équilibre thermodynamique, on peut remarquer que la couche intermédiaire à base d'InGaN forme deux barrières de potentiel l'un au niveau de la bande de conduction pour les électrons et l'autre au niveau de la bande de valence pour les trous, l'existence de ces deux barrières constitue un puits quantique qui stocke les électrons et les trous dans cette zone ce qui entraîne une augmentation de taux de recombinaison, et par conséquence une augmentation de taux d'émission de photons d'énergie  $h\nu$  ( $h\nu > E_g$ ), ou  $E_g$  est

le gap d'InGaN est égale à 2,8 eV). D'autre part ces puits quantiques consomment aussi plus d'énergie électrique, donc pour obtenir un bon rendement optique, il faut faire une étude simulatrice sur la région active et choisir de meilleurs paramètres.

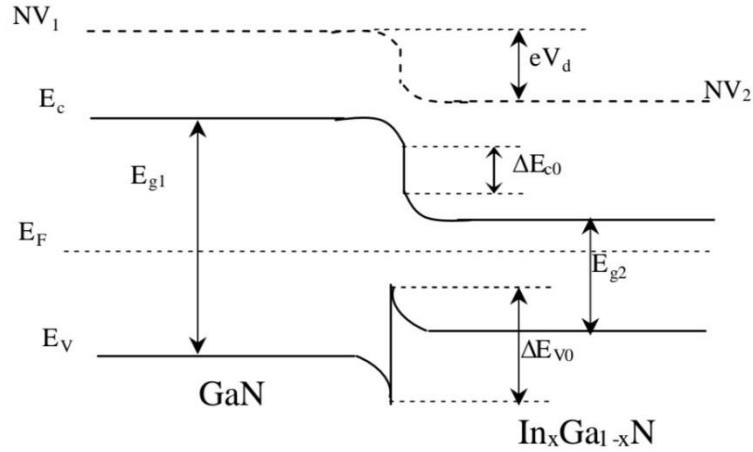


Figure III.2: Diagramme énergétique d'une hétérojonction GaN/InGaN [34].

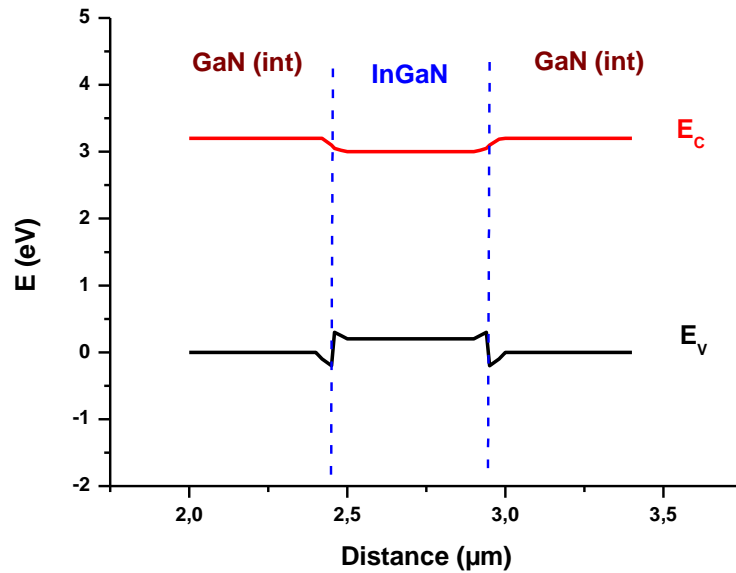
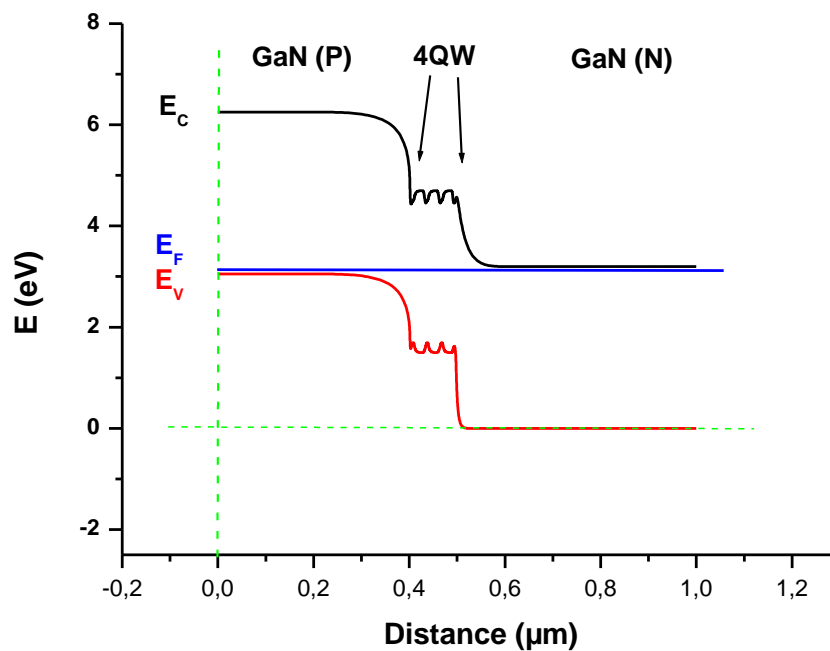


Figure III.3: Puits de potentiel GaN/InGaN/GaN.

### III-4-3 Présentation de diagramme énergétique

La figure (III-4) représente le diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique de la structure à quatre puits quantique (4WQ), on peut remarquer ici l'apparence des puits quantiques constituent la région active de la diode étudiée, en raison de petites épaisseur des couches d'InGaN (10 nm), les puits de potentiel apparaissent comme des pics au niveau des bandes de valences et de conduction.

Pour les deux autres structures (1QWà et (2QW) le diagramme énergétique est similaire à celui-ci, mais avec un nombre de puits quantiques qui est proportionnel à leurs structures.



**Figure III.4:** le diagramme énergétique.

### III-5 Résultats de la simulation

#### III-5-1 Extraction de résultats

Cette partie est réservée pour présenter les résultats de la simulation. Toutes les phases du programme de simulation sont présentées en détail dans l'annexe à la fin de ce manuscrit. Pour visualiser les résultats obtenus, en utilisant le fichier « Tony plot » qui donne les résultats d'une manière directe sous forme de courbes. Pour obtenir les résultats de simulation sous forme de tableaux, nous avons utilisé l'Excel du Microsoft office. Pour tracer les



différentes séries de courbes, nous avons utilisé le logiciel « Origin », ce dernier nous à permet de présenter les courbes d'une manière plus sophistiquée.

Avec cette méthode, nous avons pu d'extraire les courbes suivantes:

- Les caractéristiques I-V.
- Le spectre d'émission.
- La puissance lumineuse fournie par la diode en fonction de la tension électrique appliquée.
- La puissance lumineuse fournie par la diode en fonction du courant électrique.
- La concentration des porteurs de charge (électrons et trous) le long de l'épaisseur de la diode ainsi que le diagramme énergétique.

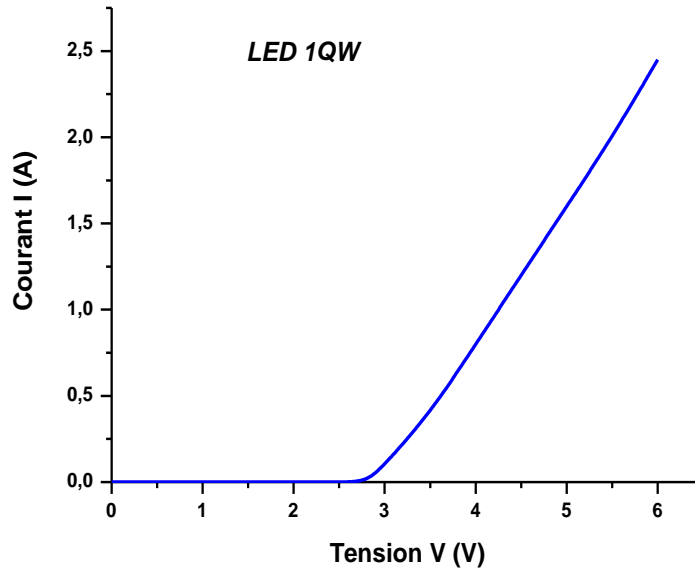
### III-5-2 simulation de la LED à seul puits quantique (1QW)

#### III-5-2-1 Caractéristiques I(V)

Dans son fonctionnement ordinaire, la diode électroluminescente est polarisée en directe et le courant circule de l'anode vers la cathode. C'est pour cela la caractéristique I(V) d'une LED est similaire à celle d'une diode classique.

