

الجمهورية  
الجزائرية الديمقراطية  
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

جامعة تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Systèmes des Télécommunications

**Par** : GHOUMARI Rania

**Sujet**

**Etude et simulation de la diode électroluminescente (DEL) à base de GaN**

Soutenu publiquement, le 30/06/2022 , devant le jury composé de :

M. KARIM FethAllah

Mme. BENLALDJ Lamia

Mlle. DJELTI Hamida

Professeur

MAA

MCA

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examinatrice

Encadreur

Année universitaire : 2021/2022

# Remerciement

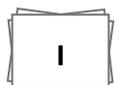
Avant tout je remercie "**ALLAH**" le tout puissant, de m'avoir accordé le courage, la patience et la volonté pour mener à terminer mes études et réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer ma vive et sincère gratitude et mes remerciements à **Mlle DJELTI Hamida**, Maître de Conférences au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, pour ses remarques objectives et pour la confiance qu'elle m'a accordée pour mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à **Mr Karim Fethallah**, Professeur au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail en acceptant de le juger et de présider le jury.

Je suis très honoré de la présence dans ce jury de mémoire de **Mme Benlaldj Lamia**, Maître Assistant au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, qu'elle trouve ici le témoignage de mes sincères remerciements pour avoir accepté de juger et d'évaluer ce travail de mémoire.

Toute ma gratitude pour ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



# *Dédicace*

*Je rends grâce à **DIEU** de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience pour venir à terme  
de mes études.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents,*

*Pour leur soutien et tous les efforts qu'ils m'ont apportés le long de mon parcours*

*A mon mari **Choukri** pour son soutien et ses encouragements*

*A ma sœur unique : **Ghofran***

*A mes frères : **Housseem** et **Salah eddin***

*A Tous mes proches, mes amies et camarades de promotion **ST***

*A tous ceux que j'aime*



# *Résumé*

Les sources optiques telles que les diodes électroluminescentes (LEDs) constituent de bonnes solutions pour créer des luminaires plus robustes, ayant un meilleur rendement de conversion et plus respectueuses de l'environnement.

Ce projet de fin d'études est scindé en deux parties, la première partie concerne l'étude théorique et la modélisation électro-optique de la diode électroluminescente, et la seconde partie est destinée à la conception et à la simulation d'une diode électroluminescente à base des matériaux AlGaIn/GaN. Il s'agit de la simulation des caractéristiques électriques et optiques de la diode électroluminescente à quatre et à cinq puits quantiques. Donc, un modèle optoélectronique est basé sur la méthode des éléments finis est élaboré pour cette diode. Ce modèle est exploité pour examiner la distribution des porteurs de charges libres dans de la région active, le taux de recombinaison radiative et la concentration en électrons et trous, les caractéristiques courant-tension et puissance-courant, le spectre d'émission de la DEL sous polarisation directe ainsi que l'impact de la température et certains paramètres technologiques sur les performances de la diode électroluminescente à cinq puits quantiques d'AlGaIn/GaN.

**Mots clés:** Diodes électroluminescentes, puits quantiques, émission spontanée, AlGaIn/GaN, Silvaco.

# *Abstract*

Optical sources such as Light Emitting Diodes (L.E.Ds) are good solutions to create more robust luminaires, having a better conversion efficiency and more environmentally respectful.

This end-of-study project is divided into two parts, the first part concerns the theoretical study and the electro-optical modeling of the Light Emitting Diode, and the second part is intended for the design and the simulation of a light-emitting diode based on materials ALGa/GaN.

This is the simulation of the electrical and optical characteristics of the light emitting diode with four to five quantum wells.

Therefore, an optoelectronics model based on the finite element method is developed for this diode.

This model is exploited to examine the distribution of free charge carriers in the active region, and the rate of radiative recombination and the concentration of electrons and holes.

The current-voltage and power-current characteristics, the emission spectrum of the LED under direct polarization as well as the impact of the temperature, and certain technological parameters on the performance of the light-emitting diode with five quantum wells of ALGaN/GaN.

Key words: Light Emitting Diodes, quantum wells, spontaneous emission, ALGaN/GaN, Silvaco.

# ملخص

تعتبر المصادر الضوئية مثل الصمامات الثنائية الباعثة للضوء (L.E.Ds) حولا جيدة لإنشاء وحدات انارة أكثر قوة, وللحصول على كفاءة تحويل أفضل وأكثر احتراماً للبيئة.

ينقسم مشروع نهاية الدراسة هذا إلى قسمين: يتعلق الجزء الأول بالدراسة النظرية والنمذجة الكهروضوئية الصمام الباعث للضوء, أما الجزء الثاني مخصص بتصميم ومحاكاة المواد القائمة على الثنائي الباعث للضوء AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> , وهذا يتمثل في محاكاة الخصائص الكهربائية والبصرية للثنائي الباعث للضوء من اربعة إلى خمسة آبار كمومية. لذلك يعتمد النموذج الكهروضوئي على طريقة للعناصر المحدودة التي يتم تطويرها لهذا الصمام الثنائي .

تم إستغلال هذا النموذج لفحص توزيع ناقلات الشحن المجاني في المنطقة النشطة ,ومعدل إعادة التركيب الإشعاعي وتركيز الإلكترونات والثقوب .

ومن خصائص ضغط التيار والاستطاعة الكهربائية إنبعث طيف الصمام الثنائي الباعث للضوء تحت الإستقطاب المباشر بالإضافة إلى تأثير درجة الحرارة وبعض المعلمات التكنولوجية على أداء الصمام الثنائي الباعث للضوء ذو خمسة آبار كمومية . AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> .

الكلمات المفتاحية : الثنائيات الباعث للضوء، آبار كمومية ، إنبعث لحظية ، AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>

# Sommaire

Remerciements .....	I
Dédicace .....	II
Résumé .....	II
Abstreet .....	IV
المخلص .....	V
Liste des figures .....	IX
Liste des tableaux .....	XII
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Etat de l'art et contexte général sur la diode électroluminescente

I.1 Introduction .....	3
I.2 Bref historique .....	3
I.3 Principaux avantages des diodes électroluminescentes et domaines d'application.....	5
I.3.1 Avantages des diodes électroluminescentes .....	5
I.3.2 Domaine spectral d'émission des diodes électroluminescentes.....	6
I.4 Rappels sur le fonctionnement de la diode électroluminescente .....	7
I.4.1 Mécanismes de recombinaison des porteurs.....	8
I.4.1.1 Recombinaison radiative.....	9
I.4.1.2 Recombinaison non radiative.....	9
I.4.2 Matériaux semi-conducteurs pour les LEDs.....	10
I.5 Description des structures LED .....	15
I.5.1 LED à puits quantiques .....	15
I.5.2 LED à puits quantiques et couche de blocage électronique.....	17
I.6 Classification des diodes électroluminescentes .....	18
I.6.1 Classification selon la puissance.....	18
I.6.2 Classification selon le spectre d'émission .....	20

I.7 Caractéristiques des diodes électroluminescentes.....	20
I.7.1 Caractéristiques physiques.....	20
I.7.2 Caractéristiques électriques .....	21
I.8 Conclusion .....	22
Bibliographie du chapitre I.....	23

## **Chapitre II : Modélisation physico-optique de la diode électroluminescente**

II.1 Introduction .....	25
II.2 Modèle de recombinaison et d'ionisation par impact .....	25
II.2.1 Modèle de Shockley de diode/LED à basse tension (ou à faible injection) .....	26
II.2.2 Modèle de diode/LED à haute tension (ou à forte injection) .....	28
II.2.3 Modèle de recombinaison radiative .....	31
II.2.4 Modèle de recombinaison Auger .....	32
II.2.5 Modèle d'ionisation par impact électronique .....	34
II.2.6 Modèle de recombinaison à la surface .....	34
II.2.7 Modèle de transition par effet tunnel .....	35
II.3 Méthodes et modèles disponibles sous Silvaco/Atlas .....	36
II.3.1 Les modèles physiques utilisés pour les simulations .....	37
II.4 Modèle numérique physico-optique .....	38
II.4.1 Equation de continuité de courant .....	38
II.4.2 Equation de Poisson .....	39
II.4.3 Le cas particulier de l'étalement du courant ("spreading") .....	39
II.5 Méthode des éléments finis .....	40
II.6 Conclusion .....	41
Bibliographie du chapitre II .....	42

## **Chapitre III : Analyse électro-optique de la diode électroluminescente**

III.1 Introduction .....	44
III.2 Présentation de Silvaco .....	44

III.2.1 Le module Atlas .....	44
III.2.2 Le module Athena .....	46
III.2.3 Le module DevEdit .....	46
III.2.4 Tony plot .....	47
III.3 Topologies des LEDs utilisées .....	48
III.3.1 Diode électroluminescente à 4 puits quantique d'AlGaN .....	48
III.3.2 Diode électroluminescente à cinq puits quantique d'AlGaN .....	50
III.4 Résultats et discussions .....	51
III.4.1 Diagramme de bande d'énergie.....	51
III.4.2 Caractéristiques courant-tension (I-V).....	51
III.4.3 Caractéristiques puissance-courant (P-I).....	52
III.4.4 Caractéristiques puissance-tension (P-V).....	54
III.4.5 Densité spectrale de puissance .....	55
III.4.6 Densité de flux spectrale .....	56
III.4.7 Emission spontanée .....	57
III.4.8 Gain (TE) .....	58
III.4.9 Rendement quantique externe .....	59
III.4.10 Effet de la fraction molaire x de l'AlGaN.....	60
III.4.11 Effet de l'épaisseur de la couche active .....	63
III.4.12 Effet de la température sur la densité spectrale de puissance .....	65
III.4.13 Effet de dopage de la couche d'AlGaN.....	69
III.5 Conclusion.....	71
Bibliographie du chapitre III .....	72
Conclusion finale .....	73

# Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Développement des matériaux LED et évolution de l'efficacité des LED (adapté et mis à jour) .....	5
<b>Figure I.2 :</b> Évolution de l'efficacité et du coût des LEDs au fil des années .....	5
<b>Figure I.3 :</b> spectre d'émission d'une diode électroluminescente .....	7
<b>Figure I.4 :</b> spectre d'émission de LED pour différentes énergies de gap .....	7
<b>Figure I.5 :</b> Principe de fonctionnement d'une LED.....	8
<b>Figure I.6:</b> Recombinaison Direct (radiative). .....	9
<b>Figure I.7:</b> Recombinaison Indirect (non-radiative). .....	10
<b>Figure I.8 :</b> Structure de base d'une diode Électroluminescente " DEL .....	15
<b>Figure 1.9 :</b> Exemple de l'intensité optique d'une LED en (In, Ga) As en fonction de l'intensité du courant électrique et du nombre de puits quantiques .....	16
<b>Figure 1.10 :</b> Représentation schématique en coupe transverse de l'empilement d'une LED pourvue de deux puits quantiques et d'un EBL. ....	17
<b>Figure I.11 :</b> Schéma d'une LED faible puissance .....	18
<b>Figure I.12 :</b> Coupe schématique d'une LED de forte puissance vue en coupe.....	19
<b>Figure I.13 :</b> Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct et indirect .....	21
<b>Figure I.14 :</b> Caractéristique courant-tension d'une DEL.....	22
<hr/>	
<b>Figure II.1 :</b> Phénomène d'ionisation par impact (ei- : électron à l'état initial, ef-: électron à l'état final, es- : électron secondaire créé, es+ : trou secondaire créé).....	26
<b>Figure II-2 :</b> Le diagramme de bande d'énergie d'une jonction <i>p-n</i> non polarisée. ....	27
<b>Figure II.3 :</b> Recombinaison par phonons.....	33
<b>Figure II.4 :</b> Recombinaisons Auger dans une jonction <i>p-n</i> polarisée.....	34
<b>Figure II.5:</b> Processus de recombinaison en surface.....	35
<b>Figure II.6:</b> Représentations schématiques du mécanisme de transition par l'effet tunnel a) assistée par des niveaux de piège et b) directe. ....	36
<b>Figure II.7 :</b> Illustration de l'étalement des lignes de courant sous un contact électrique (a) avec (b) sans une couche supplémentaire permettant de mieux distribuer le courant. ....	40
<b>Figure II.8 :</b> Exemple de maillage en 2D pour une structure multicouche. ....	41
<hr/>	

<b>Figure III.1 :</b> Entrées et sorties d'ATLAS. ....	45
<b>Figure III.2:</b> Environnement Deckbuild. ....	46
<b>Figure III.3:</b> Fenêtre de Tonyplot .....	48
<b>Figure III.4 :</b> Topologie de la structure LED simulée à base d'AlGaN /GaN à 4 puits quantiques.....	48
<b>Figure III.5 :</b> Coupe schématique de la structure LED AlGaN/GaN à 4 puits quantiques. ....	49
<b>Figure III.6 :</b> Structure maillée du LED AlGaN/GaN à 4 puits quantiques.....	50
<b>Figure III.7 :</b> Topologie de la structure LED d'AlGaN/GaN à 5 puits quantiques. ....	50
<b>Figure III.8 :</b> Diagramme de bandes d'énergie pour LED : (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques.....	51
<b>Figure III.9:</b> Courant en fonction de la tension pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques.....	52
<b>Figure III.10:</b> Puissance lumineuse totale en fonction de courant pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques. ....	53
<b>Figure III.11:</b> Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques .....	54
<b>Figure III.12:</b> La densité spectrale de puissance en fonction de l'énergie pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques .....	55
<b>Figure III.12 :</b> La densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde pour LED, (c) à 4 puits quantiques, (d) à cinq puits quantiques .....	56
<b>Figure III.13:</b> La densité de flux spectrale en fonction de l'énergie pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques .....	57
<b>Figure III.14 (b) :</b> Emission spontanée en fonction de l'énergie pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques .....	58
<b>Figure III.15:</b> Le gain (TE) en fonction de l'énergie pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques.....	59
<b>Figure III.16:</b> Rendement quantique externe pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques.....	60
<b>Figure III.17:</b> Courant en fonction de la tension pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques.....	61
<b>Figure III.18:</b> Puissance lumineuse totale en fonction de courant pour LED, (c) à 4 puits quantiques, (d) à cinq puits quantiques .....	61

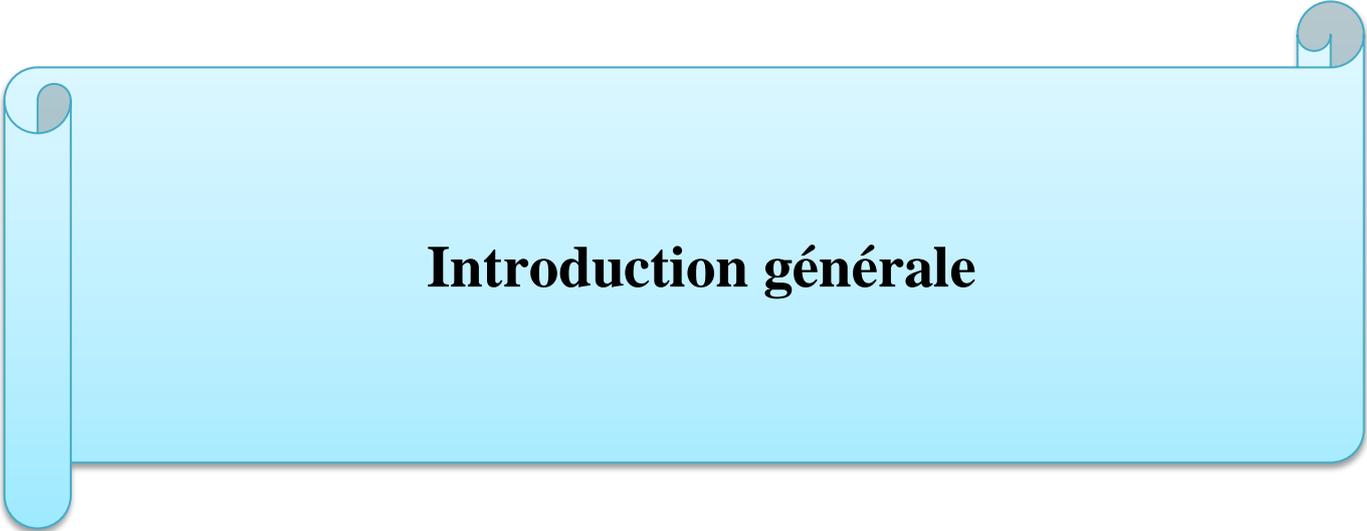
<b>Figure III.19 (f) :</b> Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED, (e) à 4 puits quantiques, (f) à cinq puits quantiques .....	62
<b>Figure III.20:</b> La densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde pour LED, (c) à 4 puits quantiques, (d) à cinq puits quantiques .....	62
<b>Figure III.21 (a) :</b> Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED à 4 puits quantiques.....	63
<b>Figure III.21 (b) :</b> Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED à 5 puits quantiques .....	63
<b>Figure III.22 (a) :</b> Puissance lumineuse totale en fonction de courant pour LED à 4 puits quantiques.....	64
<b>Figure III.22 (b) :</b> Puissance lumineuse totale en fonction de courant pour LED à 5 puits quantiques.....	65
<b>Figure III.23:</b> Courant en fonction de la tension pour LED à 5puits quantiques. ....	66
<b>Figure III.24:</b> Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED à 5 puits quantiques.....	67
<b>Figure III.25:</b> La densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde pour LED à 5 puits quantiques. ....	68
<b>Figure III.26:</b> Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques .....	70
<b>Figure III.27:</b> La densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques .....	71

# Liste du tableau

<b>Tableau I.1</b> : Extrait de la classification périodique des éléments. ....	11
<b>Tableau I.2</b> : Paramètres des principaux composés binaires (III-V). ....	12
<b>Tableau 1.3</b> : Les couleurs de la lumière émise (LED) .....	14
<b>Tableau I.4</b> : Les différentes familles des diodes électroluminescentes. ....	19

---

<b>Tableau II.1</b> : Modèles utilisés dans les simulations. ....	38
---	----



## **Introduction générale**

# Introduction générale

L'optoélectronique est l'étude des composants qui émettent, modulent et détectent le signal lumineux. Il s'agit d'une interaction électronique et optique de la matière, essentiellement dans les matériaux semi-conducteurs. Aujourd'hui elle a des portées importantes dans divers domaines, en particulier en informatique, en électronique médicale et en réseaux de télécommunications optiques.

Les Diodes électroluminescentes (DEL) qui constituent les éléments les plus simples et phares dans les systèmes optiques. Elles couvrent tous le spectre visible et peuvent être modulées par le courant jusqu'à 100 MHz. Les DEL produisent un rayonnement monochromatique incohérent de faible puissance.

Depuis plusieurs années, il existe des diodes électroluminescentes à base de nitrures émettant dans l'ultraviolet. Pour aller plus loin dans l'ultraviolet, il est nécessaire d'utiliser des puits quantiques de nitrure de gallium (GaN) ou nitrure d'aluminium de gallium (AlGaN).

Dans ce mémoire, nous avons simulé les caractéristiques électrique et optique de la diode électroluminescente à base d'AlGaN à 4 et à 5 puits quantiques, cette simulation devra conduire à la conception de structure performante.

Après avoir rappelé les principes généraux qui gouvernent l'électroluminescence dans le premier chapitre: principe de fonctionnement, les matériaux semi-conducteurs utilisés dans la conception d'une telle diode, leurs caractéristiques, les mécanismes de recombinaison des porteurs radiative et non radiative, nous présentons, dans le second chapitre, les modèles, les mécanismes physiques et les modèles numériques électro-optique régissant le fonctionnement physique de la diode électroluminescente comme le modèle de Shockley à faible et à fort injection, modèle d'Auger la recombinaison à la surface et la transition par effet tunnel puis les modèle numérique physico-optique (équations de continuité de courant, équation de Poisson, équation d'Helmholtz)

Le troisième chapitre présente la majeure partie des résultats obtenus pendant ce mémoire. Il concerne le fonctionnement de diodes à quatre et à cinq puits quantiques d'AlGaN, il analyse les caractéristiques électrique et optique (caractéristique courant-tension, puissance-tension et puissance-courant), l'émission spontanée, l'effet de la température et la fraction molaire de AlGaN et d'autre paramètre technologiques pour prédire les performances de la diode

électroluminescente à quatre et à cinq puits quantiques en utilisant le module Atlas de Silvaco.

Ce mémoire se clôt finalement par une conclusion générale et des perspectives.

## **Chapitre I**

**Etat de l'art et contexte général sur la diode électroluminescente**

## I.1 Introduction

Aujourd'hui, la diode électroluminescente est de plus en plus utilisée dans différents domaines tels que les télécommandes pour transmettre des données, les microscopes électroniques, l'éclairage, les écrans de téléviseurs, les écrans d'ordinateurs ou la décoration.

Dans ce chapitre nous allons présenter cette composante optoélectronique qui réalise directement l'émission de photons par recombinaison des porteurs dans une jonction polarisée en direct. En effet, nous allons décrire la diode électroluminescente en termes de principe de fonctionnement, les matériaux semi-conducteurs utilisés dans la conception d'une telle diode, les différentes configurations et topologies des diodes électroluminescentes. Les avantages et les inconvénients de cette diode seront rappelés dans le paragraphe I.3.