La figure (III-5), illustre la caractéristique électrique courant-tension (I -V) en échèle linéaire pour la diode électroluminescente à un seul puits quantique. La tension de polarisation variée de 0V à 6V, nous notons tout d'abord que :

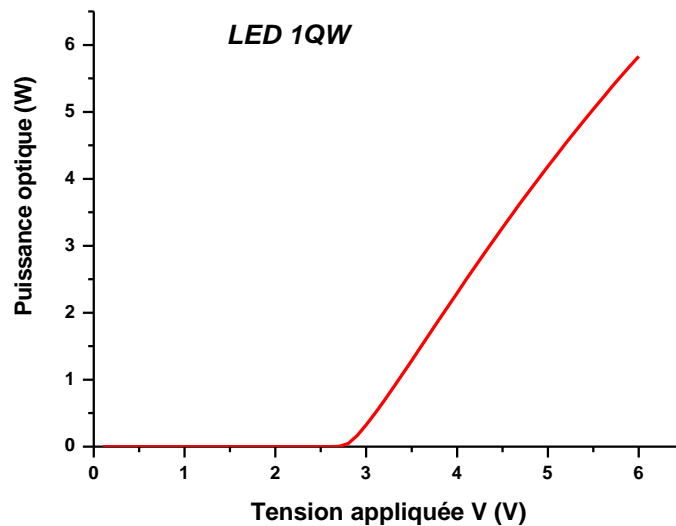
- Pour  $0 < V < 2,8V$ , le courant électrique est nul.
- A partir de  $V > 2,8V$ , le courant électrique augmente d'une manière semi-linéaire, Cette caractéristique est similaire de celle d'une diode classique avec une tension de seuil assez élevée ( $V_{th} = 2,8V$ ), cette augmentation de la tension de seuil est due de la consommation de l'énergie électrique au niveau du puits de potentiel pour prduit de l'énergie lumineuse, l'augmentation semi-linéaire du courant au-lieu d'une augmentation exponentielle due au phénomène de recombinaison au niveau de zone active et à l'existence des résistances parasites aux bords de la LED.



**Figure III.5:** Variation du courant électrique en fonction de la tension de polarisation.

### III-5-2-2 Caractéristique $P_{op}(V)$

La figure (III-6) décrit la variation de la puissance optique fournit par la LED étudiée en fonction de la tension de polarisation. Comme la caractéristique  $I(V)$ , On peut diviser cette courbe en deux régimes :



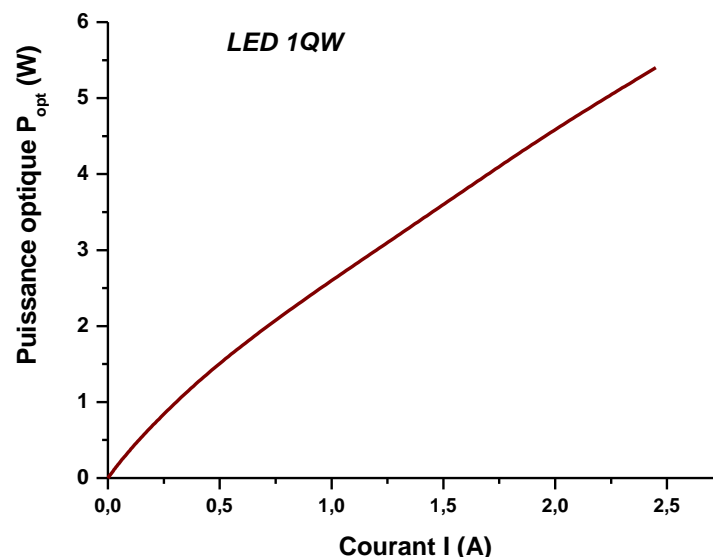
**Figure III.6:** Variation de la puissance optique en fonction de la tension de polarisation.

- Pour  $0 < V < 2,8 \text{ V}$ , où la puissance optique est nulle, donc il n'est pas d'émission de photons, et la tension appliquée reste inférieure de la tension de seuil  $V_{th}$  ( $V_{th} = 2,8 \text{ V}$ ). Cette perte de tension s'interprète par l'existence de barrières de potentiel au niveau des interfaces entre les différentes couches constitutives de la diode, dont les puits de potentiel et la tension de diffusion entre la région P et la région N.
- Pour  $V > 2,8 \text{ V}$ , la tension appliquée est supérieure de la tension de seuil, un courant électrique apparaît, donc une puissance électrique qui sera convertie à une puissance optique avec certain rendement quantique, cette caractéristique indique qu'il est nécessaire d'alimenter la LED avec une tension minimale pour qu'elle émette de la lumière.

### III-5-2-3 Caractéristique $P_{op}(I)$

La caractéristique puissance -courant (P-I) pour la diode électroluminescente à un seul puits quantique est présentée sur la figure (III.7).

On peut divisée cette courbe en partie, linéaire et non- linéaire. La partie linéaire commence à partir de 0.5 A. Elle est le résultat de la prédominance du taux de recombinaison radiative dans la région active de la LED pour des tensions élevées. Dans la partie non-linéaire entre 0 et 0.5A, la puissance optique varie d'une manière quadratique au fur et à mesure le courant direct augmente.



**Figure III.7:** Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique.

### III-5-2-4 Spectre d'émission

La densité spectrale de puissance en fonction de l'énergie des photons (on peut utiliser aussi la longueur d'onde) est présentée sur la figure (III.8). Dans cette partie nous étudions l'effet de la tension de polarisation qui varie de 3,0V à 4,0V, sur la densité spectrale de puissance, l'émission spontanée et la densité de flux spectrale, durant la simulation nous fixons les paramètres physique et géométrique.

La densité spectrale de puissance ainsi que les recombinaisons radiatives augmentent avec la tension appliquée, car le nombre de porteurs injectés dans le puits quantique augmente. Il faut noter aussi que l'énergie du pic glisse vers les grandes énergies que les porteurs de charge des vallées supérieures sont impliqués. La figure montre un pic autour de  $\nu = 2,85\text{eV}$  ( $\lambda = 435\text{nm}$ ) qui se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la tension de polarisation est diminuée.

La génération de lumière dans les LED est principalement due à l'émission spontanée de photons, qui possède une énergie minimale correspondante au gap du matériau utilisé (dans ce cas  $h\nu_{\min} = E_g = 2,8\text{eV}$ ), alors que l'énergie maximale tend jusqu'à 3,15eV pour  $V = 4,0\text{V}$  ; 3,10 eV pour  $V = 3,5\text{V}$  et 3,0 pour  $V = 3,0\text{V}$ .

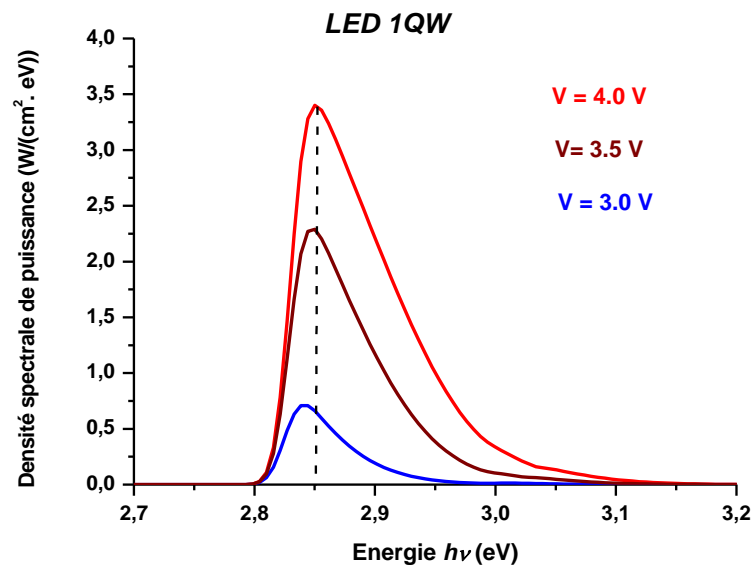


Figure III.8: La densité spectrale de puissance en fonction de l'énergie.

- L'énergie des photons émet  $h\nu$  est entre 2,8 et 3,15 eV correspondant à la longueur d'onde :  $393 < \lambda < 440\text{nm}$ .
- Le maximum d'intensité correspond à des photons d'énergie de 2,85 eV ce qui correspond à une longueur d'onde au sommet  $\lambda_{\text{pic}} = 0,435 \mu\text{m}$  (c'est-à-dire la lumière bleue proche de violet).
- Pour  $V=4,0\text{V}$
- ✓ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu$  est de 0,11eV.
- Pour  $V=3,5\text{V}$
- ✓ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu$  est de 0,07eV.
- Pour  $V=3,0\text{V}$
- ✓ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu$  est de 0,05eV.

### III-5-2-5 Efficacité quantique externe

L'efficacité quantique externe EQE (External Quantum Efficiency, en anglais) est définie par le rapport :

$$EQE = \frac{\text{Nombre de photons sortant de la LED pas seconde}}{\text{nombre d'électrons injectés dans la LED par seconde}} = \frac{P/(h\nu)}{I/q} \quad (\text{III.1})$$

L'efficacité quantique externe peut être décomposés en deux termes :

$$EQE = IQE \cdot \eta_{\text{Extraction}} \quad (\text{III.2})$$

Où:

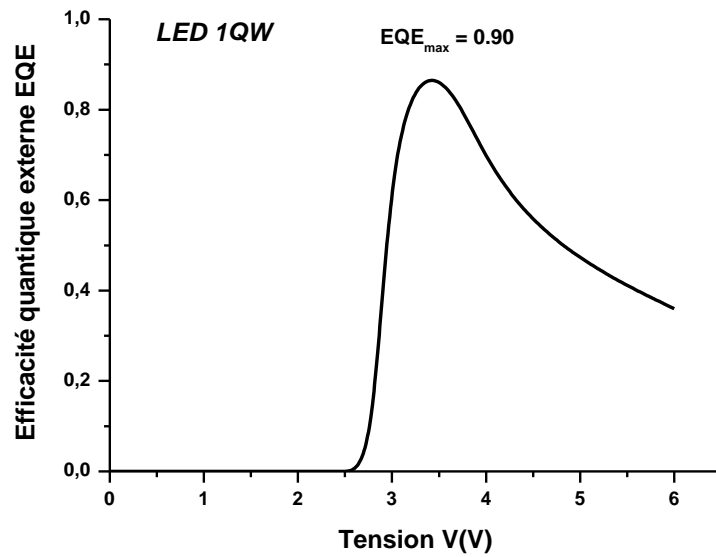
$\eta_{\text{Extraction}}$  est l'efficacité d'extraction quantique de la LED

La figure (III-9) montre l'efficacité quantique externe en fonction de la tension appliquée, on peut remarquer que :

- Pour,  $0 < V < 2,8 \text{ V}$ , où l'efficacité quantique externe est nulle, il n'y a pas de courant, ni de puissance optique, donc il n'y a pas d'efficacité lumineuse.