## I.2 Bref historique

Une diode électroluminescente abrégé sous les sigles DEL ou LED (pour Light Emitting Diode), est un composant optoélectronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens (le sens passant, comme une diode classique, l'inverse étant le sens bloquant) de plus elle produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique incohérent à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse. Leur robustesse, leur faible consommation et leur longue durée de vie leur confèrent un attrait indéniable. Du fait de leur utilisation croissante, et comme pour toutes les autres sources lumineuses, les LED ont besoin d'être caractérisées. Cette tâche n'est pas aisée puisqu'elles possèdent des répartitions spatiales et spectrales qui peuvent énormément différer d'une diode à l'autre. De plus la stabilité de l'intensité lumineuse en sortie de la diode est soumise, à la stabilité d'une part du courant qui la traverse et, d'autre part, à sa température. Pour la fabrication d'une LED il faut donc choisir un matériau à transition directe dont la largeur de bande interdite est supérieure ou égale à la fréquence de la radiation émise. Ces matériaux semi-conducteur binaires (AsGa, InP,...) ou tertiaires ( $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ ,  $\text{AsIn}_x\text{Ga}_{1-x}$ ,...) couvrent une région du spectre allant du vert (0.55  $\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain (8.5  $\mu\text{m}$ ). Les niveaux d'énergie introduits dans la bande interdite par les impuretés de dopage peuvent aussi jouer un rôle important dans le processus de recombinaison radiative d'une jonction LED [1].

Il y a cinquante ans, la première lumière visible LED était créée bien que le phénomène d'électroluminescence ait été découvert en 1907 par le chercheur Henry Round, ce fût en octobre

1962 que le physicien Nick Holonyak, employé chez General Electric, devint le père fondateur des LED en présentant un rapport de l'institut Américain de physique sur la création du spectre lumineux rouge (GaAsP) base de la technologie LED. Les découvertes d'Honolyak sur les LED ont donné lieu à l'introduction commerciale d'écrans LED dès 1964 [2]. Fabriqués à la main, ces dispositifs restent coûteux durant leur première décennie d'exploitation. Seuls les LED rouges étaient alors disponibles ; toutefois, compte tenu de leur taille, de leur intensité et de leur durée de vie, elles étaient utilisées dans le milieu des années 1970 comme indicateur de fonctionnement dans les calculatrices de poche et les montres à affichage numérique [3].

#### ❖ Du rouge au bleu et blanc

Nick Holonyak fut étudiant de John Bardeen, prix Nobel et inventeur du transistor et du laser à puits quantique, développé dans un premier temps pour l'éclairage domestique et qui a permis par la suite de créer les technologies de lecteurs de disques compact et de fibres optiques.

Depuis, le développement des applications LED a été soutenu par diverses innovations dans le domaine de l'optique et des technologies de matériaux semi-conducteurs, qui ont fait gagner en intensité lumineuse et en gamme de couleurs. L'utilisation de semi-conducteurs différents tels que le gallium aluminium arsenide phosphide (GaAlAsP), l'Indium gallium nitride (InGaN) et l'Aluminium gallium phosphide (AlGaP), associée à une couche de phosphore, ont permis le développement de diodes qui fonctionnent dans le spectre visible [4].

Au cours des 50 dernières années, la technologie LED a progressé du rouge à l'orange, puis les LED jaune et verte sont apparues dans les années 1980 pour arriver une décennie plus tard, à la maîtrise de la couleur bleu, composée grâce au nitrure de gallium. En 1991, le professeur japonais Shuji Nakamura fit une nouvelle percée dans le développement de cette technologie avec la découverte de l'éclairage LED blanc. Il dévoila la première LED haute luminosité à l'aide du gallium nitride, produisant une lumière bleu brillante, partiellement convertie en jaune à l'aide d'un revêtement de phosphore [5].

Les performances des LEDs n'ont cessé de croître. Parallèlement, leur prix n'a cessé de diminuer, comme le montre le graphique en Figure (I.2).

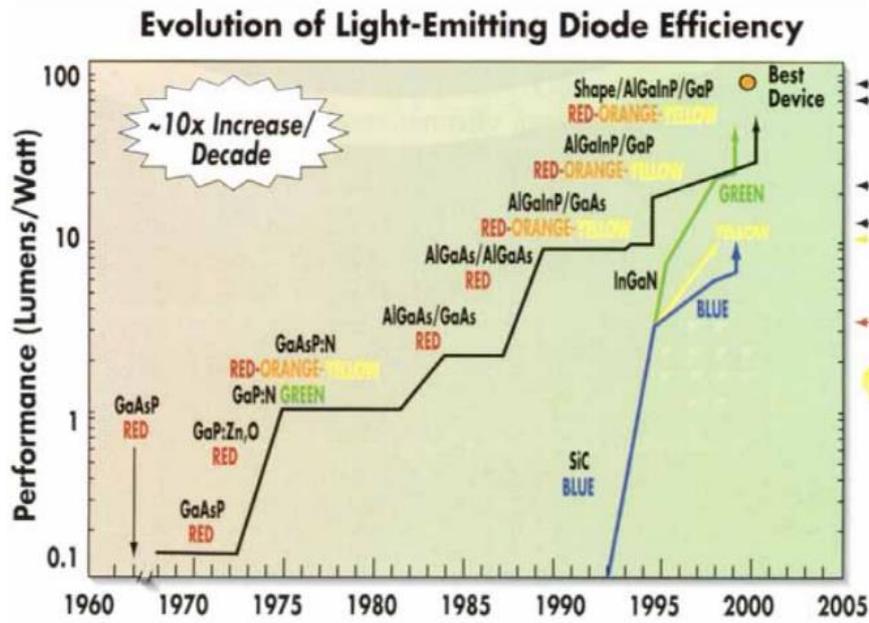


Figure I.1: Evolution de la diode électroluminescente [6].

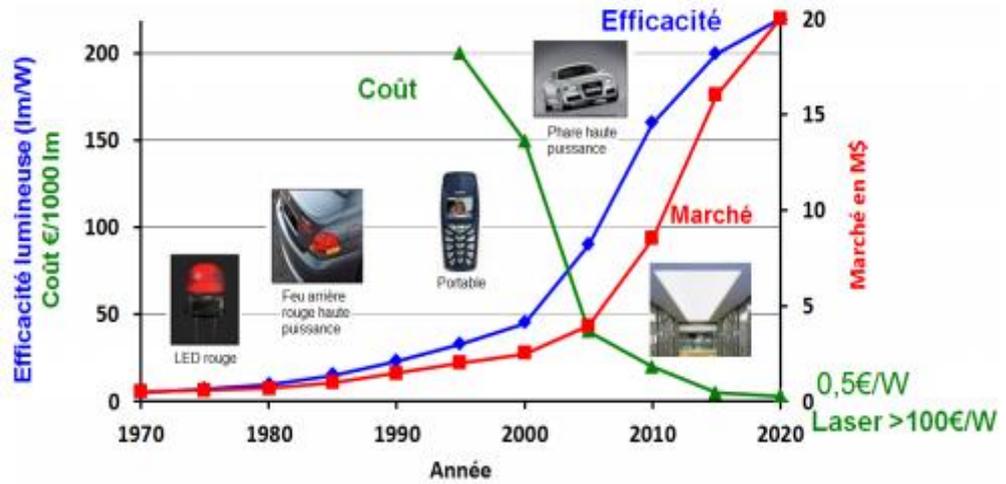


Figure I.2 : Évolution de l'efficacité et du coût des LEDs au fil des années [7].

### I.3 Principaux avantages des diodes électroluminescentes et domaines d'application :

#### I.3.1 Avantages des diodes électroluminescentes :

Les diodes électroluminescentes possèdent plusieurs avantages dont on peut citer [8]:

- Facilité de montage sur un circuit.

- 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 (quelque dizaine de milliwatts) et avec un bon rendement. En assemblant plusieurs LED, on peut réaliser des éclairages avec des formes novatrices.
- Durée de vie beaucoup plus longue qu'une lampe à incandescence classique ou même qu'une lampe fluorescente (20 000 à 50 000 heures environ contre 5000 à 15000 heures pour les lampes fluorescentes et 1000 heures pour les lampes à incandescence).
- Fonctionnement en très basse tension (TBT), plus de sécurité et de facilité de transport
- Vu leur puissance, les LED classiques 5 mm ne chauffent presque pas et ne brûlent pas les doigts. Pour les montages de puissance supérieure à 1 W, il faut prévoir une dissipation de la chaleur sans quoi la diode sera fortement endommagée ou alors détruite du fait de l'échauffement. En effet, une diode électroluminescente convertit à peu près 20 % de l'énergie électrique en lumière, le reste étant dégagé sous forme de chaleur [9].

### I.3.2 Domaine spectral d'émission des diodes électroluminescentes

La lumière émise d'une LED étant principalement due à des recombinaisons spontanées, sa caractéristique spectrale (intensité émise – longueur d'onde), illustrée sur la figure (I.3) est continue. Elle est de type sensiblement gaussien et relativement large (l'émission de la LED n'est pas rigoureusement monochromatique).

- Le maximum d'intensité correspond à des photons d'énergie:

$$h\nu_{\text{pic}} \approx E_g + KT/2 \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$h$  : la constante de Planck.

$E_g$  : l'énergie de la bande interdite

$K$  : constante de Boltzmann

$T$  : la température

- Ce qui correspond à une longueur d'onde au sommet  $\lambda_{\text{pic}}$  :

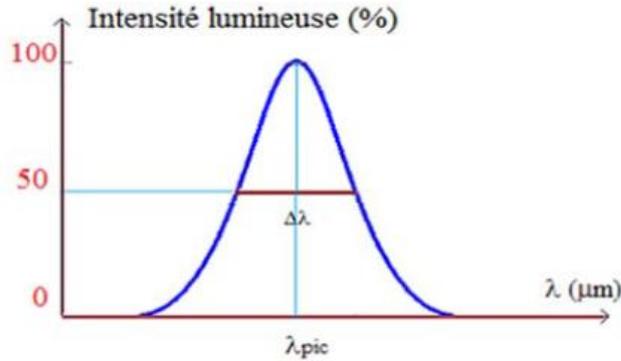
$$\lambda_{\text{pic}} (\mu\text{m}) = \frac{c}{\nu_{\text{pic}}} = 1.24 / h\nu_{\text{pic}} (\text{eV}) \quad (\text{I.2})$$

Avec:

$C$ : la célérité électrique

La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h\nu$  est de l'ordre de  $1.8 KT$ , ce qui correspond à une largeur à mi-hauteur, sur la caractéristique (Intensité-longueur d'onde), de:

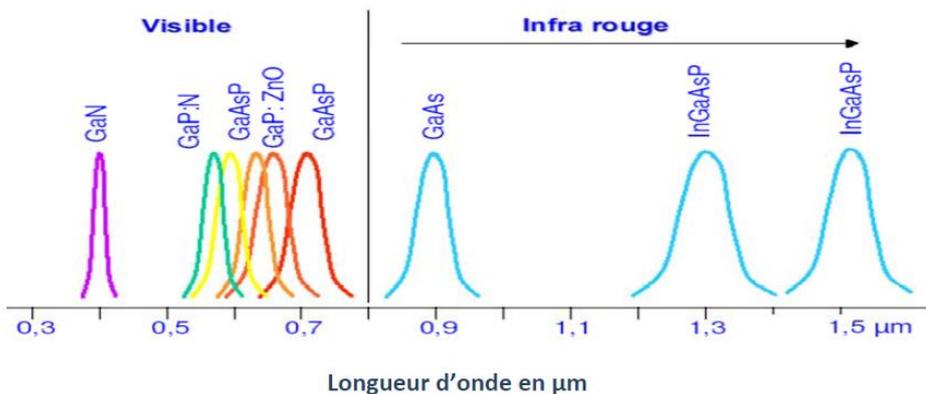
$$\Delta\lambda = 1.45\lambda_{pic}^2_{pic}KT \quad (I.3)$$



**Figure I.3 :** Spectre d'émission d'une diode électroluminescente [10].

La largeur à mi-hauteur du spectre est donc proportionnelle au carré de la longueur d'onde centrale. Comme montre la figure I.4, l'intensité lumineuse est étroite pour les radiations du domaine de l'ultraviolet et s'élargit en allant vers le proche infrarouge.

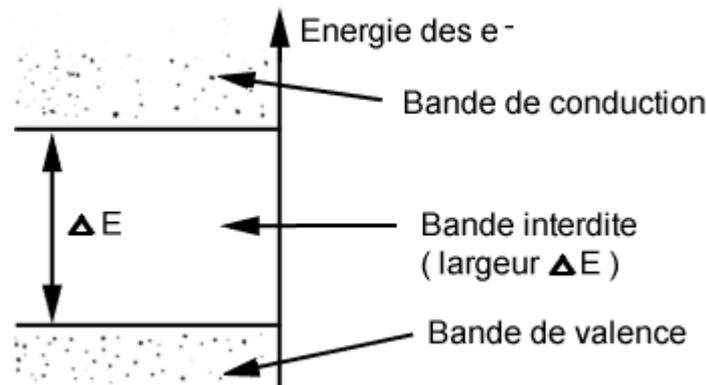
Dans la mesure où certaines transitions mettent en jeu des niveaux d'impureté, le spectre d'émission est aussi conditionné par le type de dopant utilisé et sa largeur spectrale à mi-hauteur  $\Delta\lambda$  est de l'ordre de 20 à 100 nm.



**Figure I.4 :** Spectres d'émission de LED pour différentes énergies de gap [11].

#### I.4 Rappels sur le fonctionnement de la diode électroluminescente

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. Inversement pour les trous. La structure de base d'une diode électroluminescente, est une jonction P-N réalisée à partir de semi-conducteurs dans lesquels les recombinaisons des porteurs excédentaires sont essentiellement radiatives [12].



**Figure I.5 :** Principe de fonctionnement d'une LED [13].

Les recombinaisons des porteurs excédentaires se manifestent dans trois régions différentes qui sont d'une 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 et d'un trou dans un semi-conducteur qu'il y a émission d'un photon. 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 d'un photon. Dans une transition émissive, l'énergie du photon créé est donnée par la différence des niveaux d'énergie avant ( $E_i$ ) et après ( $E_f$ ) la transition:

$$h\nu = E_i - E_f \text{ (eV)} \quad (\text{I.4})$$

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 [12].

#### I.4.1 Mécanismes de recombinaison des porteurs

Les électrons et les trous dans les semi-conducteurs se recombinent soit radiativement, c'est-à-dire accompagnés de l'émission d'un photon, ou non radiativement dans les dispositifs

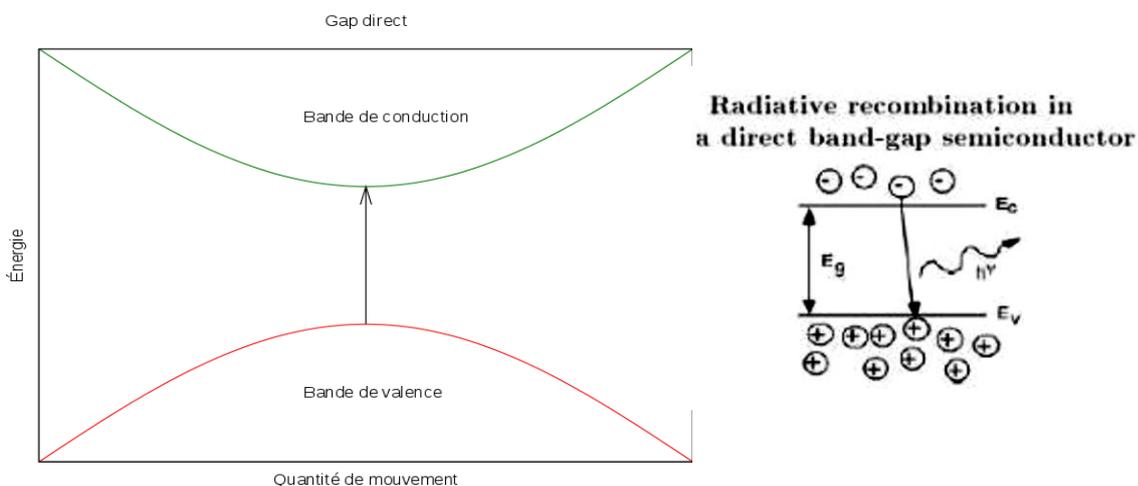
électroluminescents, le premier est clairement le processus préféré. Cependant, la recombinaison non radiative ne peut, dans des conditions pratiques, jamais être réduite à zéro. Il y a donc compétition entre radiatif et non radiatif recombinaison maximisation du processus radiatif et minimisation du non radiatif processus peut être atteinte de plusieurs façons [14].

#### I.4.1.1 Recombinaison radiative

Dans les matériaux à bande interdite directe comme l'illustre la figure (I.6), l'énergie minimale de la bande de conduction se trouve directement au-dessus du maximum d'énergie de la bande de valence dans l'énergie de l'espace de mouvement.

Dans cette matière, les électrons libres au bas de la bande de conduction peuvent se recombinaison directement avec des trous libres à la partie supérieure de la bande de valence. Ce passage de la bande de conduction à la bande de valence implique l'émission de photons (prend en charge le principe de conservation de l'énergie).

Ceci est connu comme la recombinaison directe. La recombinaison directe se produit spontanément GaAs est un matériau à bande interdite directe).

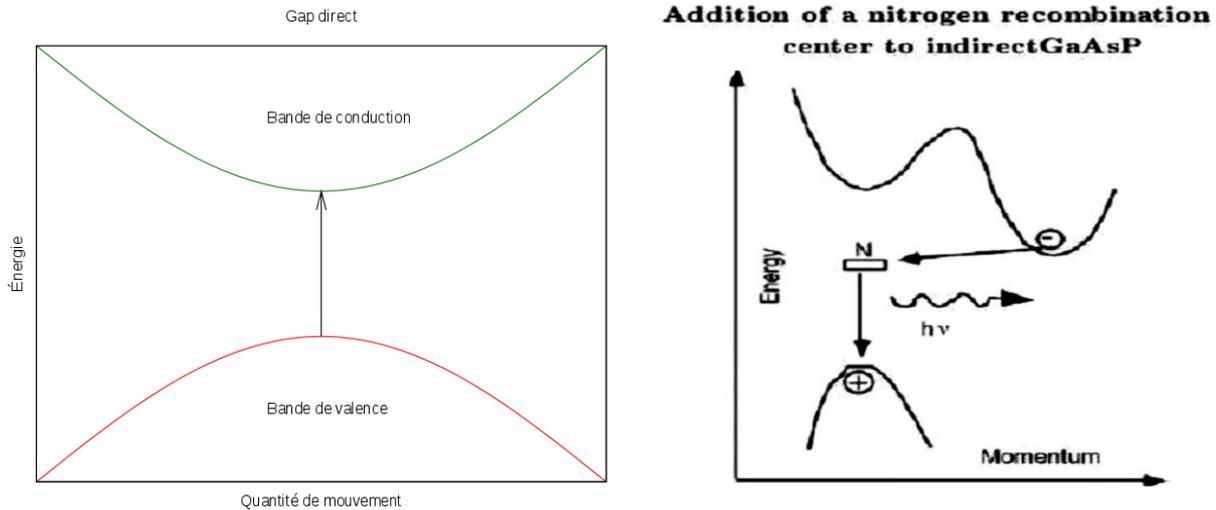


**Figure I.6:** Recombinaison directe (radiative).

#### I.4.1.2 Recombinaison non radiative

Dans les matériaux à bande interdite indirecte, l'énergie minimale dans la bande de conduction est décalée d'un vecteur  $k$  relatif à la bande de valence. La différence  $k$  vecteur représente une différence dans l'élan. En raison de cette différence de quantité de mouvement, la probabilité de recombinaison électron-trou directe est moindre.

Dans ces matériaux, dopants supplémentaires (impuretés) sont ajoutés qui forment les états donateurs très peu profondes. Ces états donateurs capturent localement les électrons libres, fournissent le décalage de l'élan nécessaire pour la recombinaison. Ces états donateurs servent de centres de recombinaison. Ceci est appelé recombinaison indirecte (non-radiative) comme le montre la figure (I.7).



**Figure I.7:** Recombinaison indirecte (non-radiative).

La longueur d'onde de la lumière émise, et par conséquent la couleur dépend de l'énergie de la bande interdite des matériaux formant la jonction p-n.

L'énergie des photons émis est approximativement égale à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur [15].

- L'équation suivante concerne la longueur d'onde et la largeur de bande d'énergie :

$$h\nu = E_g \quad (I.5)$$

$$hc/\lambda = E_g \quad (I.6)$$

$$\lambda = hc/ E_g \quad (I.7)$$

Avec :

$h$  : la constante de Planck.

$\nu$  : la fréquence,  $c$ 'est la vitesse de la lumière.

$\lambda$  : la longueur d'onde.

$E_g$  : l'énergie de la bande interdite

#### I.4.2 Matériaux semi-conducteurs pour les LEDs

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés formés à partir d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V de la classification périodique de Mendeliev.

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). Ainsi de nombreux composés binaires peuvent être réalisés.

III	IV	V
$10.81^{5}B$	$12.01^{6}C$	$14.01^{7}N$
$26.98^{13}Al$	$28.09^{14}Si$	$30.97^{15}P$
$69.73^{31}Ga$	$72.59^{32}Ge$	$74.92^{33}As$
$114.82^{49}In$	$118.69^{50}Sn$	$121.75^{51}Sb$

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

### ➤ Les composés 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 bord, 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 optiques soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thalium (*Ti*81) ou le bismuth (*Bi*83) donnent des composés à base de Galium (GaAs, GaSb) ou d'indium (InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes.

Le tableau (I.2) résume quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V:

<b>Binaires III-V</b>	<b><math>E_g</math> (eV)</b>	<b><math>m^*/m_0</math></b>	<b><math>\mu</math> (cm<sup>2</sup>/ VS)</b>	<b><math>\alpha</math> (A°)</b>
<b>BN</b>	<b>7,5</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>3,6150</b>
<b>AIP</b>	<b>2,45</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>5,4510</b>
<b>ALAS</b>	<b>2,16</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>5,6605</b>
<b>AlSb</b>	<b>1,58</b>	<b>0,12</b>	<b>200</b>	<b>6,1355</b>
<b>BP</b>	<b>2.0</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>4,5380</b>
<b>GaN</b>	<b>3,36</b>	<b>0,19</b>	<b>380</b>	<b>3,189</b>
<b>GaP</b>	<b>2,26</b>	<b>0,82</b>	<b>110</b>	<b>5,4512</b>
<b>GaAs</b>	<b>1,42</b>	<b>0,067</b>	<b>8500</b>	<b>5,6533</b>
<b>GaSb</b>	<b>0,72</b>	<b>0,042</b>	<b>5000</b>	<b>6,0959</b>
<b>InP</b>	<b>1,35</b>	<b>0,077</b>	<b>4600</b>	<b>5,8686</b>
<b>InAs</b>	<b>0,36</b>	<b>0,023</b>	<b>33000</b>	<b>6,0584</b>
<b>InSb</b>	<b>0.17</b>	<b>0,0145</b>	<b>80000</b>	<b>6,4794</b>

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

### ➤ 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  $In_{1-x}MnxP$  ou quaternaire comme  $Gx(1-x)Py(1-y)$  [12].

Les semi-conducteurs utilisés pour la fabrication des LED sont généralement des matériaux résultant de l'association de deux éléments simples comme l'arséniure de gallium (GaAs), de trois comme l'arséniure-phosphure de gallium (GaAsP) ou de quatre comme le phosphure d'aluminium-gallium-indium (AlGaInP)... La nature du matériau, la composition des alliages et le dopage déterminent la couleur de la lumière émise.

La tension de seuil présente aux bornes de la diode quand elle émet de la lumière dépend du matériau, de la température et de l'intensité du courant ; par exemple, une LED verte au phosphure de gallium présente une tension de seuil de l'ordre de 2,5 V (1,5 à 3 volts) [16].

➤ **Couleurs et matériaux**

Depuis la commercialisation, au début des années 60, des premières LED émettant des rayonnements infrarouges et visibles (dans le rouge), la gamme de LED s'est considérablement élargie. Il existe désormais de nombreux critères de distinction parmi lesquels il y a la taille, la forme, le courant d'alimentation et surtout la couleur de la lumière émise. Les LED permettent d'obtenir de la lumière colorée dans un domaine de longueur d'onde qui couvre l'intégralité du spectre visible mais également le proche infrarouge et l'ultraviolet. Le tableau (I.3) récapitule, de manière non exhaustive, quelques semi-conducteurs utilisés en fonction de la longueur d'onde d'émission désirée.

	Couleur	Longueur d'onde (nm)	Voltage (V)	Matériau semi-conducteur
	Infrarouge	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
	Rouge	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Jaune	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Vert	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN) Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP)
	Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe), Indium gallium nitride (InGaN), Silicon carbide (SiC) as substrate, Silicon (Si)
	Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
	Mauve	multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
	Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	diamond (235 nm), Boron nitride (215 nm) , Aluminium nitride (AlN) (210 nm) Aluminium gallium nitride (AlGaN) (AlGaInN) — (to 210 nm)
	Blanc	Broad Spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

Tableau 1.3 : Les couleurs de la lumière émise (LED) [17].

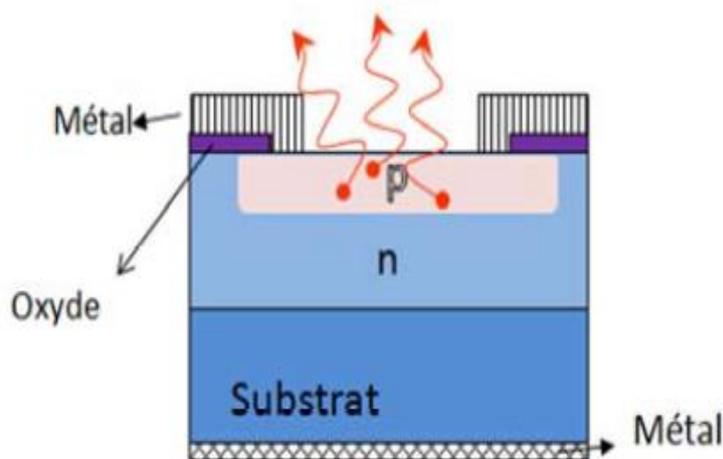
## I.5 Description des structures LED

Historiquement, les LED sont classifiées en deux catégories : LED à homojonctions et LED à hétérojonction.

Initialement, les LED consistaient en des homojonctions  $p-n$ , c'est-à-dire la mise en contact intime de deux parties d'un même semi-conducteur respectivement dopées  $n$  et dopé  $p$ . Pour qu'une LED émette de la lumière, les concentrations des électrons et des trous doivent être élevées pour optimiser le taux de recombinaison radiative. Les concentrations de porteurs s'amplifient avec l'introduction de porteurs « hors d'équilibre » lorsque la LED est soumise à une tension ou à un courant direct. La zone où les électrons et les trous se recombinent se nomme la zone active. La largeur de la zone active dépend du matériau constituant l'homojonction, du profil et des concentrations des dopants dans les deux parties de la jonction.

Une hétérojonction  $p-n$  est constituée de deux semi-conducteurs de nature différente, par conséquent de largeur de bande interdite différente, respectivement dopés  $n$  et  $p$ .

Une double hétérostructure consiste en la juxtaposition de deux hétérojonctions. Une double hétérostructure est ainsi composée d'une zone active insérée entre deux régions de confinement. La bande interdite des régions de confinement est plus large que la bande interdite de la zone active, permettant d'atteindre des concentrations de porteurs plus élevées dans la zone active que dans les régions de confinement. Dans les LED, les puits quantiques sont des doubles hétérostructures [18].



**Figure I.8** : Structure de base d'une diode électroluminescente (DEL) [19].

### I.5.1 LED à puits quantiques

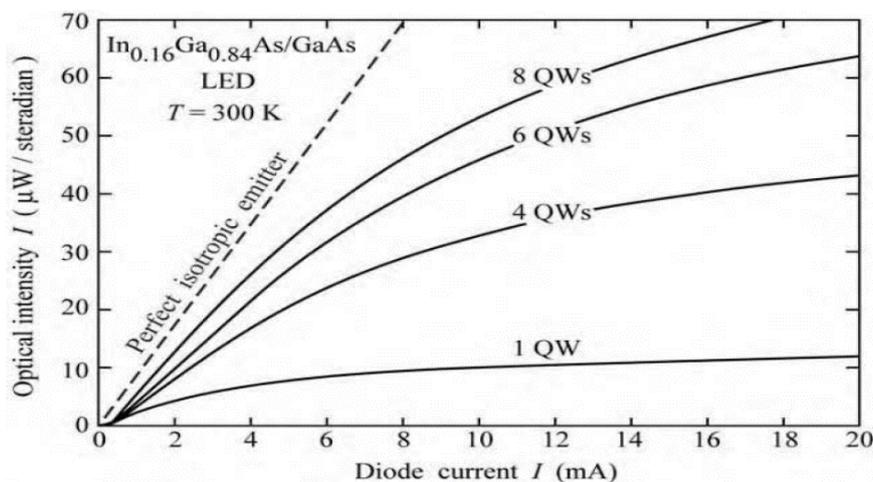
Afin d'assurer un bon confinement des porteurs, les LED à puits quantiques sont finalement apparues. La formation des puits quantiques permet de réduire la largeur de la zone

active à quelques nanomètres. Pour renforcer la concentration des porteurs dans les puits quantiques, l'énergie de la bande interdite du matériau composant les puits est inférieure à celle du matériau constituant la jonction  $p-n$ . En conséquence, les porteurs de charge sont confinés plus efficacement par les puits quantiques et leurs concentrations y sont très élevées.

Dans les LED à base de GaN, l'alliage (Ga,In)N constitue les puits quantiques. Plus la composition d'indium n'est élevée, plus l'énergie de la bande interdite de l'alliage (Ga, In) N est faible.

Bien que l'insertion des puits quantiques vise à confiner les porteurs de charge, à cause des désaccords de polarisation (spontanée et piézoélectrique) induits par les interfaces (Ga,In)N/GaN, des champs électriques importants (de l'ordre du  $10^6 \text{ V.cm}^{-1}$ ) sont présents dans les puits quantiques en (Ga,In)N. Ces champs électriques déplacent les fonctions d'onde des électrons et des trous aux deux côtés opposés du puits quantique, réduisant le taux de recouvrement de leurs fonctions d'onde (effet Stark confiné). Cependant, l'effet Stark confiné est d'autant moins important que la largeur du puits quantique soit faible, typiquement inférieure à  $3\text{nm}$ .

Dans les LED, des puits quantiques sont insérés entre les parties dopée  $n$  et dopée  $p$ . Le nombre de puits quantiques est quasiment proportionnel à l'intensité optique d'une LED, comme l'illustre la figure (I.9), pour une intensité de courant donnée, nous constatons une augmentation de l'intensité optique avec le nombre de puits quantiques (QW – "quantum well" en Anglais) dans les LED à base de GaInAs [20].



**Figure 1.9** : Exemple de l'intensité optique d'une LED en (In, Ga)As en fonction de l'intensité du courant électrique et du nombre de puits quantiques.

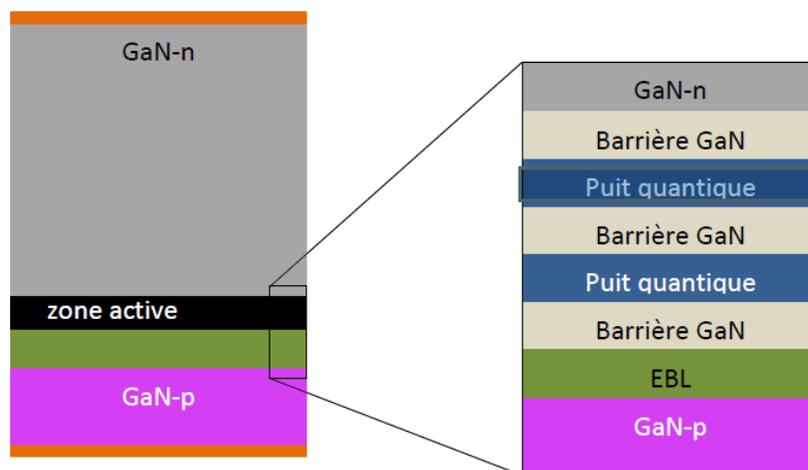
L'intensité optique étant une fonction sous-linéaire du courant, le rendement des LED (In,Ga)As chute en fonction du courant comme celui des LED (In,Ga)N.

Une fois générés dans les puits quantiques, les photons peuvent s'échapper de la LED pour contribuer au flux lumineux. Cependant, une partie de ces photons peut également être absorbée par le substrat ou le contact métallique. Parallèlement, à cause du grand indice de réfraction du GaN (environ 2.53 pour une longueur d'onde de 400 nm à 300 K) les photons peuvent également être piégés à l'intérieur de la LED du fait des réflexions totales. Ainsi, une fraction des photons générés ne s'échappe pas de la LED et le taux d'extraction, c'est-à-dire le rapport du nombre de photons capables de s'extraire de la LED par rapport au nombre total de photons générés dans la structure LED, est inférieur à l'unité.

### I.5.2 LED à puits quantiques et couche de blocage électronique

Outre les puits quantiques, les LED, notamment celles à base de GaN, disposent souvent de couche de blocage d'électrons<sup>16</sup> ou des barrières pour électrons afin de limiter le déplacement d'un éventuel sur plus d'électrons de la zone active vers la partie dopée *p*. Ainsi, la couche de blocage d'électrons se situe entre ces deux zones. Souvent, une LED ne nécessite pas de couche de blocage de trous car la mobilité des trous est en général très faible en comparaison de la mobilité des électrons et le courant de fuite des trous est négligeable. Les couches de blocage d'électrons sont à base de matériau dont l'énergie de la bande interdite est plus importante que celle du ou des matériaux constituant la jonction *p-n*. Dans les LED à base de GaN, ces barrières sont en (Ga,Al)N dopé *p* dont la valeur de la bande interdite augmente avec la proportion d'aluminium dans l'alliage.

La figure (I.10) montre schématiquement l'empilement d'une LED à base de GaN pourvue de puits quantiques et d'une couche de blocage d'électrons [21].



**Figure 1.10** : Représentation schématique en coupe transverse de l'empilement d'une LED pourvue de deux puits quantiques et d'un EBL [18].

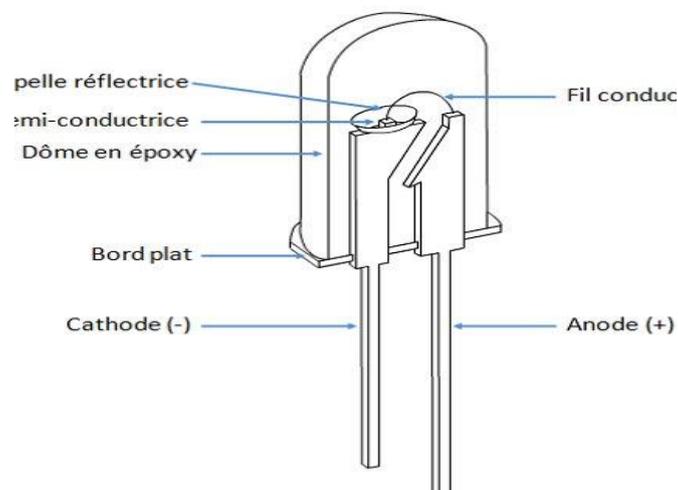
## I.6 Classification des diodes électroluminescentes

### I.6.1 Classification selon la puissance

#### ➤ Les LEDs 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 voyants lumineux sur les appareils électroménagers par exemple.

Celles-ci ne sont pas conçues pour les flux lumineux et les puissances élevées nécessaires pour les applications d'éclairage [22].



**Figure I.11** : Schéma d'une LED faible puissance [15].

#### ➤ Les LEDs de forte puissance

Souvent méconnues du grand public, elles sont pourtant en plein essor et leurs applications sont souvent ignorées : flash des téléphones portables, éclairage etc... Le principe de base reste identique à la précédente architecture mais possèdent en plus une pièce appelé « pad thermique » qui a pour fonction l'évacuation de la chaleur générée au niveau de la puce pour l'éclairage, on utilise des lampes constituées de plusieurs LED de forte puissance (HB : high brightness, UHB : ultra high brightness) accolées.

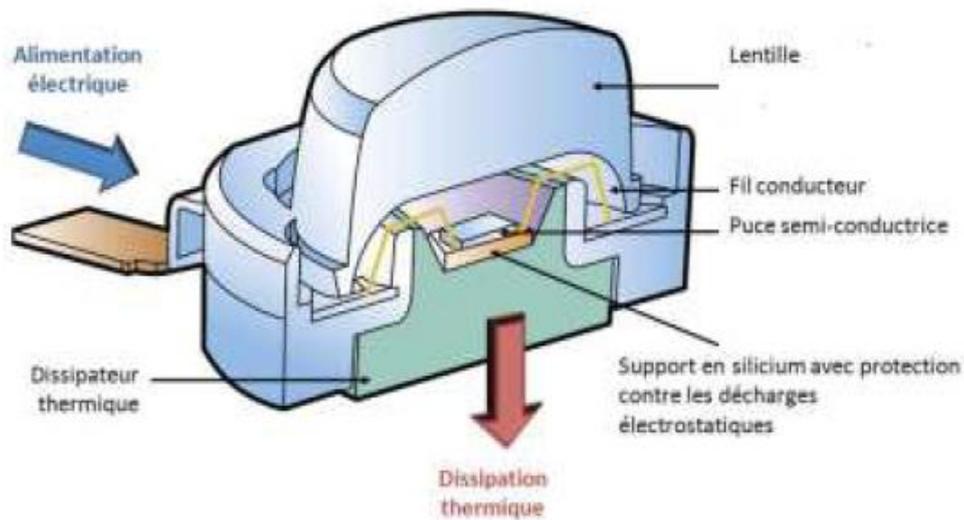


Figure I.12 : Coupe schématique d'une LED de forte puissance vue en coupe.

LEDs	Paramètres
LED conventionnelles (faible puissance)	Surface de la jonction : $350 \times 350 \mu\text{m}^2$ Alimentation : 30mA, 3,5V Puissance < 200mW
Domaine d'application privilégié: applications nomades et signalisation	Flux lumineux : 1-3lumens Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) 20 lm/W Encapsulation époxy (en dôme)
HB-LED forte luminosité (forte puissance)	Surface de la jonction : $1 \times 1 \text{mm}^2$ Alimentation : 350mA, 3,5V Puissance maximale 1W
Domaine d'application privilégié: rétro-éclairage, automobile, éclairage	Flux lumineux 5-30lumens Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) > 30lm/W Encapsulation spécifique (silicone)
UHB-LED très forte luminosité	Surface de la jonction : $2 \times 2 \text{mm}^2$ Densité surfacique de courant > $50 \text{A/cm}^2$ Puissance maximale 5W
Domaine d'application privilégié: éclairage général	Flux lumineux > 100lumens Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) 50lm/W Encapsulation spécifique (silicone)

Tableau I.4: Les différentes familles des diodes électroluminescentes.

## I.6.2 Classification selon le spectre d'émission

Une autre manière de les classer 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 –780 nm) 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 40 nm). Ces sources ont un spectre quasiment monochromatique.
- ◆ **Les blanches** : l'énergie est répartie dans le visible sur toute la gamme de longueurs d'onde 380 à 780 nm environ.
- ◆ **Les infrarouges** : l'énergie est émise hors du spectre de la lumière visible, au-delà de 700 nm 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 telles que la Wii, ou servir d'éclairage pour les caméras infrarouge [15].

## I.7 Caractéristiques des diodes électroluminescentes

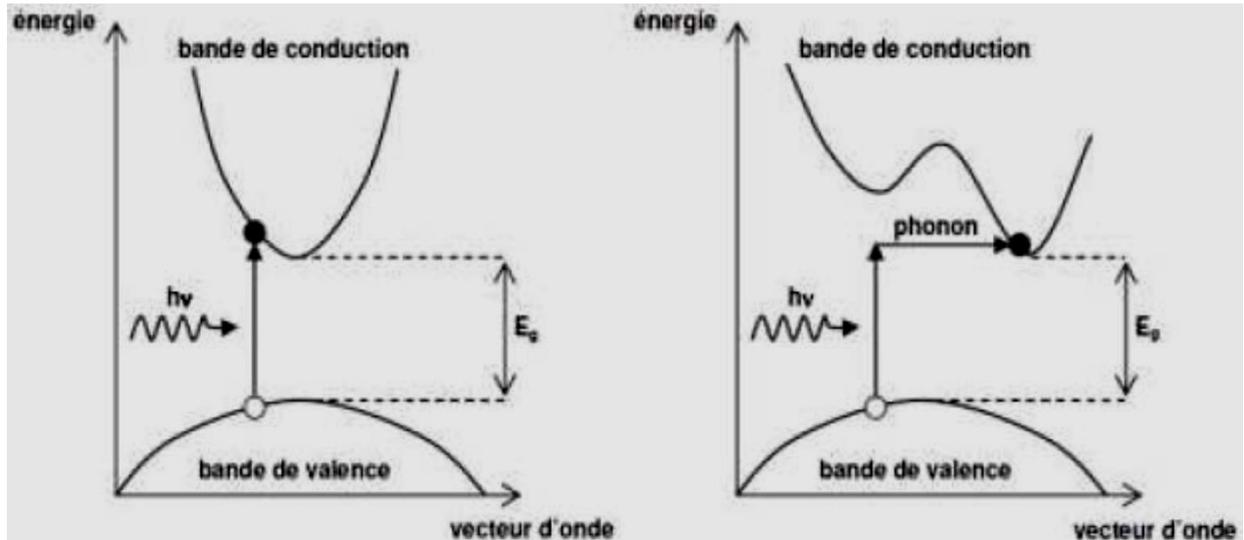
### I.7.1 Caractéristiques physiques

Le gap est la différence entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande valence ; pour les matériaux semi-conducteurs le gap conditionne un bon nombre de propriétés optiques ou électroniques.

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

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

On préfère les matériaux à gap direct pour les applications d'émetteurs de lumière, où les recombinaisons radiatives des porteurs sont plus importantes.



**Figure I.13:** Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct et indirect [23].

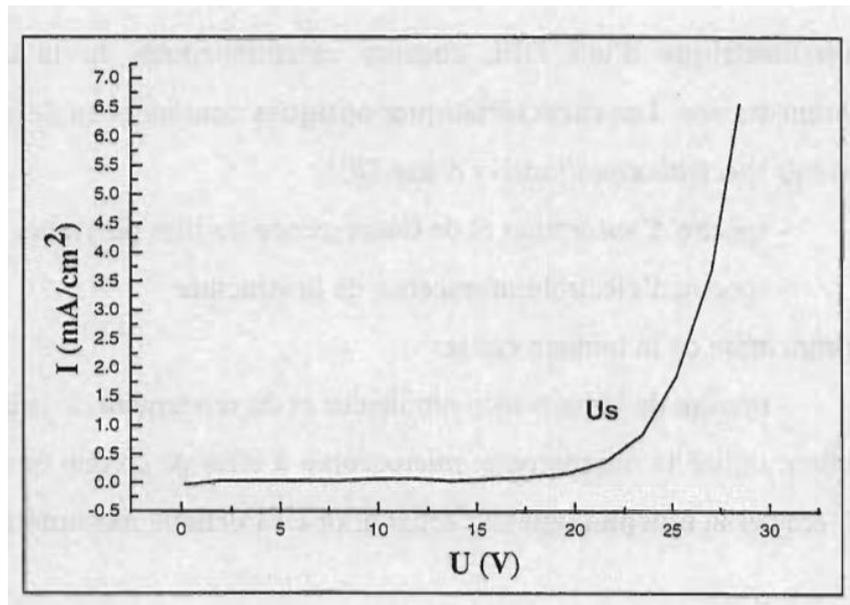
### I.7.2 Caractéristiques électriques

Du courant est injecté à travers une DEL lorsque le champ électrique appliqué sur la structure est suffisamment élevé pour qu'il y ait injection de charges aux contacts. Nous avons déterminé expérimentalement le champ électrique seuil,  $E_s$ , comme étant la valeur minimale du champ électrique  $E$  à appliquer pour qu'il y ait émission de lumière. On parle également de tension seuil,  $U_s$ , tension de polarisation à partir de laquelle la DEL émet de la lumière.