Pour,  $2.8 < V < 3.5 \text{ V}$ , l'efficacité quantique externe est maximale, atteint jusqu'à la valeur  $EQE=0.90$

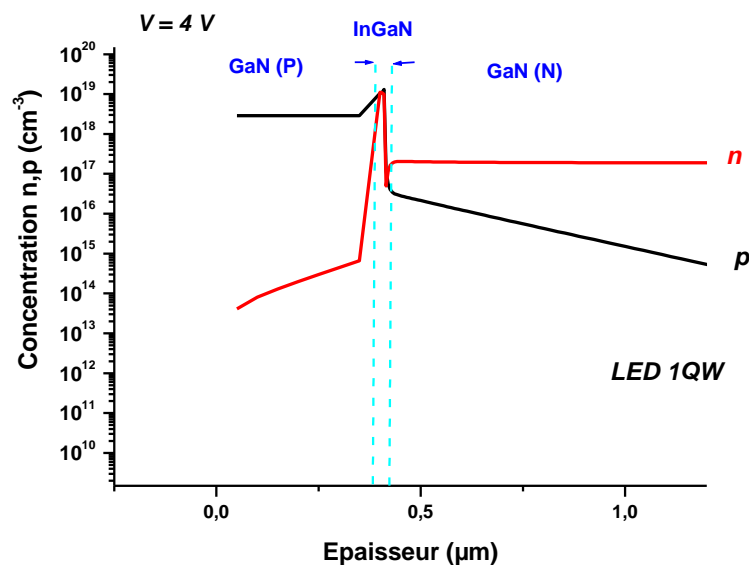
Pour,  $3.5 < V < 6 \text{ V}$ , l'efficacité quantique externe diminue jusqu'à la valeur 0.35. Cette diminution traduit par l'existence des pertes d'énergie électrique.



**Figure III.9:** Variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la tension de polarisation.

#### III-5-2-6 Distribution des électrons et des trous à V = 4V

La figure(III.10) représentés les distributions des électrons et des trous en fonction de l'épaisseur de la LED. On peut remarquer que au niveau de la région active, la concentration des électrons « n » et des trous « p » est maximale ( $n = p = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ).

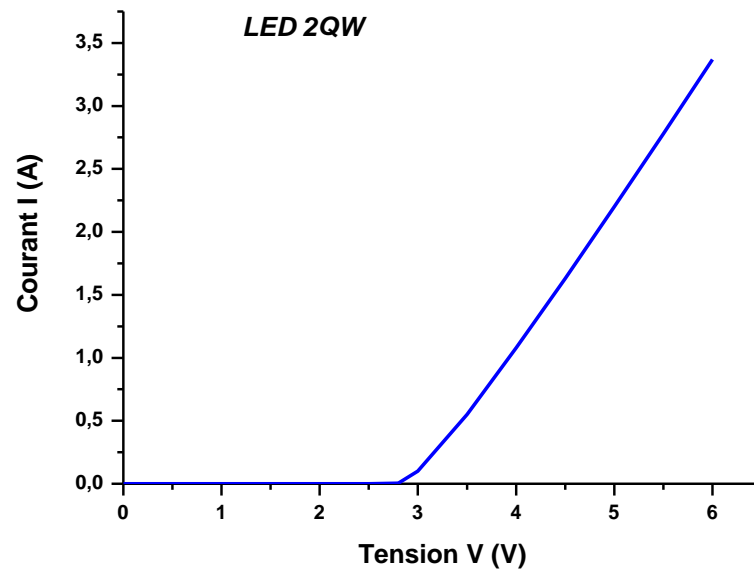


**Figure III.10:** Concentration des électrons n et des trous p en fonction d'épaisseur.

L'utilisation des structures à un seul ou à multi-puits quantique provoque le confinement des porteurs de charge libres dans les couches de puits ce qui augmente l'intensité de la lumière émise et le rendement quantique de la diode.

### III-5-3 LED à 2QW

#### III-5-3-1 Caractéristiques I(V)



**Figure III.11:** Variation du courant électrique en fonction de la tension de polarisation (2QW).

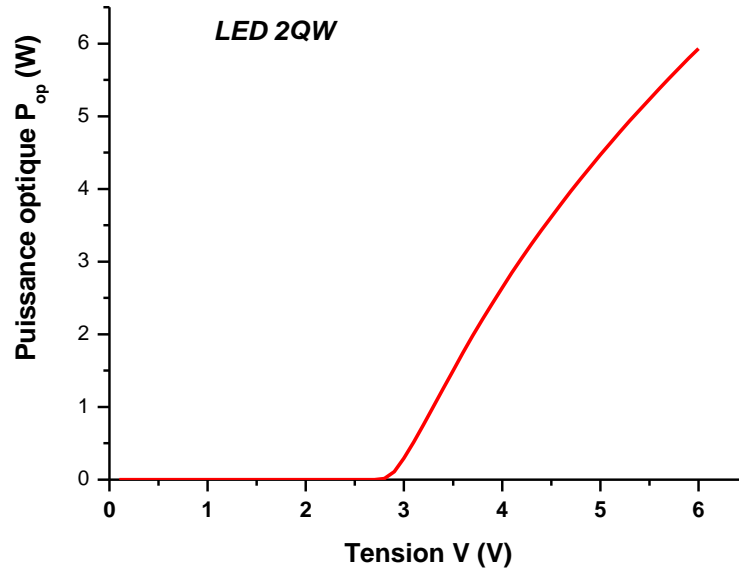
Sur la figure (III-11), nous avons présenté la variation du courant électrique en fonction de la tension de polarisation pour la structure à deux puits quantiques (2QW). Nous observons que la courbe est similaire à celle de la structure à un seul puits quantique avec une tension de seuil  $V_{th}$  aussi est égale à 2,8 eV.

#### III-5-3-2 Caractéristiques $P_{op}(V)$

La figure (III-12) représente la variation de la puissance optique en fonction de la tension de polarisation fournie par la LED à deux puits quantiques (2QW). Comme la LED (1QW), on peut déviser cette courbe en deux régimes :

- Pour  $0 < V < 2,8$  V, où la puissance optique est nulle, donc il n'y a pas d'émission de photons,

- Pour  $V > 2,8$  V, la tension appliquée est supérieur de la tension de seuil, et la puissance optique apparait avec certain rendement quantique.



**Figure III.12:** Variation de la puissance optique en fonction de la tension de polarisation (2QW).

### III-5-3-3 Caractéristiques $P_{op}(I)$

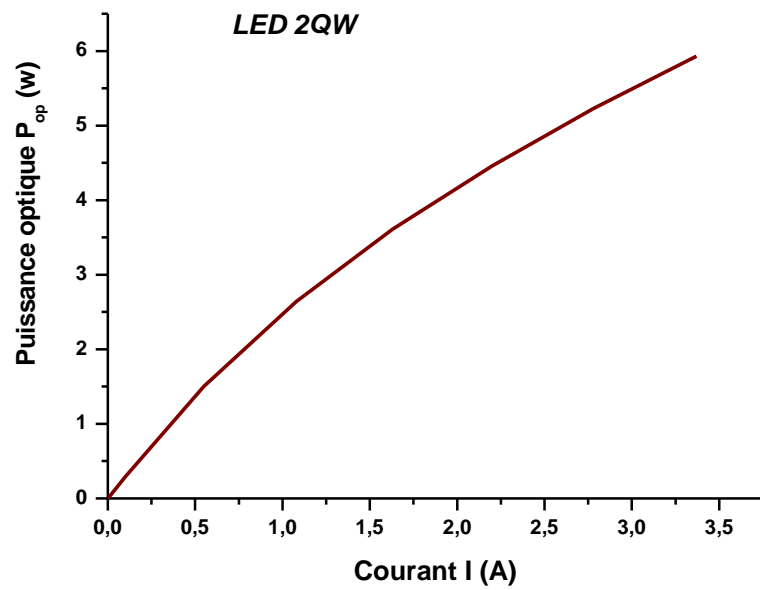
La figure (III.13) représente la variation de la puissance optique en fonction du courant électrique fournit par la LED à deux puits quantiques (2QW).

Même explication que la figure (III.7), où on peut divisée cette courbe en partie, linéaire et non- linéaire. La partie non-linéaire de 0 à 0,5A et la partie linéaire commence à partir de 0,5 A.