On a:

$$E_s = \frac{U_s}{d} \quad (I.7)$$

Où  $d$  représente l'épaisseur de la couche organique sur laquelle on applique le champ électrique. La tension seuil, avec la caractéristique courant-tension (courbe donnant le courant injecté dans la structure en fonction de la tension de polarisation) sont deux paramètres qui caractérisent une diode électroluminescente. Un exemple de caractéristique courant-tension est donné sur la figure (I.14).



**Figure I.14 :** Caractéristique courant-tension d'une LED [24].

## I.8 Conclusion

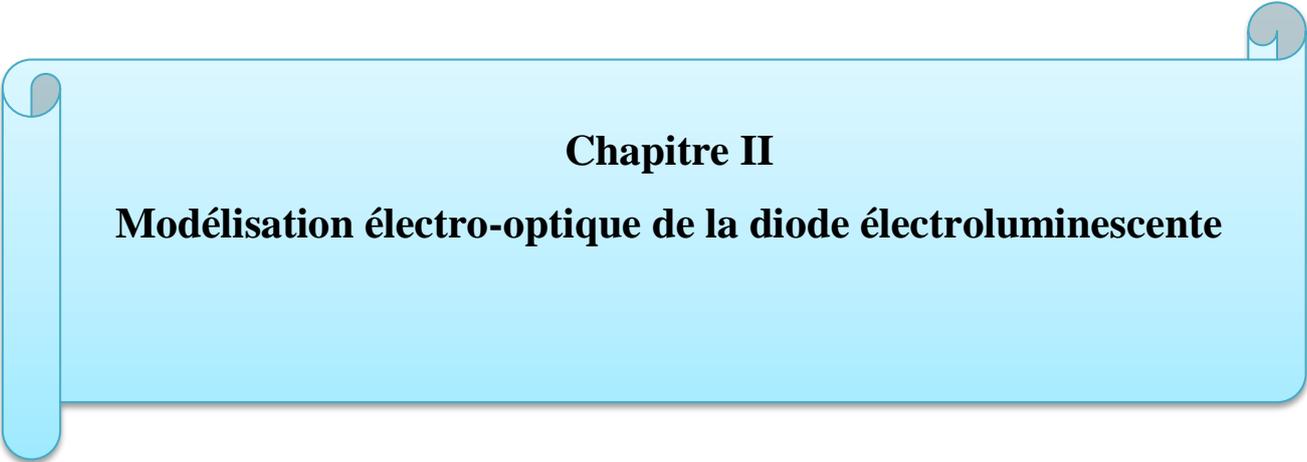
Dans ce chapitre, nous avons décrit en détail l'aspect théorique de la diode électroluminescente en termes de principe de fonctionnement, structures physiques, les mécanismes de recombinaison des porteurs radiative et non radiative et les matériaux semi-conducteurs utilisés lors de la conception d'une telle diode.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation physico-électro-optique de la diode électroluminescente.

# Bibliographie du chapitre I

- [1] Tabbi Hadjer, «Caractérisation automatisée des diodes électroluminescentes», mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [2] G. Zissis « Diode électroluminescente pour éclairage », cahiers innovation IN-18 technique de l'ingénieur, pp.1-13, 2011.
- [3] G.Zissis « Diode électroluminescente blanche et éclairage général », réseau écran, revue trimestrielle N°6, pp.1-8, 2007.
- [4] Comité d'Experts Spécialisés (CES), rapport d'expertise collective. « Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED) », Anses Saisine N° 0408, pp.40-67, 183-215, 2010.
- [5] site web : [www.batiweb.com](http://www.batiweb.com) , 50 ans d'histoire de diode électroluminescente (LED).
- [6] Houdri Romuald, « dispositifs électroniques et optiques des semi-conductrices », Sciences et génie des matériaux, 2007.
- [7] M. Adrien Barbet, « Pompage par LED de matériaux laser émettant dans le visible ou l'infrarouge proche », Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, 2016.
- [8] Djerraf Sabir Aiouaz Abdallah, «Etude et simulation d'une LED par le logiciel SILVACO», mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf -M'sila, 2021.
- [9] Site web: [www.physique-et-matiere.com/diode\\_electroluminescente.php](http://www.physique-et-matiere.com/diode_electroluminescente.php).
- [10] Z. Toffano, « Optoélectronique, Composants photoniques et fibres optiques », Edition Ellipse, 2001, page 160.
- [11] Rebiai Benahmed, « composants Optoélectroniques », Saïda.
- [12] Hamida Zineb et Hamdi Nour, « Simulation des diodes électroluminescentes: Effet de la température », mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2021.
- [13] Site web: <https://www.abcelectronique.com/annuaire/cours/cache/644/fonctionnement-jonction-pn.html>.
- [14] E. Fred Schubert, «Light-emitting diodes», reseller polytechnic institute, Troy, New York, Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2006.

- [15] Mansour Samah, «Etude et simulation des caractéristiques électriques de diode électroluminescente (LED) », Université Mohamed Khider Biskra, 2016.
- [16] <http://f5zv.pagesperso-orange.fr> > Radio, Les diodes électroluminescentes (LED) – F5ZV.
- [17] Nicolas Pousset, «Caractérisation du rendu des couleurs des nouvelles sources : les diodes électroluminescentes (LED) », Thèse de Doctorat, Conservatoire national des arts et métiers, 2009.
- [18] Dinh Chuong Nguyen, «Contribution à l’optimisation du rendement d’électroluminescence des LED de puissance : décorrélation des différentes composantes du rendement», Thèse de Doctorat, École Doctorale Physique, 2017.
- [19] Site web <http://e-learning.univ-tebessa.dz>.
- [20] Romuald Houdré, « Science et génie des matériaux », livrer 2006
- [21] E. F. Schubert, *Light-emitting diodes*, 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2006 /2007.
- [22] Bouaraba Fazia, «étude d’une LED à base d’InGaN pour l’émission de la lumière blanche», Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.
- [23] Belaid Asma, «Simulation et optimisation d’une diode électroluminescente B (Ga, Al) N/GaN émettant dans l’ultraviolet », Thèse de Doctorat, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2020.
- [24] Emmanuelle Gautier-Thianche, «Réalisation de diodes électroluminescentes en polymères», Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud U.F.R. Scientifique d'Orsay, 1998.



**Chapitre II**  
**Modélisation électro-optique de la diode électroluminescente**

## II.1 Introduction

La diode électroluminescente produit un rayonnement monochromatique incohérent à partir d'une transformation d'énergie par émission spontanée et plus précisément par les mécanismes de recombinaison des porteurs de charge. En effet les diodes électroluminescentes occupent une place clé dans la réalisation des affichages électroniques étant donné leur aptitude à traduire un signal électrique sous forme visible. On les rencontre également dans les systèmes de communication optique.

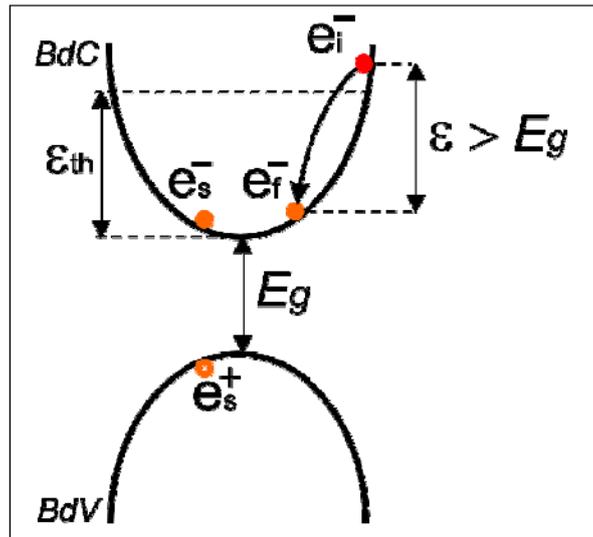
Dans cette partie nous allons présenter les modèles de ces mécanismes physiques et les modèles numériques électro-optique régissant le fonctionnement physique d'une telle diode électroluminescente.

## II.2 Modèles physiques de la diode DEL

### II.2.1 Modèle de recombinaison et d'ionisation par impact

L'application d'un champ électrique intense dans un matériau provoque le phénomène d'ionisation par impact. Pour chaque électron créé dans la bande de conduction, un trou correspondant est également créé dans la bande de valence.

Dans un matériau et sous l'effet du champ électrique existant, un électron peut toujours recevoir de l'énergie cinétique et la transmet au cristal par le fait d'effectuer de nombreux chocs avec les phonons du réseau. La dissipation de l'énergie potentielle perdue par les électrons n'est assurée que par ce phénomène. Si le champ électrique est toujours intense, la rupture d'une liaison et la création d'une paire électron-trou dans un atome sont dues à la présence de l'énergie acquise par certains électrons. Cela signifie que plus de porteurs libres sont générés. Si le taux de génération de porteurs libres est élevé, un phénomène d'avalanche se produit. La figure (II.1) illustre le phénomène d'ionisation par impact.



**Figure II.1** : Phénomène d'ionisation par impact ( $e_i^-$  : électron à l'état initial,  $e_f^-$  : électron à l'état final,  $e_s^-$  : électron secondaire créé,  $e_s^+$  : trou secondaire créé) [1, 2].

### II.2.2 Modèle de Shockley de diode LED à basse tension (ou à faible injection)

Pour la modélisation d'une diode à haute tension, il est important de distinguer la tension  $V_{app}$  appliquée à toute la diode et celle existant aux bornes de la zone désertée  $V_j$ . Considérons une faible tension  $V_{app}$ , afin d'établir le modèle de diode à basse tension de Shockley, c'est-à-dire à des tensions inférieures au potentiel interne  $V_{bi}$  de la jonction  $p-n$ , les hypothèses suivantes sont proposées :

1. la tension  $V_{app}$  se situe essentiellement aux bornes de la zone désertée et la tension de cette zone  $V_j$  est supposée égale à la tension appliquée à toute la diode  $V_{app}$ . Les chutes de tensions  $V_{sn}$  et  $V_{sp}$  dans les couches de transport sont négligeables par rapport à la tension de la zone désertée  $V_j \approx V_{app}$ . Donc, nous pourrions utiliser  $V_{app}$  pour la modélisation.
2. Les champs électriques dans les couches de transport sont négligeables par rapport au champ électrique présent dans la zone désertée. En conséquence, les termes contenant le champ électrique  $E$  dans les équations (II.1) et (II.2) sont quasiment nuls. Le seul mécanisme de transport dans les couches de transport est la diffusion et le courant dans la diode est essentiellement un courant de diffusion.

$$J_n = q\mu_n nE + qDn \frac{dn}{dx} \quad (\text{II.1})$$

$$J_p = q\mu_p pE - qDp \frac{dp}{dx} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$\mu_n$  et  $\mu_p$  sont les mobilités des électrons et des trous respectivement.

$D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous.

3. Dans le modèle de Shockley, aucun processus de génération-recombinaison n'est présent dans la zone désertée [3]. En revanche, les électrons et les trous peuvent se recombiner dans les couches de transport. De plus, il est supposé que la vitesse de recombinaison des porteurs excédentaires aux contacts est très grande [4]. Autrement dit, la durée de vie des porteurs aux contacts est très faible et leur densité est toujours égale à la densité d'équilibre  $n_{p0}$ ,  $p_{n0}$ .

Soient  $W_p$  et  $W_n$  les largeurs des parties  $p$  et  $n$  de la jonction, les positions  $x=-W_p$  et  $x=W_n$  sont respectivement les positions de l'anode et de la cathode comme l'illustre la figure (II.2).

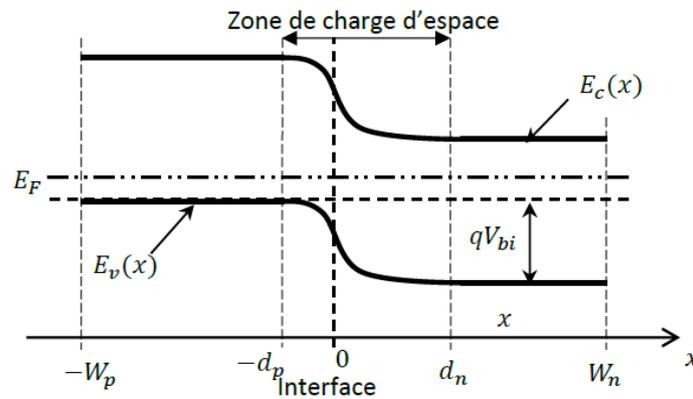


Figure II.2 : Le diagramme de bande d'énergie d'une jonction  $p-n$  non polarisée.

$W_p$  et  $W_n$  : sont les épaisseurs des parties dopées  $p$  et  $n$ .

$d_p$  et  $d_n$  : sont respectivement les largeurs de la zone désertée dans les parties dopées  $p$  et  $n$ .

La densité du courant de diffusion totale est :

$$J = j_n(-dp) + j_p(dn) = (j_{ns} + j_{ps}) \left[ \exp\left(\frac{qV_{app}}{KBT}\right) - 1 \right] \quad (II.3)$$

Les densités de courant  $j_{ns}$  et  $j_{ps}$  sont respectivement dénommées les densités limites de diffusion des électrons et des trous.

$$j_{ns} = \begin{cases} \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} = \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_{a-}}, & \text{si } L_n \ll w_p \\ \frac{qD_n n_{p0}}{W_p - d_p} \approx \frac{qD_n n_i^2}{W_p N_{a-}}, & \text{si } w_p \ll L_n \end{cases} \quad (II.4)$$

$$j_{ps} = \begin{cases} \frac{qD_p p n_0}{L_p} = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_d} , & \text{si } L_n \ll w_p \\ \frac{qD_p p n_0}{W_n - d_n} \approx \frac{qD_p n_i^2}{W_n N_d} , & \text{si } w_p \ll L_n \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Dans les équations (II.4) et (II.5),  $L_n, L_p = \sqrt{D_n, D_p \tau_n, \tau_p}$  sont les longueurs de diffusion et  $\tau_n, \tau_p$  sont les durées de vie des électrons et des trous dans les régions de type  $p$  et  $n$ , respectivement. Comme le montre l'équation (II.3), la densité du courant dans une jonction  $p-n$  est la somme des densités des courants de diffusion des électrons et des trous sortant de la zone désertée. En réalité, l'expression de la densité du courant dans une diode est déviée de l'expression (II.3) et souvent accompagnée d'un facteur d'idéalité *ni* idéal supérieur à l'unité.

$$J = j_s \exp\left(\frac{qV_{app}}{n_i k_B T}\right) \quad (\text{II.6})$$

La présence du facteur d'idéalité différent de 1 peut s'expliquer par les hypothèses 1 – 3 citées ci-avant. Il est supposé qu'aucun mécanisme de génération-recombinaison n'existe dans la zone désertée, c'est-à-dire la densité du courant de diffusion des électrons et des trous est constante dans toute la zone désertée. De plus, les effets d'un champ électrique et les densités du courant drift dans la diode sont également négligés en faveur des densités des courants de diffusion. Or les taux des recombinaisons dans la zone désertée des diodes, et surtout des LED, sont plus élevés que ceux dans les couches de transport. Les effets d'un champ électrique dans les couches de transport d'une diode se manifestent plus fortement lorsque la tension appliquée augmente [5, 6]. Ainsi, le facteur d'idéalité prend en compte les effets des recombinaisons et du champ électrique. Par exemple, à basse tension, en présence des recombinaisons SRH, le facteur d'idéalité peut prendre une valeur comprise entre 1 et 2. A plus haute tension, comme le montre la partie suivante, un facteur d'idéalité égal à 2 modélise la densité du courant sous l'influence du champ électrique [4].

### II.2.2 Modèle de diode/LED à haute tension (ou à forte injection)

Comme le montre la partie précédente, lorsque la tension  $V_{app}$  est inférieure au potentiel  $V_{bi}$  de la jonction, les tensions dans les couches de transport de la diode sont négligeables et la tension aux bornes de la zone désertée  $V_j$  égale la tension  $V_{app}$ . Lorsque la tension  $V_{app}$  est comparable ou supérieure à la tension  $V_{bi}$ , la tension  $V_j$  est inférieure à la tension  $V_{app}$  car majorée par le potentiel  $V_{bi}$ . Ainsi, dans cette partie, la tension aux bornes de la zone désertée

$V_j$  et la tension appliquée à la diode  $V_{app}$  seront bien distinguées.

Afin d'établir le modèle de diode à haute tension, outre les hypothèses utilisées pour le modèle à basse tension, la jonction  $p-n$  étudiée est également supposée asymétrique, c'est-à-dire que le courant de l'un des deux types de porteurs de charge est largement supérieur au courant de l'autre type de porteurs. Pour une jonction à base de GaN, de par la forte mobilité des électrons et l'énergie d'activation importante des accepteurs, le courant des électrons peut être très élevé par rapport au courant des trous. Par analogie aux modèles à faibles tensions, la densité du courant dans une jonction à base de GaN à hautes tensions est modélisée par l'expression (II.7).

$$j = \frac{q n_i^2 D n^*}{N_a L n^*} \coth \left( \frac{w_p - d_p (v)}{L n^*} \right) \left[ \exp \left( \frac{q v_j}{k_B T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.7})$$

L'expression (II.7) est analogue à l'expression (II.3) pour des basses tensions, la diffusivité  $Dn$  et la longueur de diffusion  $L_n$  des électrons sont remplacées par leur valeur effective :

$$D n^* = D n \left( 1 + \frac{n}{p} \right)_{x=d_p} \quad (\text{II.8})$$

$$L_n = \sqrt{D n^* \tau_n} = \sqrt{D n \tau_n \frac{N_d}{n}} \quad (\text{II.9})$$

L'expression (II.7) traduit la relation entre la densité du courant  $J$  et la tension aux bornes de la zone désertée  $V_j$ . En comparaison, l'expression (II.3) relie la densité du courant  $J$  et la tension appliquée à la diode  $V_{app}$  or il n'est possible d'évaluer que la valeur de  $V_{app}$  lors des mesures. Afin d'établir la loi ( $V_{app}$ ), puisque les tensions  $V_j$  et  $V_{app}$  ne sont plus égales à haute tension, il est nécessaire de déterminer la relation entre ces deux tensions.

Pour une jonction  $p-n$  à base de GaN, la relation entre les tensions  $V_j$  et  $V_{app}$  se traduit par l'expression (II.10), en supposant que la tension aux bornes de la partie dopée  $n$   $V_{sn}$  soit négligeable et que  $V_{app} = V_j + V_{sp}$ .

$$v_j = \frac{1}{2} \left[ v_{app} - \frac{k_B T}{q} \ln \left( 1 + \frac{\mu_n}{\mu_p} \right) - 2 \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{n_i}{N_a} \right) \right] \quad (\text{II.10})$$

Dans une jonction à base de GaN, le terme  $k_B T/q \times (n_i/N_a)$ , à première vue, semble négligeable devant  $V_{app}$  puisque la concentration des porteurs intrinsèques  $n_i$  est de l'ordre de  $10^{-10} \text{ cm}^{-3}$  et la concentration d'accepteurs  $N_a$  est souvent de l'ordre de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Cependant, pour une concentration d'accepteurs  $N_a = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , la valeur de ce terme est environ  $1.7V$ , soit du même ordre de grandeur que  $V_{bi}$ . En remplaçant l'expression (II.10) dans l'expression (II.7), on obtient la loi  $J(V_{app})$ .

$$J = \frac{qD_n n_i}{w_p} \left[ \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n + \mu_p}} \exp\left(\frac{qV_{app}}{2kBT}\right) \right] \quad (\text{II.11})$$

La tension de seuil,  $V_{th}$ , qui sépare le modèle de densité de courant à basse tension du modèle de densité de courant à haute tension s'obtient en utilisant les équations (II.3), (II.11) et en supposant que la densité de courant des électrons est prédominante. Cette situation est probable dans les diodes GaN à cause de la forte mobilité des électrons par rapport à celle des trous. La tension  $V_{th}$  est exprimée par l'équation (II.12).

$$V_{th} = \frac{2kBT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i} \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n + \mu_p}}\right) \quad (\text{II.12})$$

Revenons à l'expression (II.10), à première vue, les termes  $kBT/q \times (1 + \mu_n/\mu_p)$  et  $kBT/q \times \ln(n_i/N_a)$  semblent constants en fonction de la tension appliquée  $V_{app}$  et la tension  $V_j$  est une fonction linéaire de  $V_{app}$ . Cependant, comme le suggèrent les parties suivantes, à très haute tension, les mobilités  $\mu_n$  et  $\mu_p$  ainsi que l'énergie d'activation des accepteurs peuvent varier en fonction de la tension  $V_{app}$ . Dans ce cas la tension  $V_j$  n'est plus une simple fonction linéaire de la tension  $V_{app}$  et une augmentation  $dV_{app}$  n'est plus impartie qu'à  $V_j$  mais également au terme  $kBT/q \times (1 + \mu_n/\mu_p) + 2kBT/q \times \ln(n_i/N_a)$ .

Dans une jonction à base de GaN, à haute tension, hormis le champ électrique dans la zone désertée, un champ électrique se trouve probablement majoritairement dans la partie dopée  $p$  de la jonction à cause de la faible conductivité de cette partie. La chute de tension  $V_{sp}$  dans la partie dopée  $p$  n'est plus négligeable, contrairement à la chute de tension  $V_{sn}$  dans la partie dopée  $n$ . Ainsi, l'expression (II.10) peut s'écrire sous la forme  $V_{app} = V_j + V_{sp}$ , de laquelle on obtient l'expression de la tension  $V_{sp}$  aux bornes de la partie dopée  $p$ .

$$V_{sp} = \frac{1}{2} \left[ V_{app} + \frac{kBT}{q} \ln\left(1 + \frac{\mu_n}{\mu_p}\right) + 2 \frac{kBT}{q} \ln\left(\frac{n_i}{N_a}\right) \right] \quad (\text{II.13})$$

L'expression (II.13) suggère que la tension  $V_{sp}$  aux bornes de la partie dopée  $p$  est également une fonction croissante de la tension  $V_{app}$  appliquée à la diode. Une augmentation de  $V_{sp}$  entraîne éventuellement la croissance d'un champ électrique dans la région de type  $p$ .

Bien que ce modèle soit établi pour le régime des hautes tensions, les caractéristiques  $J-V$  ou  $I-V$  des diodes ou des LED requièrent un autre modèle pour le régime résistif, ou pour des tensions  $V_{app} \gg V_{bi}$ . Ce modèle suivra la loi d'Ohm  $I(V_{app}) = (V_{app} - V_{bi}) / R_s$  dans laquelle  $R_s$  est la résistance série de la diode. Pourtant, aucun modèle n'est disponible pour la résistance  $R_s$  et pour la caractéristique  $I-V$ .

Nous avons étudié les modèles analytiques disponibles pour la densité du courant d'une diode en fonction de la tension appliquée à basses et hautes tensions. Ces modèles sont basés sur des hypothèses qui ne se justifient souvent que dans un intervalle de tension restreint. En outre, le manque de modèle pour des très hautes tensions (le régime résistif) limite l'application des modèles analytiques à l'étude de la caractéristique  $J-V$  des diodes. En effet, afin de modéliser la relation entre la densité du courant et la tension dans une diode, le modèle suivant est souvent préférée aux modèles analytiques [7].

$$I - \frac{v_{app} - I \times R_s}{R_p} = I_s \exp \left( \frac{v_{app} - I \times R_s}{n_{ideal} KBT} \right) \quad (II.14)$$

A part la résistance série  $R_s$ , une résistance en parallèle dénommée  $R_p$  intervient dans l'expression (II.14). Cette résistance en parallèle modélise les phénomènes court-circuitant la jonction  $p-n$ , par exemple des imperfections de la surface de la jonction et d'une certaine façon l'influence des dislocations traversâtes. Notons que le terme  $v_{app} - I \times R_s$  dans l'équation (II.14) égale la tension  $V_j$  aux bornes de la zone désertée de la diode caractérisée et l'expression (II.14) n'est qu'une autre forme de l'expression (II.6) ou de l'expression (II.7). Bien que l'expression (II.14) permette la détermination empirique des quantités  $I_s$ ,  $R_s$  et  $n_{ideal}$ , l'intensité du courant ne peut pas être exprimée par une fonction simple de la tension appliquée. La résolution de l'équation (II.14) implique l'utilisation de la fonction  $W$  de Lambert qui est également nécessaire afin de résoudre l'équation différentielle de Poisson sans aucune approximation. Ainsi, l'étude des différents mécanismes dans la diode s'avère plus difficile avec l'expression (II.14).

Amar Gaci propose des modèles à basses et hautes tensions et cite également des modèles construits par d'autres chercheurs pour la caractéristiques  $I-V$  des diodes. Comme les modèles analytiques présentés ci-dessus, les modèles de Gaci et d'autres chercheurs ne décrivent pas exactement le comportement électrique d'une diode dans le régime résistif.

Puisqu'il n'existe pas de modèle analytique pour une simple jonction  $p-n$  à haute tension, une LED de type hétérojonction à puits quantiques ne dispose pas non plus de solution analytique. Ainsi, une étude analytique des diodes à hautes tensions se heurte à d'infranchissables difficultés et nécessite d'autres approches [8].

### II.2.3 Modèle de recombinaison radiative

Nous intéressons au rythme auquel le transporteur de concentration diminue et désigne le taux de recombinaison comme  $R$ . Considérons un électron libre dans la bande conductrice. La probabilité que l'électron se recombine avec un trou est proportionnelle à la concentration de trous, c'est-à-dire  $R \propto p$ . Le nombre d'événements de recombinaison sera

également proportionnel à la concentration d'électrons proportionnelle au produit des concentrations d'électrons et de trous, c'est-à-dire  $R \propto n$  utilisant une constante de proportionnalité, le taux de recombinaison par unité de temps par unité de volume peut s'écrire :

$$R = - \frac{dn}{dt} = - \frac{dp}{dt} = Bnp \quad (\text{II.14})$$

C'est l'équation de vitesse bimoléculaire et la constante de proportionnalité  $B$  est appelée le coefficient de recombinaison bimoléculaire. Il a des valeurs typiques de  $10^{-11}$  et  $10^{-9}$   $\text{cm}^3/\text{s}$  pour des semi-conducteurs III-V à gap direct.

Ensuite, nous discutons de la dynamique de recombinaison en fonction du temps. Considérez un semi-conducteur soumis à une photo-excitation. Les concentrations d'électrons et de trous à l'équilibre et en excès sont  $n_0$ ,  $p_0$ ,  $\Delta n$  et  $\Delta p$ , respectivement. Comme les électrons et les trous sont générés et annihilés (par recombinaison) par paires, les concentrations en excès d'électrons et de trous à l'état d'équilibre sont égales.

$$\Delta n(t) = \Delta p(t) \quad (\text{II.15})$$

En utilisant l'équation du taux bimoléculaire, le taux de recombinaison est donné par :

$$R = B [n_0 + \Delta n(t)] [p_0 + \Delta p(t)] \quad (\text{II.16})$$

Permet d'identifier la durée de vie du porteur  $\tau$  comme :

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{1}{B(n_0 + p_0)} \quad (\text{II.17})$$

$$\tau_{\text{rad}} = t + \frac{1}{B\Delta n_0} \quad (\text{II.18})$$

Afin de réduire la durée de vie  $\tau_{\text{rad}}$  et augmenter la vitesse de modulation des LED, il sera souhaitable d'amplifier les dopages ou l'injection des porteurs dans la LED [7].

#### II.2.4 Modèle de recombinaison Auger

On va expliquer deux mécanismes importants :

L'électron peut céder son énergie à des phonons du réseau, il descend par cascade de transitions intermédiaires avec les niveaux électroniques profonds (collisions photons-réseau cristallin).

Quand on a un semi-conducteur de gap 1 eV, l'électron va céder son énergie à 30-40 phonons et les transitions se produisent sans émission de photons. C'est le premier mécanisme de recombinaison non radiative.

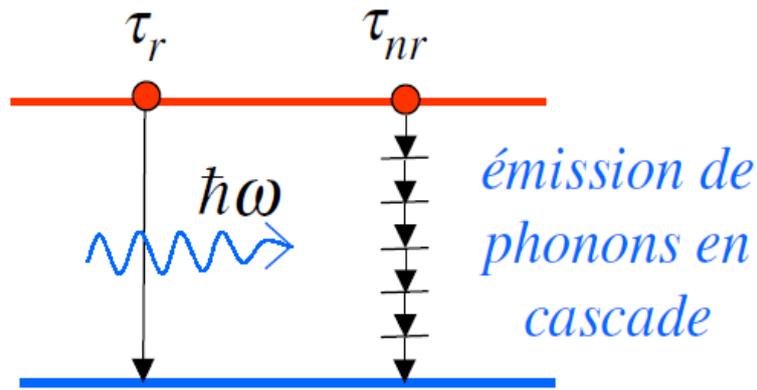


Figure II.3 : Recombinaison par phonons.

C'est le mécanisme le plus important de recombinaison non radiative responsable de limitation de rendement des semi-conducteurs et des LED, il s'agit des recombinaisons Auger.

L'électron dans la bande de conduction donne son énergie à un autre électron, ce dernier monte dans la bande de conduction, puis il est très vite thermalisé ( $10^{-13}$  sec) et il va descendre en cascade. Aucun photon n'est émis, parce que l'énergie est perdue sous forme de phonons figure (II.4 a).

La figure (II.4 b) représente le mécanisme avec un électron Auger dans la bande de valence ; l'électron donne son énergie à un trou (l'électron qui descend est vu comme un trou), il donne une énergie positive au trou qui va monter par cascade de phonons.

Le premier effet « **Auger eet** » : recombinaison électron-trou par l'intermédiaire d'un électron Auger.

Le second effet « **Auger ett** » : recombinaison électron-trou par l'intermédiaire d'un trou Auger.

Les lettres du milieu e et t dans **eet** et **ett**, représentent la particule Auger.

Ces figures représentent les deux mécanismes de recombinaison Auger dans une jonction p-n polarisée, comme le mécanisme eet fait intervenir deux électrons simultanément, sa probabilité est proportionnelle au carré de la densité électronique, soit  $n^2$ . Ce mécanisme affecte donc plus particulièrement les recombinaisons qui se font en région de type n.

De même le mécanisme Auger ett, faisant intervenir deux trous simultanément, est proportionnel au carré de la densité de trous, soit  $p^2$ . Il affecte donc les recombinaisons du côté p et est négligeable du côté n.

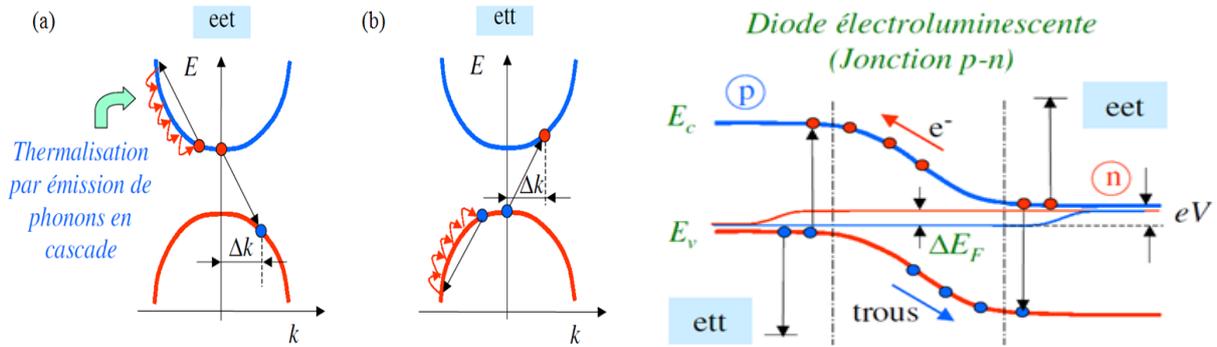


Figure II.4 : Recombinaisons Auger dans une jonction p-n polarisée [9]

### II.2.5 Modèle d'ionisation par impact électronique

L'ionisation par impact électronique est le processus inverse de la recombinaison Auger. Lorsque le champ électrique dans une région est suffisamment important, des électrons (ou des trous) acquérant suffisamment d'énergie cinétique peuvent entrer en collision avec un électron de la bande de valence, exciter ce dernier jusqu'à un niveau de la bande de conduction et créer une paire électron-trou. Si le taux de génération est suffisamment élevé, ce processus peut entraîner l'effet d'avalanche. Le taux de génération  $G$  d'ionisation par impact est donné par :

$$G = \frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = \alpha_n J_n + \alpha_p J_p \tag{II.19}$$

Dans l'expression (II.19), les facteurs  $\alpha_n$  et  $\alpha_p$  sont les coefficients d'ionisation des électrons et des trous.  $J_n$  et  $J_p$  sont les densités des courants des électrons et des trous. Les coefficients d'ionisation suivent la loi de Chynoweth [10, 11].

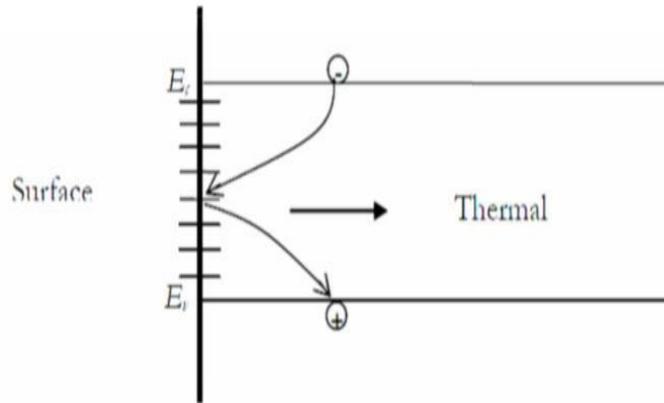
$$\alpha_n, (E) = \alpha_n, p \exp\left(-\frac{b_{n,p}}{E}\right) \tag{II.20}$$

Les coefficients  $\alpha_n$ , et  $b_n$ , sont différents selon les matériaux et peuvent varier en fonction de la température.

L'ionisation par choc est importante en tensions inverses et négligeable devant les autres mécanismes de génération-recombinaison en tensions directes. Masui *et al*, proposent un modèle de génération cinétique de paires électron-trou en tensions directes, similaire au modèle d'ionisation par choc. Le modèle de Masui *et al* [12].

### II.2.6 Modèle de recombinaison à la surface

L'ensemble des mécanismes précédents constitue des recombinaisons ayant lieu en volume du matériau. Il faut également considérer les recombinaisons en surface dont le mécanisme est représenté sur la figure II.5. Le formalisme du mécanisme de recombinaison (SRH) peut être reformulé dans ce cas, avec des recombinaisons par unité de surface plutôt que par unité de volume [13].



**Figure II.5:** Processus de recombinaison en surface.

Il est donné par la relation suivante :

$$R_{\text{surf}} = \frac{ns - ps - ni^2}{\tau_p \left( ns + ni e^{\frac{Et}{kT}} \right) + \tau_n \left( ps + ni e^{-\frac{Et}{kT}} \right)} \quad (\text{II.21})$$

Avec:

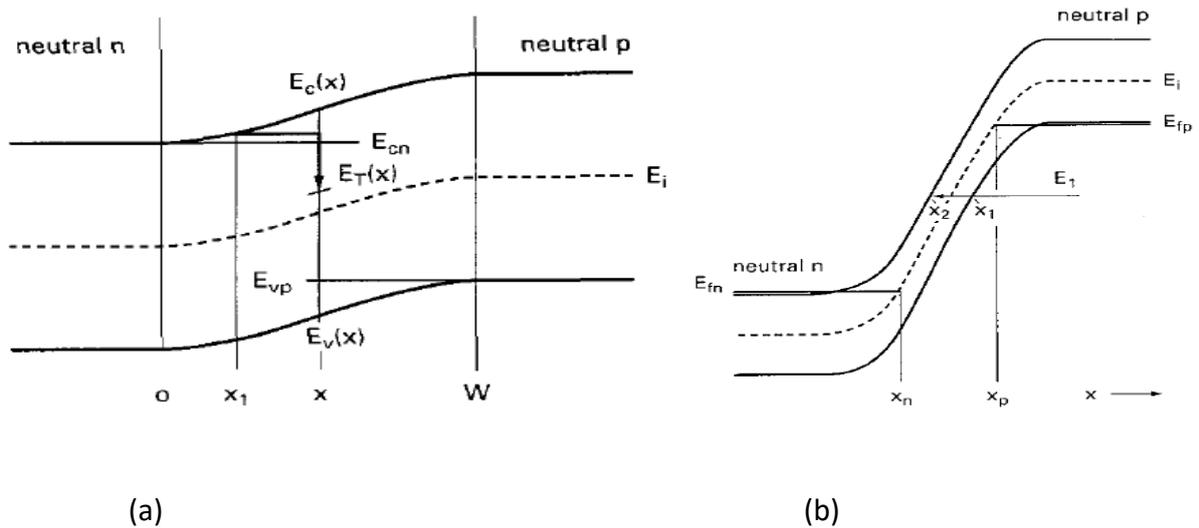
$ns$  et  $ps$  sont les concentrations de porteurs à la surface [14].

### II.2.7 Modèle de transition par effet tunnel

Sous l'influence d'un champ électrique important dans la zone désertée, deux mécanismes de transition par l'effet tunnel peuvent intervenir : la transition assistée par des niveaux de pièges la figure (II.6-a) et la transition directe de la bande de valence à la bande de conduction ou vice-versa la figure (II.6-b).

Le taux de recombinaison SRH, dans l'expression (II.22) existent des facteurs  $\Gamma_n$  et  $\Gamma_p$  modélisant les effets du champ électrique. Lorsque le champ électrique est faible, les facteurs  $\Gamma_n$  et  $\Gamma_p$  sont négligeables par rapport à l'unité et l'expression (II.22) du taux de recombinaison SRH.

Pour les transitions directes, sous l'effet d'un champ électrique  $F$  important, le taux de transition tunnel est donné par :



**Figure II.6:** Représentations schématiques du mécanisme de transition par l'effet tunnel a) assistée par des niveaux de piège et b) directe.

Hurkx *et al* proposent des modèles pour les simulations des deux processus de transition. Pour les transitions assistées par des niveaux de piège, le taux de recombinaison est donné par :

$$R_{trap} = \frac{np - ni^2}{\frac{\tau n_0}{1 + \Gamma n} (p + pT) + \frac{\tau p_0}{1 + \Gamma p} (n + nT)} \quad (II.22)$$

$$R_{bbt} = -B \times F^\sigma \times D(F, E, E_{fn}, E_{fp}) \times \exp\left(-\frac{F_0}{F}\right) \quad (II.23)$$

Dans l'expression (II.23), la fonction  $D(F, E, E_{fn}, E_{fp})$  prend en compte les positions relatives des niveaux de Fermi  $E_{Fn}$  et  $E_{Fp}$  dans les zones neutres et l'influence du mouvement perpendiculaire des électrons au champ électrique causant la transition tunnel [15].

$F_0$  est le champ électrique dans la zone désertée à l'équilibre et  $B$  un facteur de proportionnalité. Les paramètres  $F_0$  et  $B$  varient avec la température. Le facteur  $\sigma$  prend la valeur 2 dans les semi-conducteurs à gap direct et 5/2 dans les semi-conducteurs à gap indirect.

### II.3 Méthodes et modèles disponibles sous Silvaco/Atlas

Au lieu d'établir des expressions analytiques concrètes pour l'étude des mécanismes dans une diode, cette diode peut être divisée en petites structures dans lesquelles les équations différentielles sont résolues numériquement en bénéficiant de la puissance de calcul des ordinateurs. La « Conception Assistée par Ordinateur pour l'électronique » (CAO électronique ou TCAD pour "Technology Computer Aided Design" en langue anglaise) est largement utilisée pour l'étude et la modélisation des composants électroniques tels que des

transistors ou des composants optoélectroniques. Dans le domaine de la simulation des LED, plusieurs logiciels sont disponibles, par exemple APSYS de Crosslight, ATLAS de SILVACO ou *tiberCAD* de *tiberlab*. La CAO électronique peut être utilisée pour la conception des nouvelles structures LED ou l'étude de la chute du rendement des LED [16].

La simulation numérique est réalisée avec le logiciel ATLAS de SILVACO. En utilisant la méthode des éléments finis, le logiciel crée une maille couvrant toute la surface de la structure étudiée et résout numériquement les équations de base des semi-conducteurs par itération. Les simulations peuvent être conduites en régime statique aussi bien qu'en régime transitoire. Les caractéristiques électro-optiques ainsi que les évolutions de différents mécanismes à l'intérieur d'une LED peuvent être extraites et exploitées.

La base de données d'ATLAS contient les valeurs de différents paramètres de divers matériaux et offre aux utilisateurs la capacité de moduler ces valeurs.

La partie relative à la description de la simulation numérique à l'aide d'ATLAS sera donc divisée en sections respectivement détaillant la structure de LED, la description des mécanismes disponibles dans le logiciel [17].

### **II.3.1 Les modèles physiques utilisés pour les simulations**

Afin de prendre en compte les mécanismes correspondants, les modèles cités dans le tableau (II.1) ci-dessous sont activés

Paramètres	Modèle
Les bandes d'énergie	Modèle <b>k.p</b> [3]
La recombinaison SRH	Modèle <b>SRH</b> indépendant du dopage, de la température, ...
La recombinaison radiative	Modèle <b>wz.kp</b> (conçu pour la structure wurzite) et modèle de l'émission spontanée
La recombinaison Auger	Modèle <b>Auger</b> normal (sans influence du dopage, de la température, ...)
Les mobilités des électrons et des trous	Mobilité constante <b>conmob</b>
Le champ de polarisation à l'interface GaN/(Ga,In)N, GaN/(Ga,Al)N	Calculé à partir du désaccord de maille entre les matériaux et de la polarisation spontanée de chaque matériau par ATLAS, puis multipliée par un coefficient de proportionnalité de 0.5 (effet d'écrantage coulombien qui réduit le champ de polarisation) [18].

Tableau II.1 : Modèles utilisés dans les simulations.

## II.4 Modèle numérique physico-optique

### II.4.1 Equation de continuité de courant

Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont données par les équations suivantes :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n \quad (\text{II.24})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p + \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p \quad (\text{II.25})$$

Où :

$n$  et  $p$  sont les concentrations en électrons et en trous

$\vec{J}_n$  et  $\vec{J}_p$  sont les densités de courant d'électrons et de trous

$q$  est la charge de l'électron

$G_n$  et  $G_p$  sont les taux de génération d'électrons et de trous

Un et Up sont les taux de recombinaison pour les électrons et les trous.