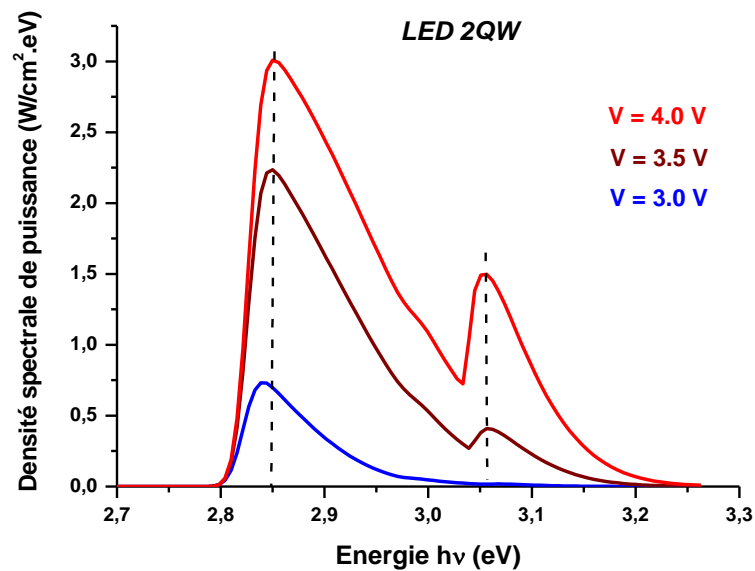
### III-5-3-4 Spectre d'émission

La densité spectrale de puissance en fonction de l'énergie des photons est représentée sur la figure (III.14), à partir de cette figure on peut remarquer les résultats suivants :





**Figure III.13:** Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique (2QW).



**Figure III.14:** La densité spectrale de puissance en fonction de l'énergie (2QW).

- L'énergie minimale  $h\nu_{\min} = E_g = 2,8\text{eV}$ ,
- L'énergie maximale tend jusqu'à  $3,25\text{eV}$  pour  $V = 4,0\text{V}$  ;  $3,20\text{ eV}$  pour  $V = 3,5\text{V}$  et  $3,0$  pour  $V = 3,05\text{V}$ .
- Il y a deux pics pour  $V = 4\text{ V}$  et  $V = 3,5\text{ V}$ , le premier à  $h\nu = 2,85\text{ eV}$  comme la LED (1QW) et le deuxième à  $h\nu = 3,06\text{ eV}$ .
- L'énergie des photons émet  $h\nu$  est entre  $2,8$  et  $3.25\text{ eV}$  correspondant à la longueur d'onde :  $381 < \lambda < 440\text{nm}$ .
- Le maximum d'intensité correspond à des photons d'énergie de  $2,85\text{ eV}$  ce qui correspond à une longueur d'onde au sommet  $\lambda_{\text{pic}} = 0,435\text{ }\mu\text{m}$  (c'est-à-dire la lumière bleue proche de violet).
- Pour  $V=4,0\text{V}$
- ✓ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu=0,15\text{eV}$  pour le premier pic et  $\Delta h\nu=0,06\text{eV}$  pour le deuxième pic.
- Pour  $V=3,5\text{V}$
- ✓ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu=0,10\text{eV}$  pour le premier pic mais pour le deuxième pic ce n'est pas claire.
- Pour  $V=3,0\text{V}$
- ✓ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu$  est de  $0,06\text{eV}$ .

### III-5-3-5 Distribution des électrons et des trous

La figure(III.15) représentés la distribution des électrons et des trous en en fonction de l'épaisseur de la LED. On peut remarquer qu'au niveau de la région active il y a deux pics correspondant aux deux puits quantiques, où la concentration des électrons « n » et des trous « p » est maximale ( $n = p = 2.10^{19}\text{ cm}^{-3}$ ).

### III-5-4 LED à 4QW

Dans cette partie, nous représentons les caractéristiques optiques et électroniques de la LED à quatre puits quantiques (4QW), l'explication physique est la même que les autres LED (1QW) et (2QW), mais les résultats sont peu différents.

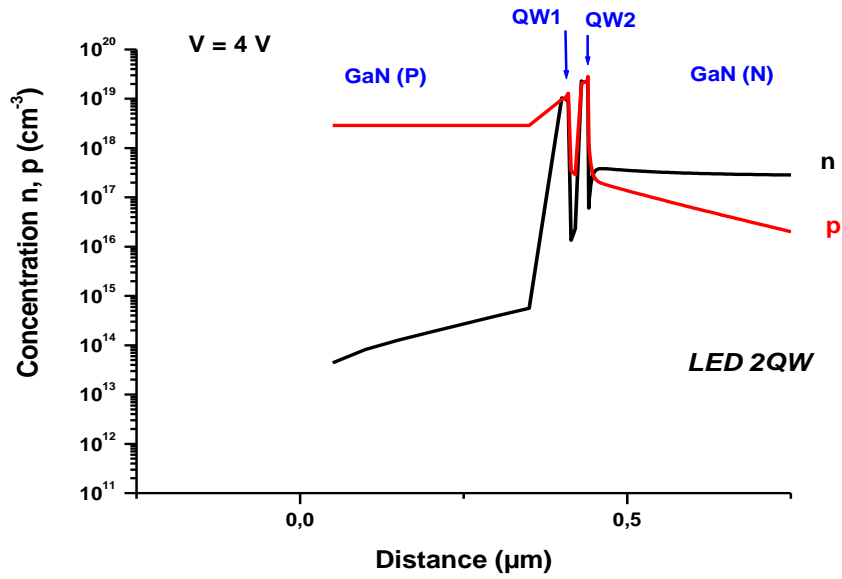


Figure III.15: La concentration en fonction d'épaisseur(2QW).

La figure (III.16) décrit la caractéristique I(V), la figure (III.17) décrit la caractéristique  $P_{op}(V)$  et la figure (III.18) décrit la caractéristique  $P_{op}(I)$ , cette diode est le même comportement que les autres diodes avec toujours une tension de seuil  $V_{th} = 2,8$  V.

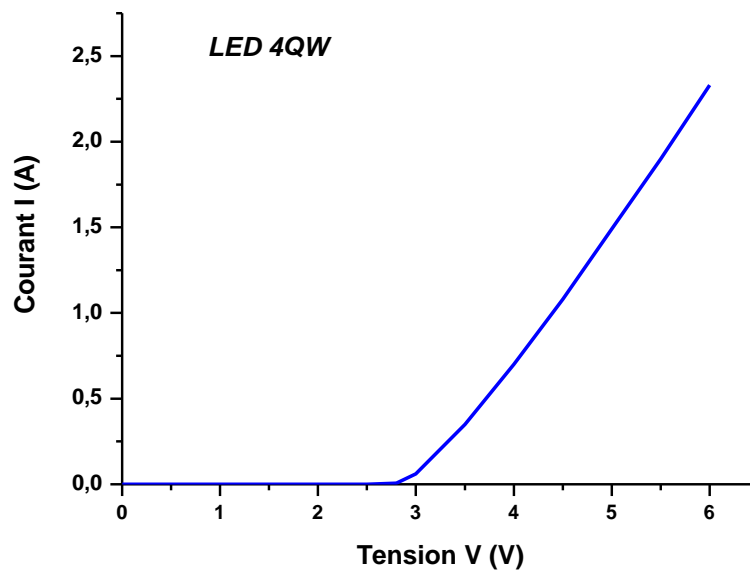
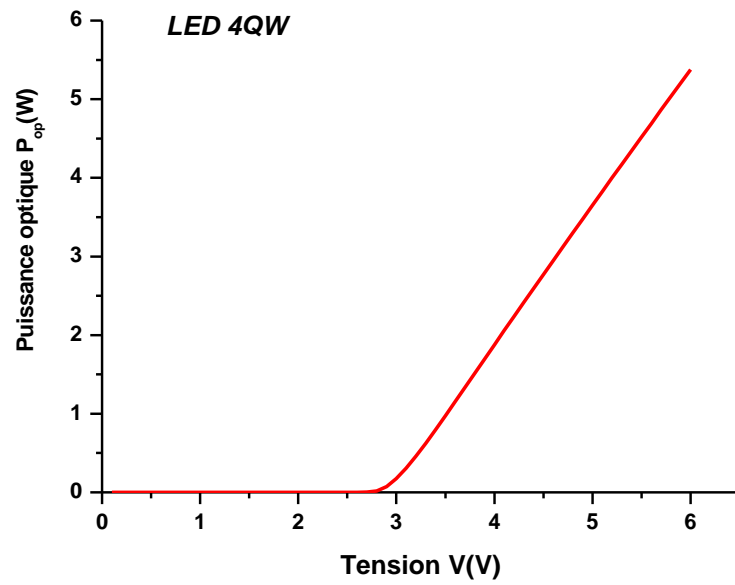
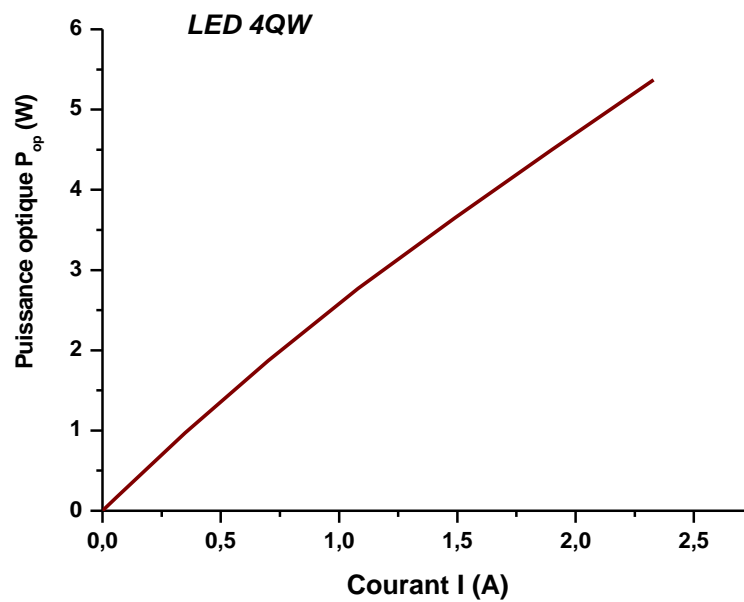


Figure III.16: Variation du courant électrique en fonction de la tension de polarisation(4QW).



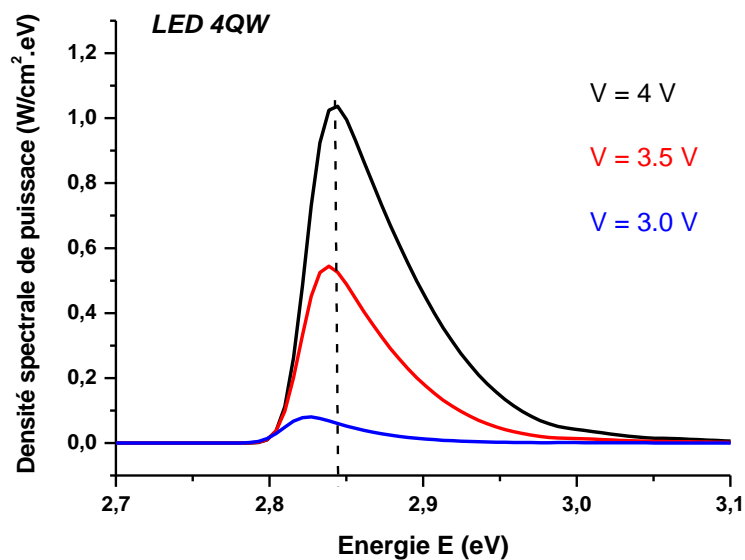
**Figure III.17:** Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique (4QW).



**Figure III.18:** Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique (4QW).

La densité spectrale de puissance en fonction de l'énergie des photons est représentée sur la figure (III.19), à partir de cette figure on peut remarquer les résultats suivants :

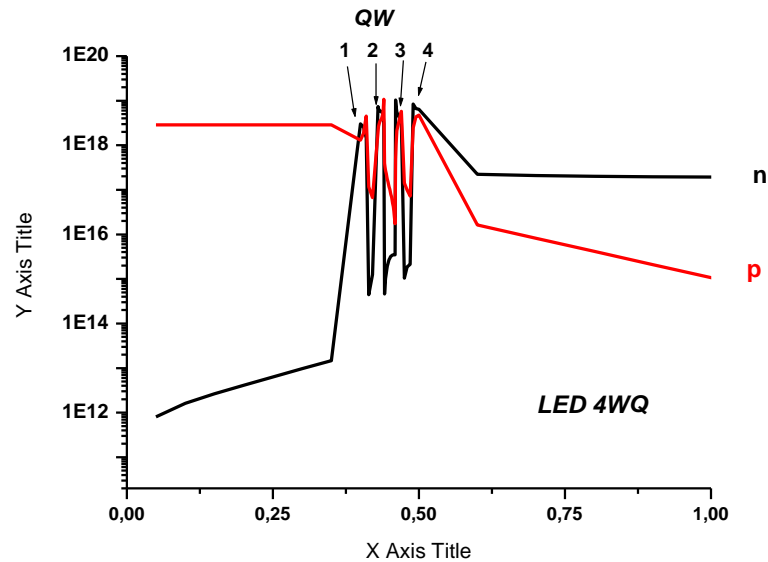
- L'énergie des photons émet  $h\nu$  est entre 2,8 et 3,05 eV correspondant à la longueur d'onde :  $406 < \lambda < 440\text{nm}$ .
- Le maximum d'intensité correspond à des photons d'énergie de 2,84 eV ce qui correspond à une longueur d'onde au sommet  $\lambda_{\text{pic}} = 0,436 \mu\text{m}$  (c'est-à-dire la lumière bleue proche de violet).
- Pour  $V=4,0\text{V}$
- ✓ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu$  est de 0,07eV.
- Pour  $V=3,5\text{V}$
- ✓ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu$  est de 0,06eV.
- Pour  $V=3,0\text{V}$
- ✓ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu$  est de 0,04eV.



**Figure III.19:** Le spectre d'émission en fonction de l'énergie (4QW).

La figure (III.20) représentés la distribution des électrons et des trous en en fonction de l'épaisseur de la LED. On peut remarquer qu'au niveau de la région active il y a quatre pics

correspondant aux quatre puits quantiques, où la concentration des électrons « n » et des trous « p » est maximale ( $n \approx p \approx 2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ).



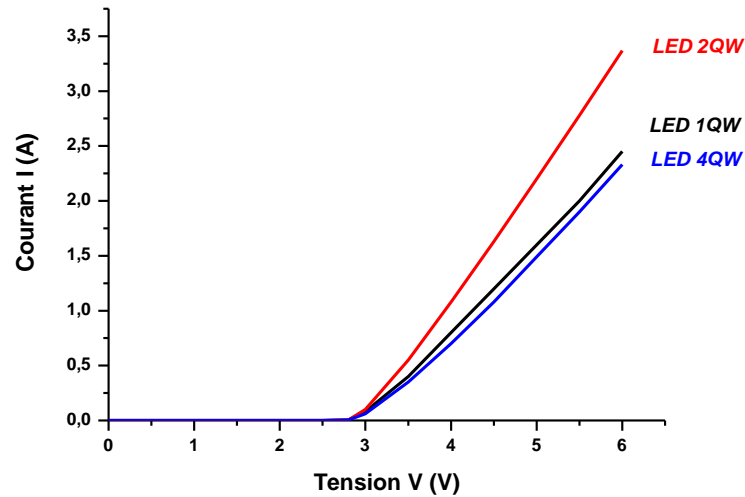
**Figure III.20:** La concentration en fonction d'épaisseur(4QW).

### III-6 Comparaison des caractéristiques optoélectroniques des trois diodes

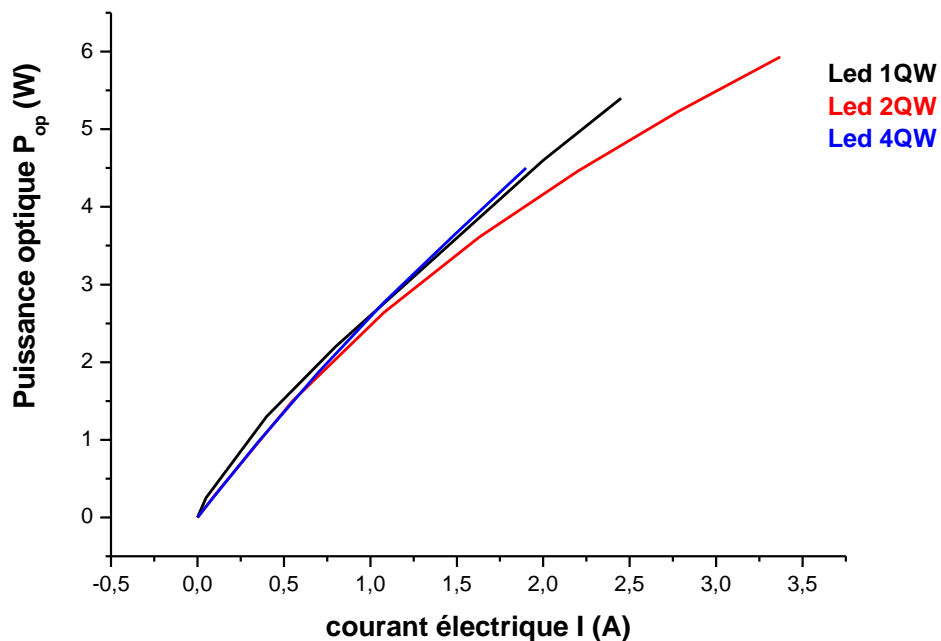
Les paragraphes suivants représentent une comparaison des caractéristiques électriques et optiques des diodes électroluminescentes étudiées précédemment (1QW), (2QW) et (3QW).

La figure (III.21) représente une comparaison de la caractéristique électrique courant-tension  $I(V)$  en échelle linéaire. On s'attend à ce que, pour une tension donnée, le courant augmente au fur et à mesure que le nombre de puits diminue. Mais cette figure montre que le courant est plus élevé pour la diode à deux puits quantiques par rapport à la diode à puits quantique simple ce qui inattendu, mais généralement, plusieurs paramètres déterminent les caractéristiques électriques et même optiques des LED.

La figure (III.22) illustre une comparaison de la caractéristique  $P_{op}(I)$  pour les trois LEDs étudiées, sur cette figure on peut remarquer que la puissance optique est proportionnelle avec le courant électrique pour les trois diodes, avec une certaine préférence à la LED (1QW) qui donne une puissance optique peu élevée par rapport aux autres diodes (4QW) et (2QW).