#### II.4.2 Equation de Poisson

L'équation de Poisson relie les variations du potentiel électrostatique et les densités de charge d'espace.

$$\varepsilon \Delta V = -q (p - n + ND^- - ND^+) \quad (\text{II.26})$$

Où :

$\varepsilon$  : la constante diélectrique

$V$  : le potentiel

$\Delta V$  : le Laplacien du potentiel

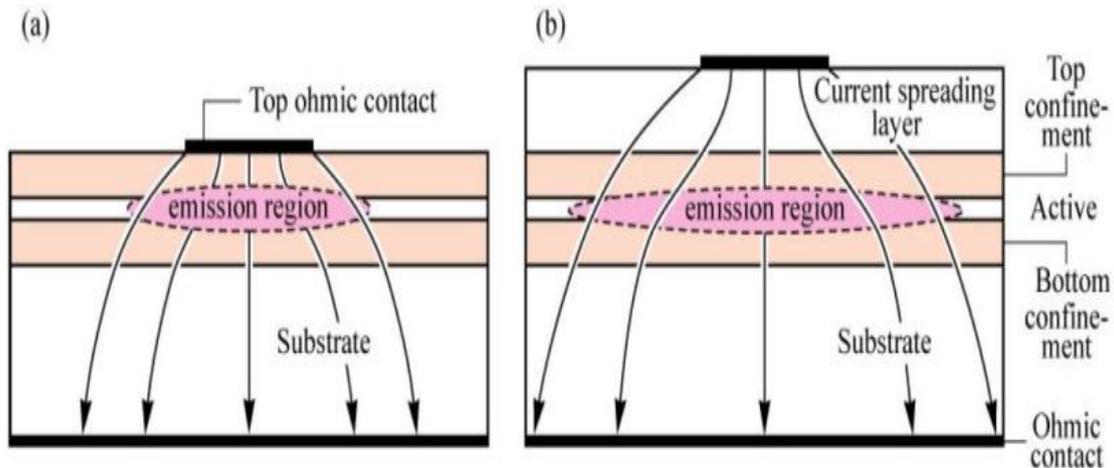
$q$  : la charge élémentaire d'électrons

$ND^-$  et  $ND^+$  : les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées

$n$  et  $p$  sont les densités des porteurs [19].

#### II.4.3 Le cas particulier de l'étalement du courant ("spreading")

Pour fonctionner, un composant LED doit disposer de contacts électriques positif et négatif. La LED pourra alors être polarisée avec une différence de potentiel électrique, ce qui permettra de contrôler son fonctionnement en y injectant plus ou moins d'électrons et de trous, respectivement de son côté dopé n et de son côté dopé p. Le choix d'un contact est important pour maximiser l'efficacité d'injection, et doit donc se faire en fonction du semi-conducteur. Dans une LED GaN VTF ou CC, toutes les faces ne peuvent pas être recouvertes de métaux non transparents pour des raisons évidentes. Si un contact pleine plaque est déposé d'un côté de la LED (recouvrant totalement la surface), un contact type grille ou plot sera plutôt déposé de l'autre côté, pour permettre l'extraction des photons. Le contact restant devra donc satisfaire un compromis entre injection et recouvrement de la surface. En effet, une surface d'électrode faible est requise par rapport à la surface totale émissive de la LED, afin de limiter l'ombrage. Le courant aura donc une répartition verticale inhomogène dans la structure, tel qu'illustré sur la figure (II.7) ci-dessous.



**Figure II.7 :** Illustration de l'étalement des lignes de courant sous un contact électrique (a) avec (b) sans une couche supplémentaire permettant de mieux distribuer le courant.

A ce titre, la longueur de spreading est généralement définie pour évaluer l'efficacité de l'étalement des lignes de courant dans la structure. Cette grandeur représente la distance pour laquelle la densité de courant sous contact est réduite d'un facteur  $1/e$  en s'éloignant du contact. Plus elle sera grande, plus la densité de courant sera distribuée de manière homogène (notamment dans la zone active). Cette distribution sera aussi dépendante de la taille et de la position des contacts, ainsi que des semi-conducteurs lui-même, mais elle variera évidemment avec la tension de polarisation appliquée. Le spreading est une notion importante à considérer, puisqu'elle permettra d'évaluer la « visibilité » des surfaces latérales par les lignes de courant lors d'une injection électrique. Or, nous avons pu voir que les surfaces latérales gravées des LED GaN présenteront certainement de nombreux défauts (désordre structurel, mauvaise stoechiométrie, oxydation, impuretés ioniques...). Les propriétés optoélectroniques de la LED seront donc altérées en périphérie (lignes de conduction parasites, recombinaisons SRH...). L'efficacité globale de la LED va alors fortement dépendre du positionnement de ses contacts, ce qui, du point de vue de la réalisation technologique, sera d'autant plus difficile à optimiser que la dimension de la LED sera petite [20].

## II.5 Méthode des éléments finis

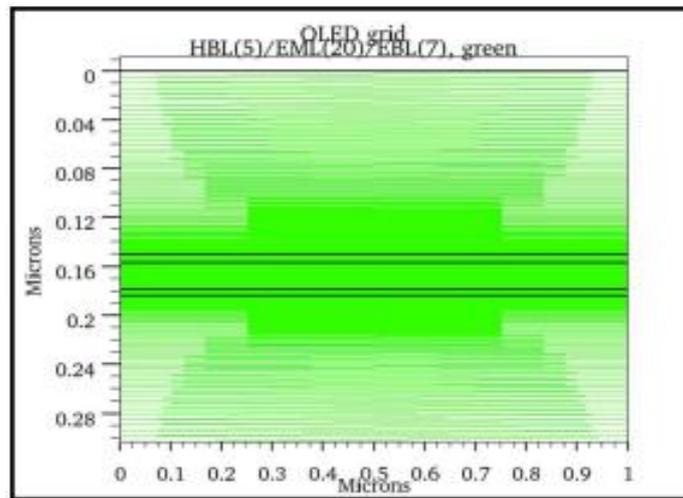
La résolution de l'équation de Poisson pour des structures multicouches exige une solution numérique.

Il existe principalement trois méthodes numériques pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles :

- la méthode des différences finies

- la méthode des volumes finis
- la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis FEM (pour Finite Element Method) est l'outil intégré dans le simulateur ATLAS. Elle consiste à trouver une solution approchée (par discrétisation) du champ électrique dans la structure (domaine  $\Omega$ ), gouverné par l'équation de Poisson. Le simulateur construit une formulation intégrale du système différentiel et des conditions aux limites (interfaces), appelée formulation variationnelle du problème. Un maillage permet de diviser le domaine  $\Omega$  en sous domaines  $\Omega_i$  (partition de  $\Omega$ ), appelés mailles. Le champ dans chaque maille est déterminé par un nombre fini de valeurs en des points choisis arbitrairement et appelés nœuds. Un exemple de maillage en 2D est représenté dans la figure (II.8) pour une structure multicouche.



**Figure II.8** : Exemple de maillage en 2D pour une structure multicouche [21].

## II.6 Conclusion

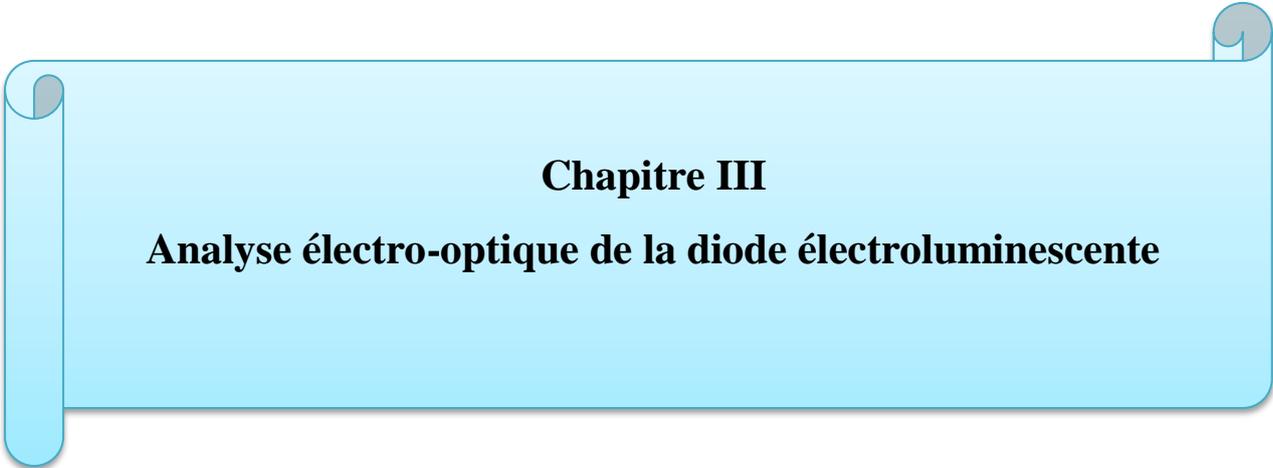
Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles physiques et le modèle numérique régissant le fonctionnement physique de la diode électroluminescente. En effet, les modèles de recombinaison et d'ionisation par impact, de recombinaison radiative, de recombinaison Auger, d'ionisation par impact électronique, de recombinaison à la surface ainsi que la modèle de transition par effet tunnel ont été brièvement expliqués.

Le chapitre suivant sera consacré à l'exploitation de ces modèles physiques et le modèle numérique pour prédire les performances de la diode électroluminescente à cinq puits quantiques.

# Bibliographie du chapitre II

- [1] **N. Vellas**, « Etudes expérimentales de transistors HFET de la filière Nitrure de Gallium pour des applications de puissance hyperfréquences », Thèse de doctorat, Université de Lille1, 2003.
- [2] **R. Aubry**, « Etude des aspects électrothermiques de la filière HEMT AlGaIn/GaN pour application de puissance hyperfréquence », Thèse de doctorat, Université de Lille1, 2004.
- [3] **E. Rosencher, B. Vinter**, « Optoélectronique ». Masson, Paris, 1998.
- [4] **H. Mathieu**, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », Dunod, Paris, 2004.
- [5] **E. Jung et al.**, « Investigating the origin of efficiency droop by profiling the temperature across the multi-quantum well of an operating light-emitting diode », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 4, p. 41114, janvier 2015.
- [6] **J. H. Park et al.**, « Distinct U-shape efficiency-versus-current curves in AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes », *Opt. Express*, vol. 23, no. 12, p. 15398, Janvier 2015.
- [7] **E. F. Schubert**, « *Light-emitting diodes* », 2nd ed. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2006.
- [8] **A. Gaci**, « Contribution à la modélisation de la jonction p-n à faible et à fort niveau d'injection », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), 1997.
- [9] **A. Hamdoune**, « Elaboration du nitrure de gallium, étude de ses propriétés et applications ». Thesis of Doctorate, University of Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [10] **R. Van Overstraeten and H. DE Man**, « Measurement of the ionization rates in diffused silicon p-n junctions », *Solid-State Electron.*, vol. 13, no. 5, pp. 583–608, May 1970.
- [11] **A. G. Chynoweth**, « Ionization Rates for Electrons and Holes in Silicon, *Phys. Rev.*, vol. 109, no. 5, pp. 1537–1540, mars 1958.
- [12] **H. Masui and al.**, « Radiative Recombination Efficiency of InGaIn-Based Light-Emitting Diodes Evaluated at Various Temperatures and Injection Currents », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. No. 25, pp. L627–L629, Jun. 2007.
- [13] **Z. Kamai**, « Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphure d'indium InP », mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

- [14] **Mélanie Rolles**, « Étude théorique de la faisabilité des LED à base de ZnGeN<sub>2</sub> », Thèse de doctorat, Université De Lorraine, 2018.
- [15] **G. A. M. Hurkx, D. B. M. Klaassen, and M. P. G. Knuvers**, « A new recombination model for device simulation including tunneling », IEEE Trans. Electron Devices, vol. 39, no. 2, pp. 331–338, Feb 1992.
- [16] **J. Piprek**, « An LED with 250% peak quantum efficiency », SPIE Newsroom, February 2015.
- [17] **M. H. Kim *et al.***, “Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes,” Appl. Phys. Lett., vol. 91, no. 18, p. 183507, 2007.
- [18] **F. Della Sala *et al.***, « Free-carrier screening of polarization fields in wurtzite GaN/InGaN laser structures », Appl. Phys. Lett., vol. 74, no. 14, p. 2002, 1999.
- [19] ATLAS User’s, « Manual-device simulation software », Atlas User’s Manual; Silvaco International Inc. Santa Clara, CA, USA. Version: 2012.
- [20] **Corentin LE Maoult**, « Etude et optimisation de l’étape de passivation des  $\mu$ LED bleues GaN-InGaN », thèse de doctorat, Université de Grenoble Alpes, 2021.
- [21] **Christophe Pinot**, « Modélisation des diodes électroluminescentes organiques multicouches dopées application à de nouvelles architectures », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique, Palaiseau, France, 2008.

A light blue horizontal banner with rounded corners and a subtle gradient. It features a scroll effect on the left and right sides, with a small grey circular element at the top right corner.

**Chapitre III**  
**Analyse électro-optique de la diode électroluminescente**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons l'outil de simulation SILVACO que nous avons utilisé pour l'étude et la simulation de deux structures des diodes électroluminescente : LED à 4 puits quantiques et l'autre à 5 puits quantiques. Nous analyserons le diagramme des bandes d'énergie, les caractéristiques électriques et optique telles que la caractéristique puissance-courant, puissance-tension. Nous examinons l'effet de température et de certains paramètres technologiques comme l'épaisseur de la couche active, la composition d'Aluminium dans l'AlGaIn...etc.

### III.2 Présentation de Silvaco

SILVACO est une société Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie ; cette société fournit des logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur. Les simulateurs TCAD-SILVACO sont conçus pour simuler et modéliser des dispositifs électroniques avant leur fabrication [1, 2]. Ces logiciels sont des outils de simulation qui permettent de faire la modélisation en microélectronique et d'envisager le comportement du dispositif. Ils utilisent des méthodes très efficaces lors du maillage du dispositif à semi-conducteurs qui permettent d'aboutir à une optimisation des solutions linéaires qui sont compliquées à calculer.

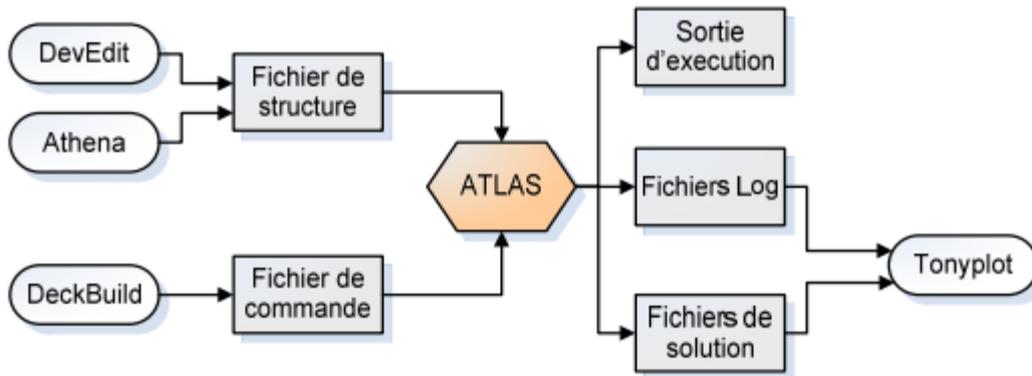
Ces logiciels permettent l'amélioration des performances du dispositif à fabriquer, de réduire le coût du développement et de fabrication [2, 3].

#### III.2.1 Le module Atlas

ATLAS est un simulateur 2D ou 3D des dispositifs basés sur la physique de 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 (III.1) 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.



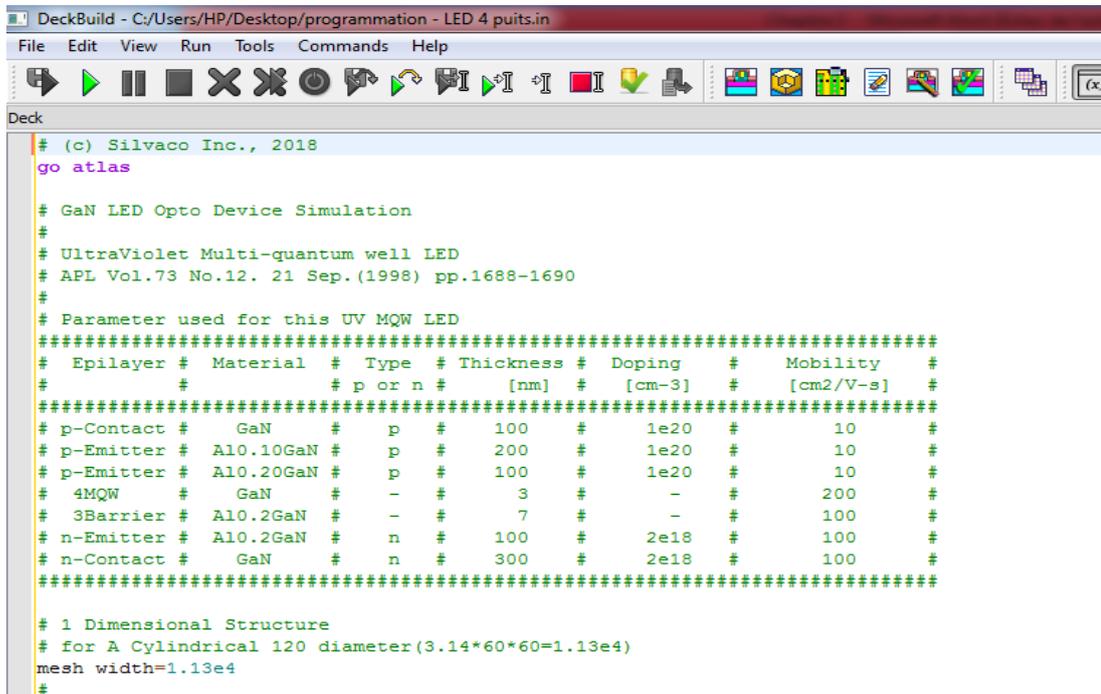
**Figure III.1 :** Entrées et sorties d'ATLAS.

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.

❖ **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'entrées 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 structurales et les paramètres des dispositifs après des tests électriques compliqués et des outputs intermédiaires [4].



```

DeckBuild - C:/Users/HP/Desktop/programmation - LED 4 puits.in
File Edit View Run Tools Commands Help
Deck
# (c) Silvaco Inc., 2018
go atlas

# GaN LED Opto Device Simulation
#
# UltraViolet Multi-quantum well LED
# APL Vol.73 No.12. 21 Sep.(1998) pp.1688-1690
#
# Parameter used for this UV MQW LED
#####
# Epilayer # Material # Type # Thickness # Doping # Mobility #
# # # p or n # [nm] # [cm-3] # [cm2/V-s] #
#####
# p-Contact # GaN # p # 100 # 1e20 # 10 #
# p-Emitter # Al0.10GaN # p # 200 # 1e20 # 10 #
# p-Emitter # Al0.20GaN # p # 100 # 1e20 # 10 #
# 4MQW # GaN # - # 3 # - # 200 #
# 3Barrier # Al0.2GaN # - # 7 # - # 100 #
# n-Emitter # Al0.2GaN # n # 100 # 2e18 # 100 #
# n-Contact # GaN # n # 300 # 2e18 # 100 #
#####

# 1 Dimensional Structure
# for A Cylindrical 120 diameter(3.14*60*60=1.13e4)
mesh width=1.13e4
#

```

Figure III.2: Environnement Deckbuild.

### III.2.2 Le module Athena

ATHENA est un simulateur qui fournit des capacités générales pour la simulation numérique, physique et bidimensionnelle du traitement des semi-conducteurs. ATHENA a une architecture modulaire que les outils et extensions sous licence suivants :

-ATHENA : cet outil effectue l'initialisation et la manipulation de la structure, et fournit des installations de dépôt et de gravure de base.

-SSUPREM4 : Cet outil est utilisé dans la conception, l'analyse et l'optimisation des structures semi-conductrices en silicium. Il simule les étapes de traitement du silicium telles que l'implantation, la diffusion et l'oxydation des ions.

-ELITE : cet outil est un simulateur de topographie 2D à usage général qui décrit avec précision une large gamme de processus de dépôt, de gravure et de refusions utilisés dans les technologies IC modernes.

-OPTOLITH : cet outil effectue une simulation de lithographie optique générale, y compris l'imagerie aérienne 2D, l'exposition de résine photosensible non planaire, ainsi que la cuisson et le développement post-exposition [5].

### III.2.3 Le module DevEdit

DevEdit est un éditeur de structure d'appareil. Il peut être utilisé pour générer un nouveau maillage sur un existant structure et peut être utilisé pour créer ou modifier un appareil. Ces appareils peuvent ensuite être utilisés en simulateurs 2D et 3D. DevEdit peut être utilisé comme simulateur sous DECKBUILD ou via une interface d'utilisateur graphique (GUI).

#### ☞ **Quand utiliser DevEdit :**

Utilisez DevEdit lorsque vous souhaitez effectuer les opérations suivantes :

- Définir un appareil de manière interactive à l'écran pour un appareil ou un processus ultérieur simulations.
- Remaillage d'une structure d'appareil entre simulation de processus et simulations de test d'appareils, lorsque le simulateur de processus ne crée pas une bonne grille pour le simulateur de dispositif.
- Remaillage d'une structure d'appareil lors d'une simulation de processus ou d'appareil, lorsque le maillage n'est pas plus adéquate pour la prochaine étape de simulation.

#### ☞ **Quand n'est pas utiliser DevEdit :**

Vous ne devez pas utiliser DevEdit pour effectuer les opérations suivantes :

- Remplacer les simulations de processus numériques là où la précision est requise.
- Maillage des structures d'appareils 1D [6].

### **III.2.4 Tony plot**

Tonyplot est un outil de traitement graphique utilisé avec tous les simulateurs SILVACO et fait partie intégrante des VWF la figure (III.3). 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 [7].