**Figure III.21:** Variation du courant électrique en fonction de la tension de polarisation pour 1QW, 2QW et 4QW.

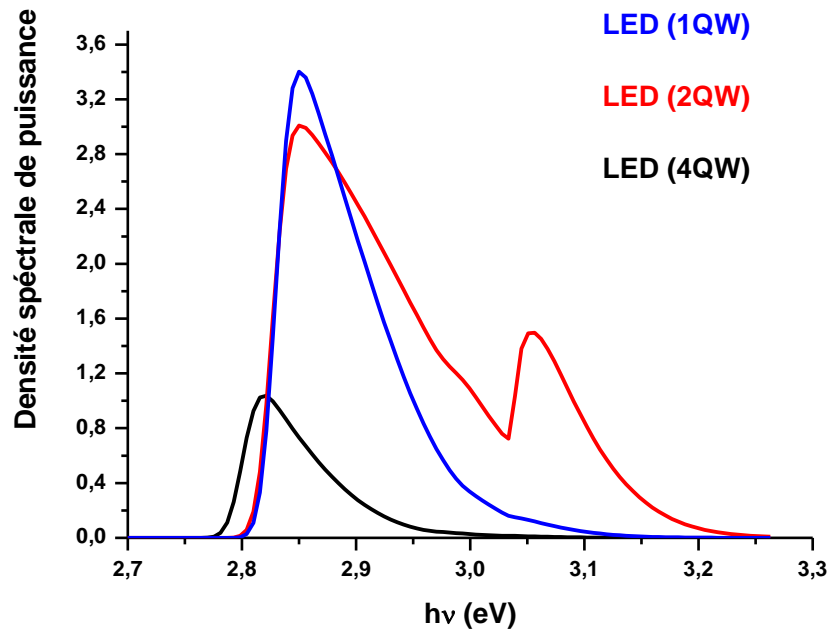


**Figure III.22:** Variation de la puissance optique en fonction du courant électrique pour 1QW, 2QW et 4QW.

La figure (III.23) illustre une comparaison de la densité spectrale de puissance des trois diodes étudiées en fonction de l'énergie des photons à  $V = 4V$ . Cette courbe montre que la diode à un seul puits quantique donne une densité lumineuse maximale du pic plus élevée que

les deux autres diodes, avec une largeur mi-hauteur relativement étroite, c'est-à-dire des caractéristiques optiques plus acceptables que les autres.

La comparaison entre les différents spectres montre aussi que la différence dans cette caractéristique entre les trois LED est importante.



**Figure III.23:** Comparaison de la densité spectrale d'émission à  $V=4V$  en fonction de l'énergie pour les trois LED 1QW, 2QW et 4QW.



### **Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une étude de simulation par Silvaco-Atlas de trois structures de diodes électroluminescentes, la première à un seul puits quantique (1QW), la deuxième à deux puits quantiques(2QW) et la troisième à quatre puits quantiques(4QW). Le but était l'étude des caractéristiques optiques et électriques de ce type de diodes. La différence entre les trois structures montre que chaque structure est remarquable surtout pour le spectre d'émission de photons. Cette étude nous a permis aussi d'améliorer nos connaissances et conception de la physique des semi-conducteurs et des composants optoélectroniques.

La simulation par le logiciel Atlas-Silvaco est un outil très important pour toute conception et réalisation de composants micro et optoélectroniques.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

Les diodes électroluminescentes sont très efficaces pour produire de la lumière utilisée dans le domaine de l'électronique et de la communication et même pour l'éclairage public, elles ont une durée de vie plus longue que les ampoules ordinaires avec une faible puissance de consommation, une construction robuste et une émission faible de chaleur. Le but est aujourd'hui d'obtenir des LED à haute performance avec un bon rendu de couleurs.

L'utilisation des simulateurs tels que le logiciel Silvaco pour améliorer les composants optoélectronique est un outil obligatoire et indispensable, il aide les chercheurs à acquérir de bonne conception du comportement des composants et permet à réduire les coûts et à gagner du temps.

Dans ce travail, nous avons présenté une étude de simulation par Atlas Silvaco des caractéristiques optoélectroniques des LED émettant dans le bleu. Dans ce contexte, nous avons commencé au premier chapitre par dresser un état de l'art des diodes électroluminescentes où nous avons représenté les points importants de cette technologie à savoir : le principe de fonctionnement des différents types de LED: homo-jonction, hétérojonction et puits quantique ainsi que leurs caractéristiques, problématique de l'extraction de lumière et les méthodes d'obtention de la lumière blanche. Effectivement, les propriétés optiques et physiques de quelques matériaux semi conducteurs à gap direct telle que GaAs, AlGaIn et InGaIn, leur permettent de convertir de façon efficace, l'énergie électrique en énergie lumineuse, ces matériaux possèdent en général, un gap direct relativement élevé, capable de couvrir une grande partie du spectre visible et de l'UV.

Au deuxième chapitre de ce mémoire, nous avons présenté le logiciel de simulation Atlas-Silvaco, ce logiciel donne généralement des résultats proches à ceux de l'expérience, les différentes articulations et instructions utilisées à la simulation des composants optoélectroniques sont illustrées dans cette partie de notre travail.

Au troisième chapitre, nous avons présenté une étude de simulation de trois structures de diodes électroluminescentes à simple et à multi-puits quantiques à base d'hétérojonctions GaN/InGaIn. Les couches d'InGaIn dont l'épaisseur est de l'ordre de 10nm prise en sandwich entre les couches de GaN dopées. Les caractéristiques courant-tension (I-V), puissance optique-tension P(V), puissance optique-courant P(I), densité spectrale en fonction d'énergie de photons ainsi que l'efficacité quantique externe et la concentration des porteurs de charge

le long de la diode pour les trois structures de LEDs sont présentées, discutées et comparées au cours de ce troisième chapitre.

L'étude nous a permis d'une part de prendre une vue générale sur les diodes électroluminescentes, les phénomènes physiques spécifiques, les différentes structures, leurs principes de fonctionnement et l'importance de choisir des matériaux correspondants aux applications demandées, et d'autre part l'utilisation du logiciel de simulation Atlas-Silvaco pour simuler des composants optoélectroniques à base de semiconducteurs tels que les cellules solaires, les LEDs et les Lasers.

En terme de perspectives, il nous paraît l'importance de développer notre travail pour étudier l'influence de quelques paramètres physiques et technologiques sur le comportement des LEDs simulées préalablement, en faisant varier plusieurs paramètres tels que : l'épaisseur de la couche active, la température en y insérant plusieurs puits quantiques et comparer les résultats obtenus avec ceux d'une LED comprenant un seul puits quantique.

*Référence*  
*Bibliographiques*

## ***Références bibliographiques :***

- [1] WIKIPEDIA, [https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting\\_diode](https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode), 2022.
- [2] Edwards, Kimberly D. "Light Emitting Diodes". University of California at Irvine.p. 2.2019.
- [3] Lighting Research Center. "How is white light made with LEDs?".Rensselaer Polytechnic Institute. 2019.
- [4] Okon, Thomas M.; Biard, James R. "The First Practical LED". Edition Tech Center.org. (2015).
- [5].Sergey Yurchuk, Oleg Rabinovich and Sergey Didenko, LED and Phototransistor Simulaion, <https://www.intechpen.com/chapters/55943>.2017
- [6].Aid.Amina , "Etude de quelques propriétés physique de L'alliage BxIn1-xSb en utilisant les méthodes de premiers principe", mémoire de master ,Université Mohamed Boudiaf M'sila,(2019).
- [7].Terkhi Sabrina,"Modelisation de l'influence de la composition chimique "x"desmatérieux arsenic Sur les proprietes de transport electronique"" ,Thèse de doctorat, Université Abdelahamid Ibn Bdis de Mostaganem,(2013).
- [8].Z. Kamal." Simulation des caractéristiques courant-tension à Schottky en Phosphure d'indium InP", mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra,(2014).
- [9].J.Dziewior and W. SCHMID, Auger coefficient for hieghly doped and heily excited silicon", Appl Phys Lett ,1977, Vol 31, p346-348.
- [10].E.Fred schubert ,Light-Emitting Diodes, Second Eddition ,(2006).
- [11].Mélanie Rolles, "2tude théorique de la faisabilité des LED à base de ZnGeN2" Thèse de doctorat, Université De Lorraine,(2018).
- [13].FaycalBouzid , "Simulation des propriétés électrique d'une jonction à base de nitrure de gallium.Application au détecteur de rayonnement " , thèse de doctorate , Université Mohamed Khider Biskra,(2018).
- [14].Marouf. Yacine , " Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteur III-V", thèse de doctorat,Université Mohammed khider Biskra, (2019).

- [15].FaycalBouزيد , "Simulation des propriétés électrique d'une jonction à base de nitrure de gallium.Application au détecteur de rayonnement " , thèse de doctorate , Université Mohamed Khider Biskra,(2018).
- [16].Mansour Samah , "Etude et simulation des caractéristique électriques de diode électroluminescente(LED)",mémoire de master ,Universite Mohammed khider Biskra ,(2016).
- [17].C. Catalano," couplage entre les lasers solides émettant dans le bleu et les luminophores jaunes pour l'obtention de la lumière blanche pour l'éclairage " , thèse de doctorat,GEET, (2020).
- [19]. "Tabbi, Hadjer , "Caractérisation automatisée des diodes électroluminescents", mémoire de master , Université Med khider ,Biskra, (2014).
- [20]. "H.Mathieu , " Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", Dunod ,Paris,(2009).
- [21]. "A. Haddoud , "Simulation par MATLAB des diodes électroluminescentes", mémoire de master , Université Med khider Biskra , (2018).
- [24].A. Hamdoune « opto-électronique cours, université Abou BekrBelkaid ».
- [25].C. Ngo, H. Ngo, livre, « Les semi-conducteurs de l'électrons aux dispositifs » Dunod,Paris, pp, 94-97, 179-184, 2003
- [26].E. Fred Schubert, Livre, « Light emitting diodes » second edition rensseleer polytechnic institute. Troy, New York, pp, 59-84, 222-236, 2006Doct.belaidpage49
- [27].These de doctorat Belaidtlemcen page 56
- [28].Nicolas. Pousset "Caractérisation du rendu des couleurs desLED"thèse.2009,p.48
- [ 29].Dahmane.K, «Étude et simulation d'un transistor AlGaN/GaNHEMT»,mémoiredemaster,Université Mohammed Khider Biskra,(2014).
- [ 30].Mancer. Mansoura,«Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs)»,Mémoire de Magister,UniversitéMohamedKhider Biskra, (2012)
- [31].M. Dilmi, «étude des performances de la cellule InGaP/GaAs/Ge par simulation»,mémoire de Master, Université Mohammed Boudhief de faculté de technologieélectronique, (2016).
- [32].B. Lamia et B. Ounissa,«Simulation d'une diode électroluminescente organiquesous ATLAS-SILVACO»,mémoire de master,Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2018)

[33].Baldomero Garcia. Jr,«Indium Gallium nitride multijunction solar cell simulationusing silvaco Atlas »,thèsededoctorat,Naval postgraduate school, Monterey california,(2007).

[34] Hebali Khaled "Etude D'une Diode Electroluminescente A Base De Gan/Aigan En Ultra-Violet Et En Visible" Le Diplome De Magister .Universite D'oran 2007/2008

## ***Webo-graphie***

[12].[https://www.google.com/search?q=GaAs+structure&rlz=1C1XXVF\\_frDZ948DZ948&sxsrf](https://www.google.com/search?q=GaAs+structure&rlz=1C1XXVF_frDZ948DZ948&sxsrf)

[18]."[https://elearn.univlemcen.dz/pluginfile.php/112340/mod\\_resource/content/1/Chapitre%202%20LEDoptoélectronique.pdf](https://elearn.univlemcen.dz/pluginfile.php/112340/mod_resource/content/1/Chapitre%202%20LEDoptoélectronique.pdf).

[22].[https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-dune-LED-de-faible-puissance-Le-LED-de-forte-puissance-Les-LED\\_fig8\\_325809369\\_22-02-2022\\_15.43](https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-dune-LED-de-faible-puissance-Le-LED-de-forte-puissance-Les-LED_fig8_325809369_22-02-2022_15.43)

[23].[https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-dune-LED-de-forte-puissance-vue-en-coupe-PHI\\_fig21\\_41308719\\_22-02-2022\\_15.54](https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-dune-LED-de-forte-puissance-vue-en-coupe-PHI_fig21_41308719_22-02-2022_15.54)



## LED MQW1

```

# BismiAllahiErrahmaniErrahim
go atlas

# InGaN LED01Opto Device Simulation (2022)
#
# Parameter used for this BlueUQW LED
#####
# Epilayer # Material # Type # Thickness # Doping # Mobility #
# # # # p or n # [nm] # [cm-3] # [cm2/V-s] #
#####
# p-Contact # GaN # p # 400 # 1e20 # 10 #
# 1MQW #In0.2Ga0.8N # - # 10 # - # 150 #
# n-Contact # GaN # n # 4000 # 1e18 # 100 #
#####
#
# one Dimensional Structure
# surface S = 10000 µm2
mesh width=10000
#
x.meshloc=0.0 spac=0.5
x.meshloc=1 spac=0.5
#
y.meshloc=0.0 spac=0.05
y.meshloc=0.1 spac=0.05
y.meshloc=0.4 spac=0.05
y.meshloc=0.41 spac=0.005
y.meshloc=4.00 spac=0.10
#
region number=1 y.max=0.4 material=GaN
#
# 1 QW
#
region number=2 y.min=0.4 y.max=0.41 material=InGaNx.comp=0.15 name=well led qwell
region number=3y.min=0.41y.max=4.000 material=GaN
#
electrode name=anode top
electrode name=cathode bottom
#
doping region=1 uniform p.typeconc=1e20
# doping 2 intrinsic
doping region=3 uniform n.typeconc=1e18
#
models polarization calc.strainpolar.scale=0.10

material material=GaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 \
augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
material material=InGaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 \
augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
material material=InGaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 \
augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
#
material well.gamma0=10e-3
#
materialedb=0.080 eab=0.101
#
modelsk.pfermi incomplete consrh auger optr print
models name=well k.pchuang spontaneous lorentz
#
mobility material=GaN mun0=100 mup0=10
mobility material=InGaN mun0=150 mup0=20
#
outputcon.bandval.bandband.param charge polar.chargee.mobilityh.mobility \
u.srhu.radiativeu.augerpermi

```

```
#
solveinit
#
methodclimit=1e-4 maxtrap=10
#block nblockit=50
#
solveprev
#
saveoutf=LED01_1.str
#
probe name="Radiative"      integrate radiativename=well
probe name="Recombination" integrate recombination
#
log outf=LED01.log
solvevstep=0.1 vfinal=2.5 name=anode
saveoutf=LED01_2p5.str
save spectrum=LED01_2p5.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=3.0 name=anode
saveoutf=LED01_3p0.str
save spectrum=LED01_3p0.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=3.5 name=anode
saveoutf=LED01_3p5.str
save spectrum=LED01_3p5.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=4.0 name=anode
saveoutf=LED01_4p0.str
save spectrum=LED01_4p0.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=5.0 name=anode
saveoutf=LED01_5p0.str

solvevstep=0.1 vfinal=6.0 name=anode
saveoutf=LED01_6p0.str
#
# V-I Curve
tonyplotLED01.log -set LED01_0.set
# I-L Curve
tonyplotLED01.log -set LED01_1.set
# EL Spectrum
tonyplotLED01_3p5.spc -set LED01_2.set

# Extract the Electron And hole Conc.
extractinitinfile="LED01_3p5.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED01_3p5_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED01_3p5_Hole.dat"

extractinitinfile="LED01_4p0.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED01_4p0_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED01_4p0_Hole.dat"

extractinitinfile="LED01_5p0.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED01_5p0_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED01_5p0_Hole.dat"

tonyplot -overlay LED01_3p5_Electron.dat LED01_3p5_Hole.dat -set LED01_3.set
tonyplot -overlay LED01_4p0_Electron.dat LED01_4p0_Hole.dat -set LED01_4.set
```

```
tonyplot -overlay LED01_5p0_Electron.dat LED01_5p0_Hole.dat -set LED01_5.set
```

## LED MQW2

```
# BismiAllahiErrahmaniErrahim
go atlas

# InGaN LED02Opto Device Simulation (2022)
#
# Parameter used for this blue MQW LED
#####
# Epilayer # Material # Type # Thickness # Doping # Mobility #
# # # p or n # [nm] # [cm-3] # [cm2/V-s] #
#####
# p-Contact # GaN # p # 400 # 1e20 # 10 #
# 2MQW #In0.2Ga0.8N # - # 10 # - # 150 #
# 1Barrier # GaN # - # 20 # - # 100 #
# n-Contact # GaN # n # 4000 # 1e18 # 100 #
#####
#
# one Dimensional Structure
# surface S = 10000 μm2
mesh width=10000
#
x.meshloc=0.0 spac=0.5
x.meshloc=1 spac=0.5
#
y.meshloc=0.0 spac=0.05
y.meshloc=0.1 spac=0.05
y.meshloc=0.4 spac=0.05
y.meshloc=0.41 spac=0.005
y.meshloc=0.43 spac=0.01
y.meshloc=0.44 spac=0.001
y.meshloc=4.000 spac=0.10
#
region number=1 y.max=0.4 material=GaN
#
# 2 MQW
#
region number=2 y.min=0.4 y.max=0.41 material=InGaNx.comp=0.15 name=well led qwell
region number=3 y.min=0.41 y.max=0.43 material=GaN
region number=4 y.min=0.43 y.max=0.44 material=InGaNx.comp=0.15 name=well led qwell
region number=5y.min=0.44y.max=4.000 material=GaN
#
electrode name=anode top
electrode name=cathode bottom
#
doping region=1 uniform p.typeconc=1e20
# doping 2~4 intrinsic
doping region=5 uniform n.typeconc=2e18
#
models polarization calc.strainpolar.scale=0.10

material material=GaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 \
augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
material material=InGaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 \
augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
material material=InGaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 \
augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
#
material well.gamma0=10e-3
#
materialedb=0.080 eab=0.101
#
modelsk.pfermi incomplete consrh auger optr print
```

```
models name=well k.pchuang spontaneous lorentz
#
mobility material=GaN mun0=100 mup0=10
mobility material=InGaN mun0=150 mup0=20
#
outputcon.bandval.bandband.param charge polar.chargee.mobilityh.mobility \
u.srhu.radiativeu.augerpermi
#
solveinit
#
methodclimit=1e-4 maxtrap=10
#block nblockit=50
#
solveprev
#
saveoutf=LED02_1.str
#
probe name="Radiative"      integrate radiativename=well
probe name="Recombination" integrate recombination
#
log outf=LED02.log
solvevstep=0.1 vfinal=2.5 name=anode
saveoutf=LED02_2p5.str
save spectrum=LED02_2p5.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=3.0 name=anode
saveoutf=LED02_3p0.str
save spectrum=LED02_3p0.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=3.5 name=anode
saveoutf=LED02_3p5.str
save spectrum=LED02_3p5.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=4.0 name=anode
saveoutf=LED02_4p0.str
save spectrum=LED02_4p0.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=5.0 name=anode
saveoutf=LED02_5p0.str

solvevstep=0.1 vfinal=6.0 name=anode
saveoutf=LED02_6p0.str
#
# V-I Curve
tonyplotLED02.log -set LED02_0.set
# I-L Curve
tonyplotLED02.log -set LED02_1.set
# EL Spectrum
tonyplotLED02_3p5.spc -set LED02_2.set

# Extract the Electron And hole Conc.
extractinitinfile="LED02_3p5.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED02_3p5_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED02_3p5_Hole.dat"

extractinitinfile="LED02_4p0.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED02_4p0_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED02_4p0_Hole.dat"

extractinitinfile="LED02_5p0.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED02_5p0_Electron.dat"
```

```

extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED02_5p0_Hole.dat"

tonyplot -overlay LED02_3p5_Electron.dat LED02_3p5_Hole.dat -set LED02_3.set
tonyplot -overlay LED02_4p0_Electron.dat LED02_4p0_Hole.dat -set LED02_4.set
tonyplot -overlay LED02_5p0_Electron.dat LED02_5p0_Hole.dat -set LED02_5.set