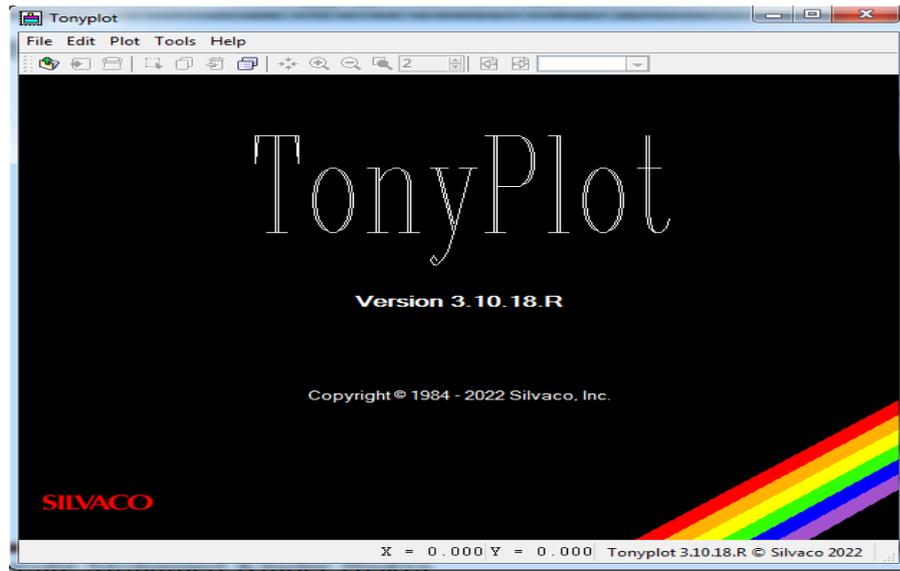


Figure III.3: Fenêtre de Tonyplot.

### III.3 Topologies des LEDs utilisées

#### III.3.1 Diode électroluminescente à 4 puits quantique d'AlGaN

La figure (III.4) montre la structure simulée de la diode électroluminescente. Les paramètres des couches sont modélisés à partir des données empiriques des composants fabriqués comme le montre la figure (III.5).

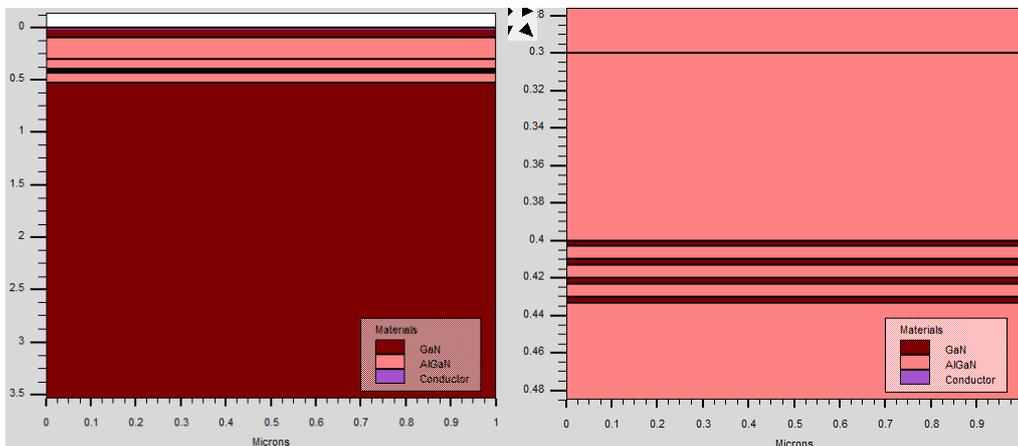


Figure III.4 : Topologie de la structure LED simulée à base d'AlGaN /GaN à 4 puits quantiques.

Afin de définir les paramètres technologiques de la structure à simuler, tels que les épaisseurs des matériaux et les longueurs des différentes couches, nous avons calibré la structure de la figure (III.5).

La topologie de la structure étudiée est celle d'une diode électroluminescente à quatre puits quantiques à base d'AlGaN/GaN. Cette structure comporte un substrat GaN d'épaisseur 3  $\mu\text{m}$ , une

couche de 100 nm de nitrure de gallium GaN, une couche de 300 nm de GaN dopée type n avec une concentration de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

Deux émetteur  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  de 200 nm dopée type p avec une concentration de  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , et un autre  $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$  de 100nm dopée type p avec une concentration de  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$

3 couches de barrière de type  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$  de 7nm non dopée séparé par les quatre puits quantiques d'AlGaN avec une épaisseur de 3nm.  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  de 100 nm dopée type n avec une concentration de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [8].



**Figure III.5 :** Coupe schématique de la structure LED AlGaN/GaN à 4 puits quantiques.

### ❖ Le maillage

Généralement pour valider les résultats de simulation, on devrait tenir compte de la qualité du maillage car les résultats obtenus en dépendent grandement.

Le principe du maillage consiste à diviser la structure considérée en un certain nombre de points qui sont des nœuds. On cherche alors à déterminer les caractéristiques électriques du dispositif en ces points.

Si le maillage est trop large, il y aura moins d'intersections donc moins de nœuds ; le temps de calcul pour résoudre les équations sera court mais les résultats seront moins bons.

Il faut bien raffiner le maillage dans les régions où le fonctionnement du dispositif se concentre. Dans le cas des LED, il est nécessaire de raffiner le maillage dans la couche active et aux interfaces couches de confinement/puits quantiques, dans l'interface où passe le courant et sous les électrodes [9].

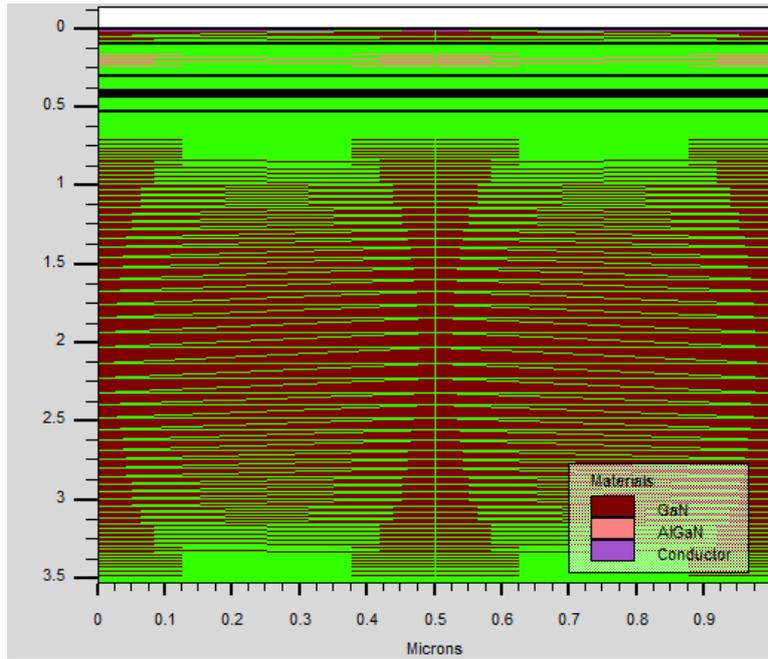


Figure III.6 : Structure maillée du LED AlGaIn/GaN à 4 puits quantiques.

### III.3.2 Diode électroluminescente à cinq puits quantique d’AlGaIn

La figure (III.7) représente la structure simulée de la diode électroluminescente à cinq puits quantiques. Les paramètres des couches sont modélisés à partir des données empiriques des composants fabriqués comme le montre la figure (III.5).

La différence entre cette topologie et la précédente à quatre puits réside dans le nombre de puits quantiques c’est-à-dire on a ajouté un puits supplémentaire tout en gardant les mêmes paramètres technologiques des autres couches.

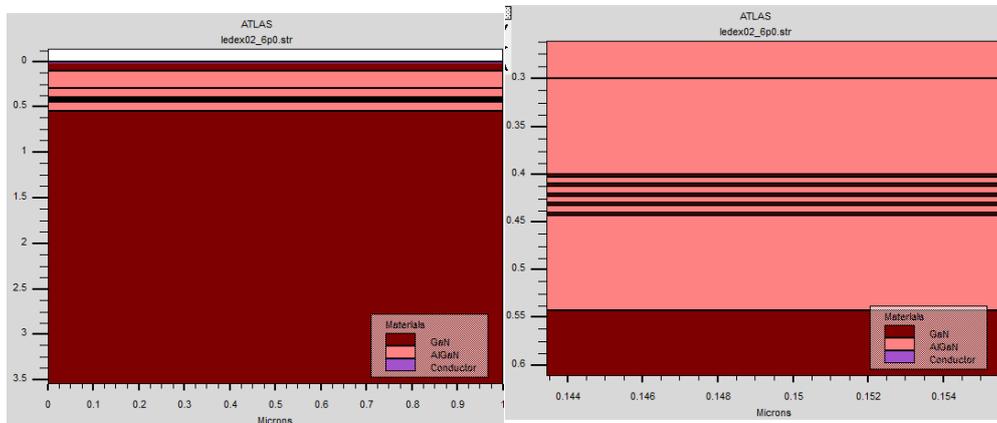


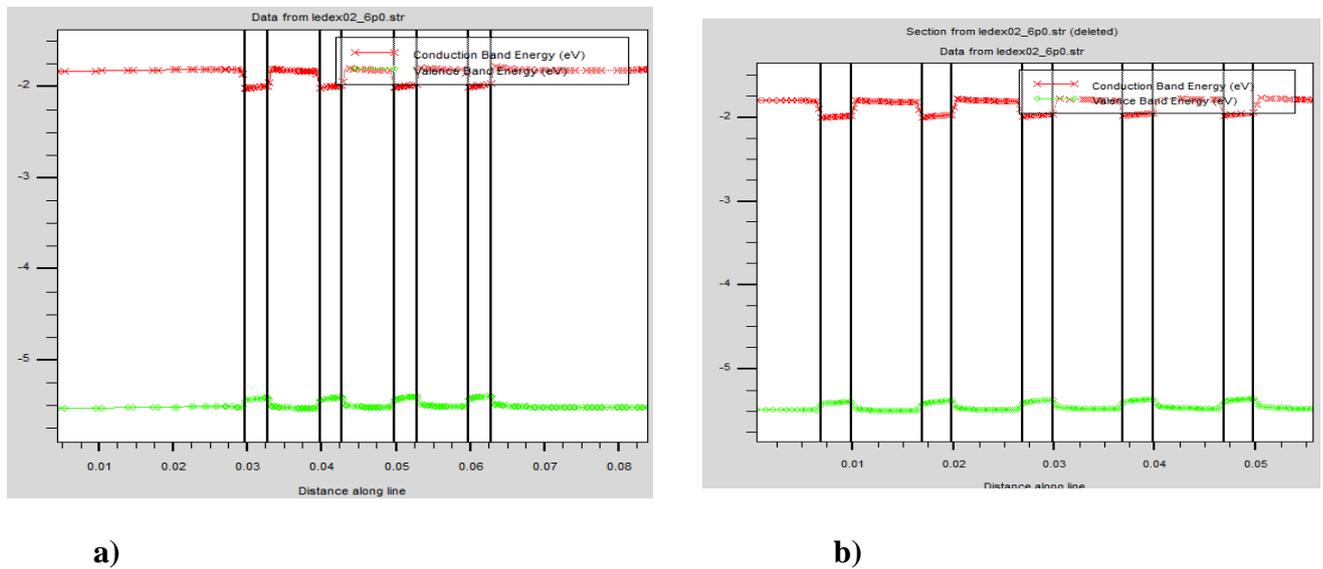
Figure III.7 : Topologie de la structure LED d’AlGaIn/GaN à 5 puits quantiques.

## III.4 Résultats et discussions

### III.4.1 Diagramme de bande d'énergie

Les figures (III.8.a, III.8.b) représentent respectivement le diagramme de bandes d'énergie des deux structures étudiées pour une épaisseur de 3nm du puits quantique. Nous y représentons les énergies de bandes de conduction et de valence en fonction de la profondeur, à partir de la surface.

La bande interdite du puits quantique est inférieure à celle des couches barrières ; cela forme alors un puits de potentiel qui capture les électrons dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence. Lorsqu'une polarisation directe est appliquée, les quasi-niveaux de Fermi chevauchent les bandes de conduction et de valence dans le puits de potentiel, ce qui entraîne une concentration élevée d'électrons et de trous dans le puits quantique.



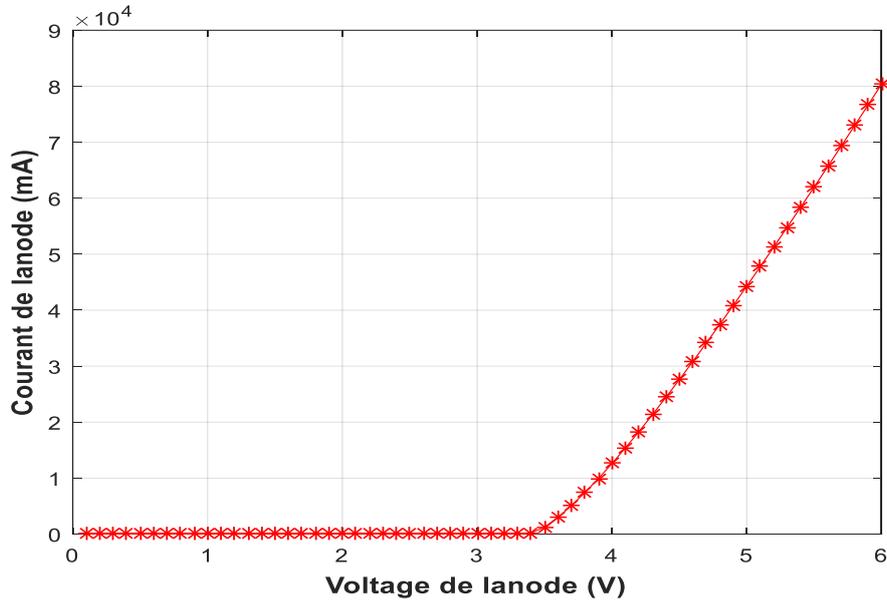
**Figure III.8 :** Diagramme de bandes d'énergie pour LED : (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques

### III.4.2 Caractéristiques courant-tension (I-V)

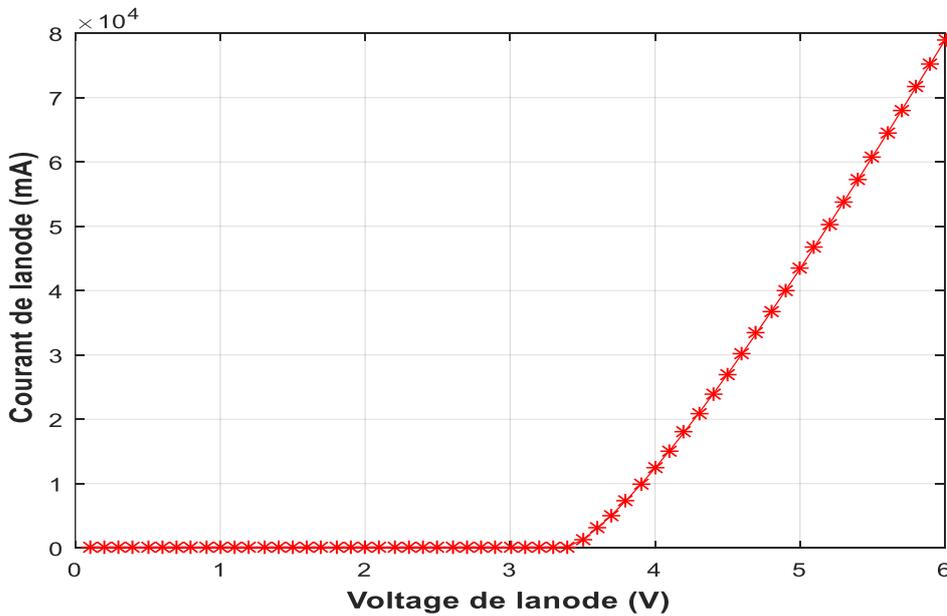
En régime de fonctionnement normal, la diode électroluminescente est polarisée en direct, c'est-à-dire le courant circule de l'anode vers la cathode, la caractéristique I-V nous indique qu'il est nécessaire d'alimenter une LED avec une tension minimale pour que celle-ci émette de la lumière appelée tension seuil.

Dans une LED à 4 et à 5 puits quantiques on observe une augmentation brusque du courant lorsque la tension est atteinte, cette tension dépend essentiellement de l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur formant la LED dans notre cas elle est de 3.5 volts d'après les figures (III.9 (a) et III.9 (b)).

Donc l'utilisation des structures à multi-puits quantique provoque un bon confinement des porteurs de charge libres dans les couches de puits ce qui augmente l'intensité de la lumière émise qui est de  $8 \times 10^4$  mA.



(a)



(b)

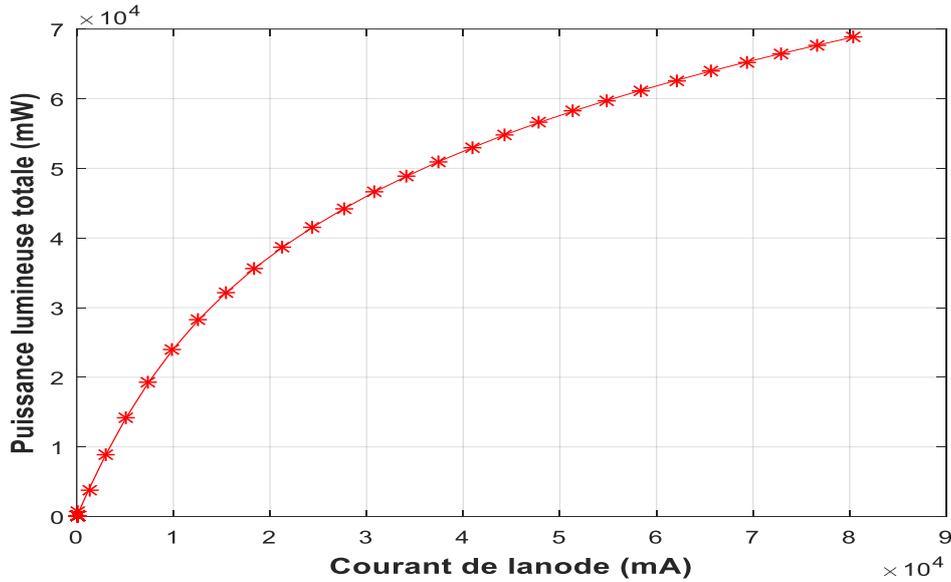
**Figure III.9:** Courant en fonction de la tension pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques

### III.4.3 Caractéristiques puissance-courant (P-I)

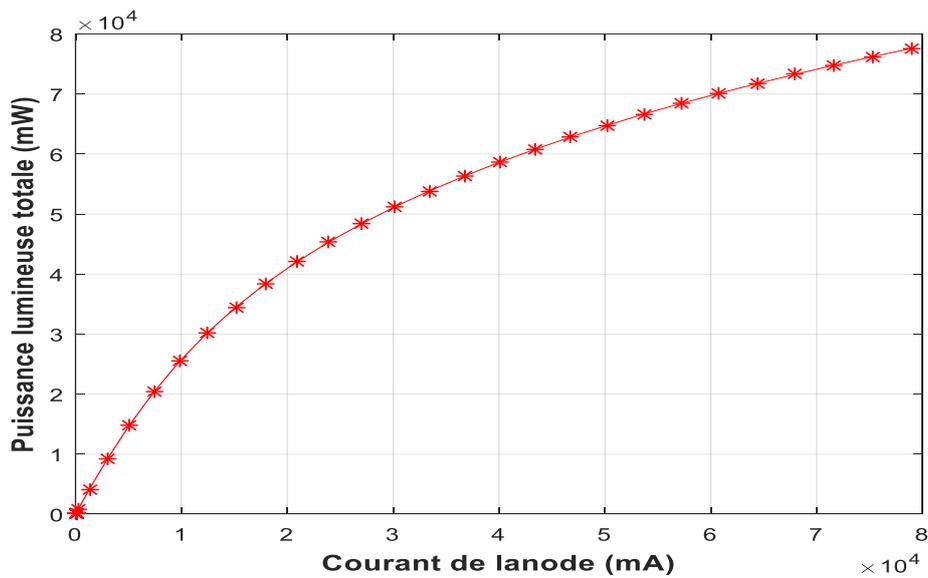
A partir de la caractéristique courant-tension (I-V) nous pouvons tracer la caractéristique puissance-courant (P-I) en appliquant la formule :  $P = U.I$ .

On observe sur les deux figures (III.10.a) et (III.10.b), la puissance lumineuse est augmenté non linéairement en fonction du courant parce que le courant qui parcourt la diode très grand.

La puissance émise par la LED à 4 puits quantiques est pratiquement  $7 \times 10^4$  mW est inférieur à la puissance de la LED à 5 puits quantiques  $8 \times 10^4$  mW, ces résultats sont illustrés dans les figures (III.10 (a) et III.10 (b)).



a)



b)

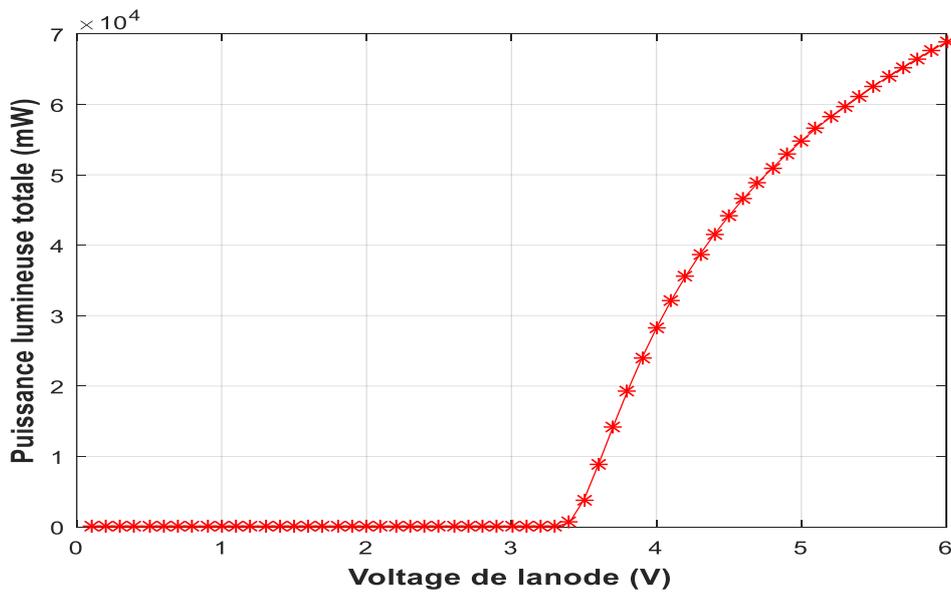
**Figure III.10:** Puissance lumineuse totale en fonction de courant pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques.