```

## LED MQW4

```

# BismiAllahiErrahmaniErrahim
go atlas

# InGaN LED Opto Device Simulation (2021)
#
# Parameter used for this Blue4MQW LED
#####
# Epilayer # Material # Type # Thickness # Doping # Mobility #
# # # p or n # [nm] # [cm-3] # [cm2/V-s] #
#####
# p-Contact # GaN # p # 400 # 1e20 # 10 #
# 4MQW #In0.2Ga0.8N # - # 10 # - # 150 #
# 3Barrier # GaN # - # 20 # - # 100 #
# n-Contact # GaN # n # 4000 # 1e18 # 100 #
#####
#
# one Dimensional Structure
# surface S = 10000 µm2
mesh width=10000
#
x.meshloc=0.0 spac=0.5
x.meshloc=1 spac=0.5
#
y.meshloc=0.0 spac=0.05
y.meshloc=0.1 spac=0.05
y.meshloc=0.4 spac=0.05
y.meshloc=0.41 spac=0.005
y.meshloc=0.43 spac=0.01
y.meshloc=0.44 spac=0.001
y.meshloc=0.46 spac=0.001
y.meshloc=0.47 spac=0.005
y.meshloc=0.49 spac=0.005
y.meshloc=0.50 spac=0.10
y.meshloc=4.000 spac=0.10
#
region number=1 y.max=0.4 material=GaN
#
# 4 MQW
#
region number=2 y.min=0.4 y.max=0.410 material=InGaNx.comp=0.15 name=well led qwell
region number=3 y.min=0.410 y.max=0.430 material=GaN
region number=4 y.min=0.430 y.max=0.440 material=InGaNx.comp=0.15 name=well led
qwell
region number=5 y.min=0.440 y.max=0.460 material=GaN
region number=6 y.min=0.460 y.max=0.470 material=InGaNx.comp=0.15 name=well led
qwell
region number=7 y.min=0.470 y.max=0.490 material=GaN
region number=8 y.min=0.490 y.max=0.500 material=InGaNx.comp=0.15 name=well led
qwell
region number=9 y.min=0.500 y.max=4.000 material=GaN
#

```

```
electrode name=anode top
electrode name=cathode bottom
#
doping region=1 uniform p.typeconc=1e20
# doping 2~8 intrinsic
doping region=9 uniform n.typeconc=1e18
#
models polarization calc.strainpolar.scale=0.10

material material=GaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 \
augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
material material=InGaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 \
augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
material material=InGaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 \
augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
#
material well.gamma0=10e-3
#
materialedb=0.080 eab=0.101
#
modelsk.pfermi incomplete consrh auger optr print
models name=well k.pchuang spontaneous lorentz
#
mobility material=GaN mun0=100 mup0=10
mobility material=InGaN mun0=150 mup0=20
#
outputcon.bandval.bandband.param charge polar.chargee.mobilityh.mobility \
u.srhu.radiativeu.augerpermi
#
solveinit
#
methodclimit=1e-4 maxtrap=10
#block nblockit=50
#
solveprev
#
saveoutf=LED04_1.str
#
probe name="Radiative" integrate radiativename=well
probe name="Recombination" integrate recombination
#
log outf=LED04.log
solvevstep=0.1 vfinal=2.5 name=anode
saveoutf=LED04_2p5.str
save spectrum=LED04_2p5.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=3.0 name=anode
saveoutf=LED04_3p0.str
save spectrum=LED04_3p0.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=3.5 name=anode
saveoutf=LED04_3p5.str
save spectrum=LED04_3p5.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=4.0 name=anode
saveoutf=LED04_4p0.str
save spectrum=LED04_4p0.spc lmin=0.38lmax=0.46nsamp=100

solvevstep=0.1 vfinal=5.0 name=anode
saveoutf=LED04_5p0.str

solvevstep=0.1 vfinal=6.0 name=anode
saveoutf=LED04_6p0.str
#
# V-I Curve
tonyplotLED04.log -set LED04_0.set
```

```
# I-L Curve
tonyplotLED04.log -set LED04_1.set
# EL Spectrum
tonyplotLED04_3p5.spc -set LED04_2.set

# Extract the Electron And hole Conc.
extractinitinfile="LED04_3p5.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED04_3p5_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED04_3p5_Hole.dat"

extractinitinfile="LED04_4p0.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED04_4p0_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED04_4p0_Hole.dat"

extractinitinfile="LED04_5p0.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED04_5p0_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All" \
x.val=0.5) outfile="LED04_5p0_Hole.dat"

tonyplot -overlay LED04_3p5_Electron.dat LED04_3p5_Hole.dat -set LED04_3.set
tonyplot -overlay LED04_4p0_Electron.dat LED04_4p0_Hole.dat -set LED04_4.set
tonyplot -overlay LED04_5p0_Electron.dat LED04_5p0_Hole.dat -set LED04_5.s
```

## Résumé

Les diodes électroluminescentes (LED) à base de GaN/InGaN émettant dans le bleu ont vu une avance importante ces dernières années. Dans ce mémoire, nous présentons une étude simulatrice par le logiciel Atlas SILVACO de trois structures différentes de diodes électroluminescentes LED à base de multi-puits quantiques (MQW) InGaN / GaN, la première à un seul puits quantique (SQW), alors que la deuxième à deux puits quantique (2MQW) et la troisième à quatre puits quantique (4MQW). La région active est formée par des puits quantiques InGaN de 10nm et barrières quantiques GaN de 20nm. Les principales caractéristiques électriques et optiques  $I(V)$ ,  $P_{op}(V)$ ,  $P_{op}(I)$  des LEDs simulées sont présentées et discutées ainsi que le spectre d'émission, la concentration des porteurs de charge au niveau de la zone active et l'efficacité quantique externe. Une comparaison entre les caractéristiques des trois diodes est présentée au cours de ce travail. Le travail a besoin d'approfondissement et d'étudier l'effet de quelques paramètres technologiques tels que l'épaisseur de la zone active ainsi que le nombre de puits quantiques avec l'effet du dopage et le pourcentage de l'indium dans l'alliage InGaN sur la performance des LEDs.

**Mots clés:** LED bleue, Simulation, Atlas-Silvaco, multi-puits quantiques, InGaN, GaN.

## Summary

Blue-emitting GaN/InGaN based light-emitting diodes (LEDs) have seen significant advances in recent years. In this thesis, we present a simulation study by Atlas SIVACO software of three different structures of LED light-emitting diodes based on InGaN/GaN multi-quantum wells (MQW), the first with a single quantum well (SQW), while the second to two quantum wells (2MQW) and the third to four quantum wells (4MQW). The active region is formed by 10nm InGaN quantum wells and 20nm GaN quantum barriers. The main electrical and optical characteristics  $I(V)$ ,  $P_{op}(V)$ ,  $P_{op}(I)$  of the simulated LEDs are presented and discussed as well as the emission spectrum, the concentration of charge carriers at the level of the active zone and the external quantum efficiency. A comparison between the characteristics of the three diodes is presented during this work. The work needs deepening and studying the effect of some technological parameters such as the thickness of the active area as well as the number of quantum wells with the effect of doping and the percentage of indium in the InGaN alloy on the performance of LEDs.

**Keywords:** Blue LED, Simulation, Atlas-Silvaco, multi-quantum wells, InGaN, GaN.