### III.4.4 Caractéristiques puissance-tension (P-V)

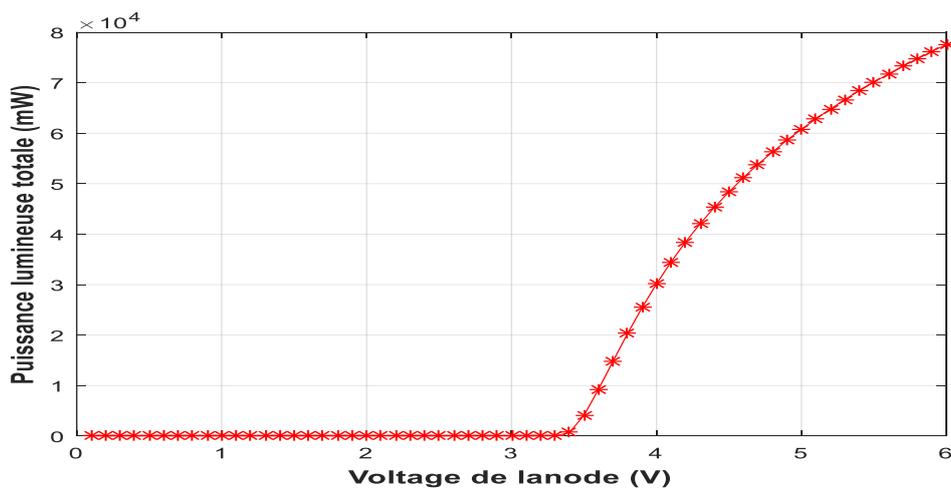
Les figures (III.11 (a), III.11 (b)) représentent la puissance en fonction de la tension appliquée, pour les deux structures et pour la même épaisseur de la couche active 3nm.

Pour LED à 4 puits quantiques : la puissance émise commence d'augmenter à une tension de 3.5V jusqu'à  $7 \times 10^4$  mW. Pour LED à 5 puits quantiques : la puissance émise commence d'augmenter à une tension de 3.5V jusqu'à  $8 \times 10^4$  mW. Donc, les deux topologies possèdent la même tension de seuil.

Ces résultats sont logiques car les puits quantiques de la première structure sont plus importants.



a)



b)

**Figure III.11:** Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques

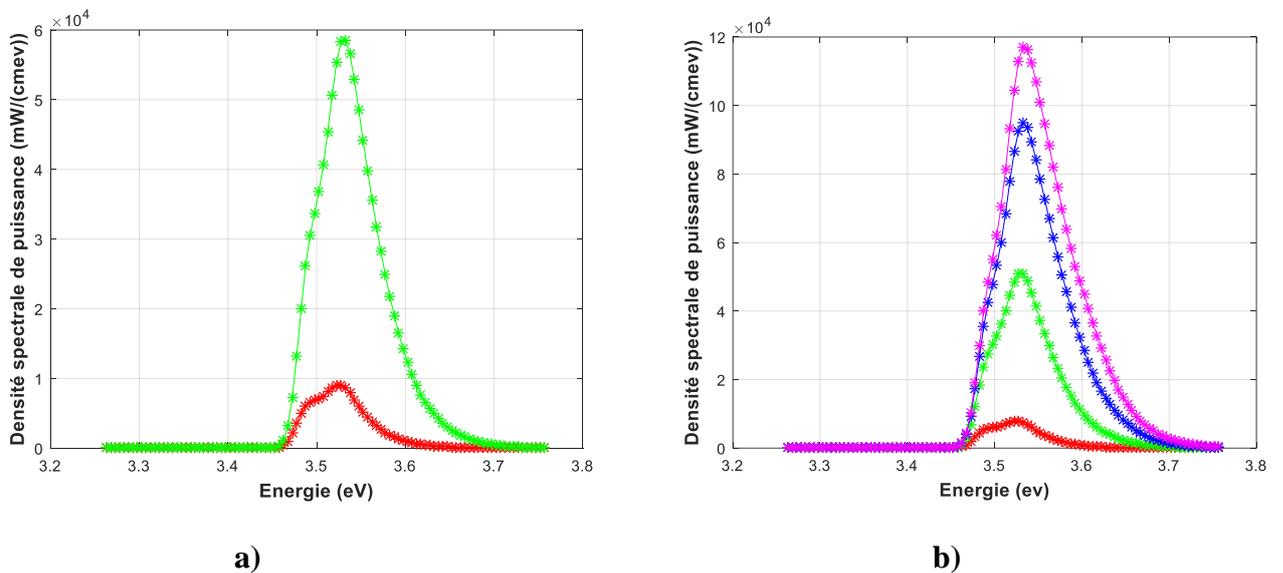
### III.4.5 Densité spectrale de puissance :

La densité spectrale de puissance est représentée par les figures (III.12 (a), III.12 (b), III.12 (c), III.12 (d)) on prend en considération les 4 polarisations de l'anode.

Les figures (III.12 (a), III.12 (b))

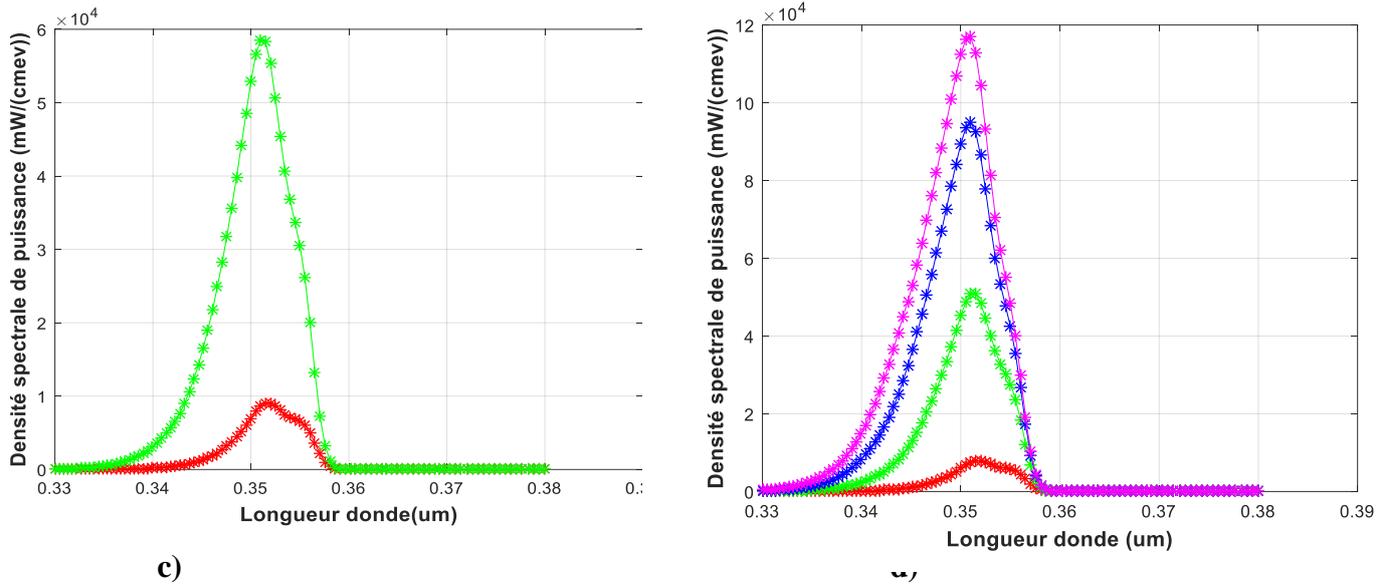
Pour une LED à 4 puits quantique la valeur maximale de la densité spectrale de puissance est de  $6 \times 10^4$  mW/(cm ev) pour une énergie de 3.55 ev.

Pour une LED à 5 puits quantiques la valeur maximale de la densité est de  $12 \times 10^4$  mW/(cm ev) pratiquement à la même énergie, cette valeur est presque deux fois supérieure à celle du LED à quatre puits quantiques.



**Figure III.12:** La densité spectrale de puissance en fonction de l'énergie pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques

Dans les figures (III.12 (c), III.12 (d)), nous avons présenté le spectre électroluminescent des LEDs à 4 et à 5 puits quantiques. Nous remarquons sur les spectres que la longueur d'onde  $\lambda_{pic}$  est 355 nm correspondant bien à la lumière ultraviolette ( $\lambda < 400$  nm). Cette émission est obtenue avec un taux d'aluminium de 20% du puits d'AlGaIn.



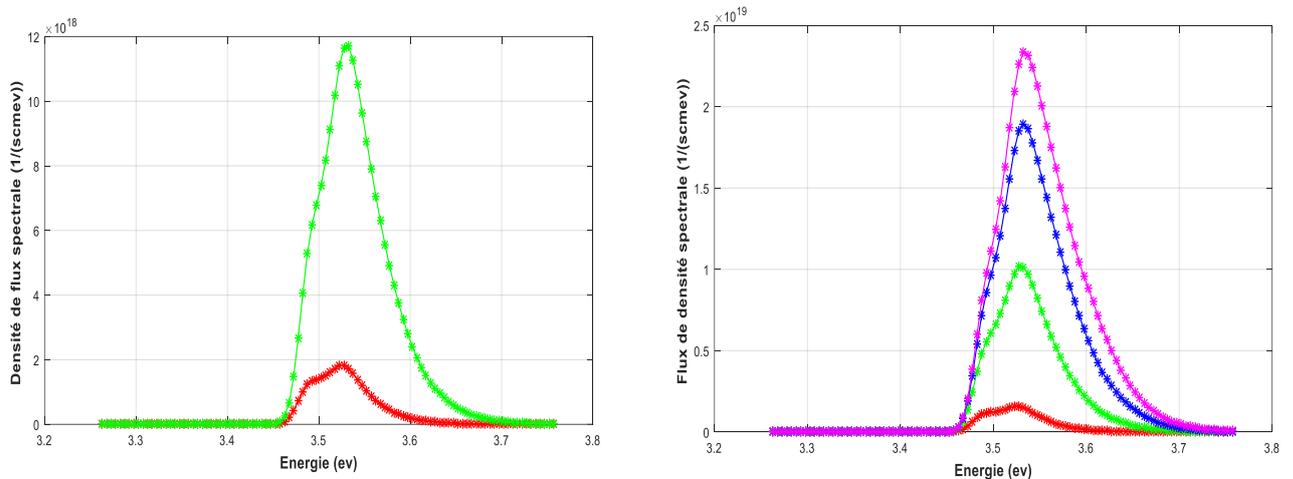
**Figure III.12 :** La densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d’onde pour LED, (c) à 4 puits quantiques, (d) à cinq puits quantiques

**III.4.6 Densité de flux spectrale**

La densité de flux spectrale est représentée par les figures (III.13 (a), III.13 (b)) pour une polarisation de 3.5 V.

Pour LED à 4 puits quantique la valeur maximale de densité de flux est environ  $12 \times 10^{18} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ eV}^{-1}$  à une énergie de 3.55 eV et pour LED à 5 puits quantiques la valeur maximale de densité de flux est  $2.5 \times 10^{19} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ eV}^{-1}$  à la même énergie.

On constate donc que la densité de flux spectrale augmente avec l’augmentation de nombre du puits quantiques.



**Figure III.13:** La densité de flux spectrale en fonction de l’énergie pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques

### III.4.7 Emission spontanée

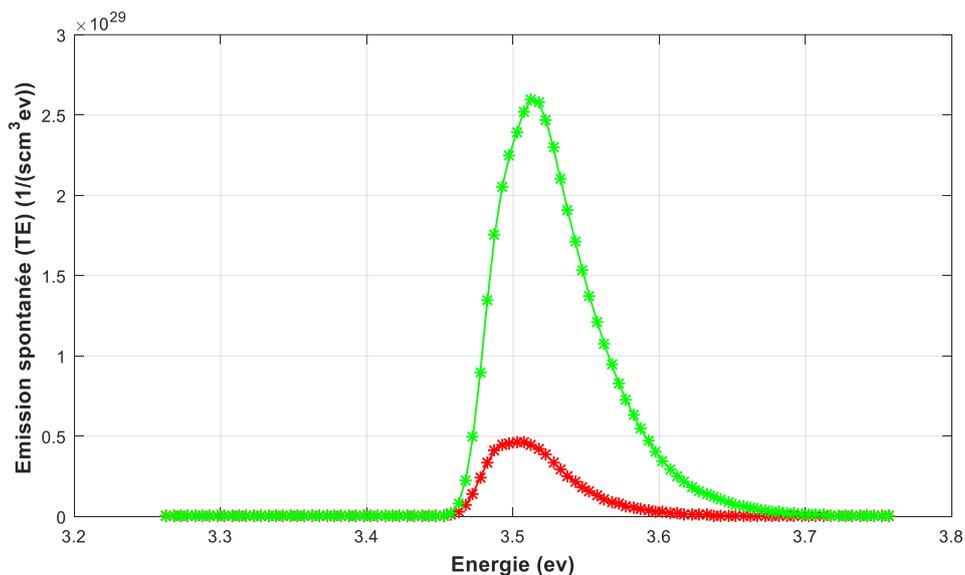
La génération de lumière dans les LED est principalement due à l'émission spontanée de photons. Les mécanismes de base responsables de la génération de photons dans le SC sont les émissions spontanées et stimulées. Les porteurs minoritaires injectés donnent de la lumière si leur durée de vie radiative est plus courte que leur durée de vie non radiative.

Les transitions bande à bande peuvent par exemple provenir de collisions avec le réseau cristallin (interactions photon-phonon), ou de cascades de transitions de basse énergie dues à la présence de niveaux électroniques profonds dans la bande interdite.

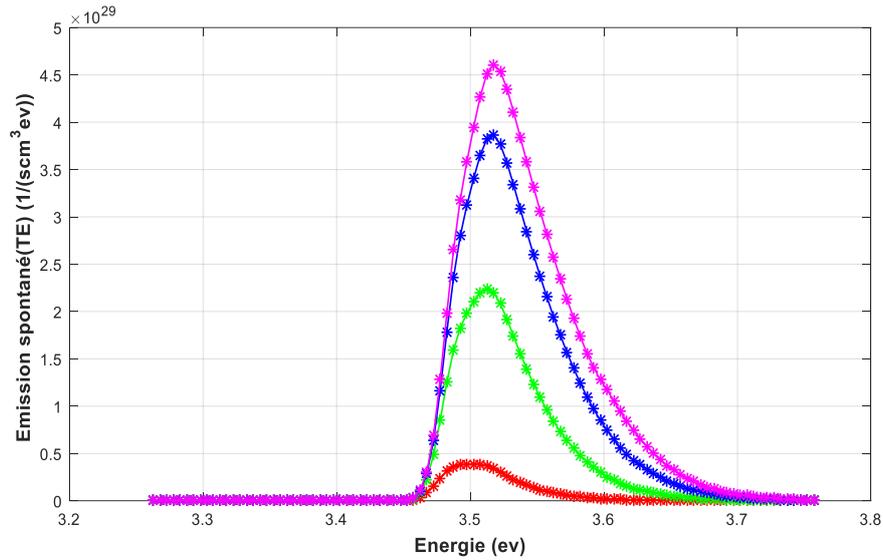
Ces niveaux électroniques profonds peuvent être dus à des impuretés chimiques, des défauts du réseau cristallin (dislocations) ainsi que des surfaces libres et des interfaces avec d'autres matériaux. La performance est limitée par ces transitions non radiatives.

Le deuxième et le plus important mécanisme de recombinaison non radiative qui limite les performances des DEL est la recombinaison Auger ; il se caractérise par des durées de vie des porteurs Auger inversement proportionnelles au carré des concentrations des régions correspondantes.

Les figures (III.14 (a) et III.14.b) montrent l'émission spontanée en fonction de l'énergie. L'émission spontanée pour la LED à 4 puits quantique est de valeur de  $3 \times 10^{29} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$  et  $4.5 \times 10^{29} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$  pour la LED à 5 puits quantiques.



a)



b)

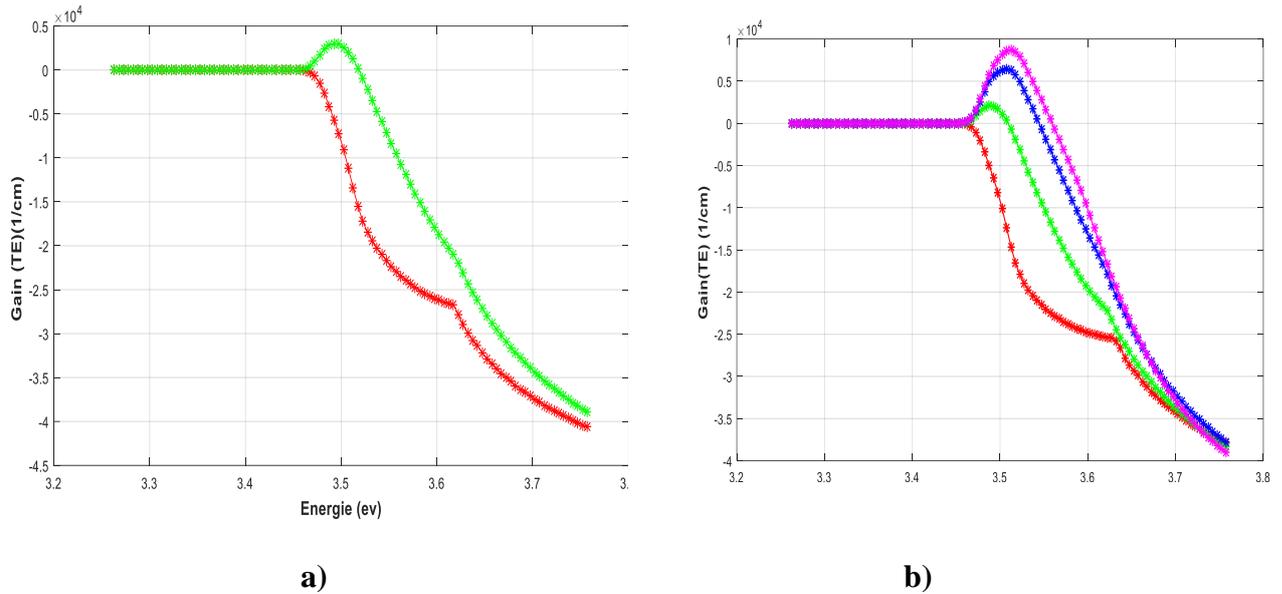
**Figure III.14 (b) :** Emission spontanée en fonction de l'énergie pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques

### III.4.8 Gain (TE)

Le gain TE (TE: champ électrique transversal) est représentés par les figures (III.15 (a), III.15 (b)). Pour LED à 4 puits quantiques, le gain commence à augmenter lentement à partir de l'énergie 3.48 eV, jusqu'à  $0.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  puis diminue plus rapidement à partir de l'énergie 3.5 eV.

Pour LED à 5 puits quantiques le gain commence à augmenter à partir de l'énergie d'environ 3.48 eV, jusqu'à  $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  puis diminue plus rapidement à partir de l'énergie 3.55 eV.

Pour le développement de l'efficacité de la LED il suffit d'augmenter le nombre de puits quantiques.



**Figure III.15:** Le gain (TE) en fonction de l'énergie pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques

### III.4.9 Rendement quantique externe

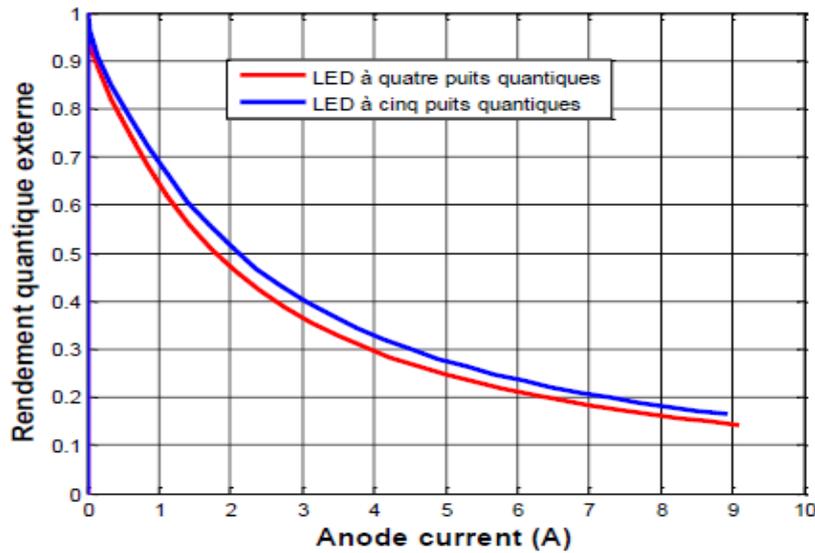
Le paramètre le plus important qui caractérise une LED est le rendement quantique externe (Wall-Plug Efficiency : WPE) ; c'est le rapport entre la puissance optique émise par la LED et la puissance électrique fournie à cette LED.

$$\eta = \frac{P_{out}}{I.V} \quad (\text{III.1})$$

I et V sont le courant et la tension appliqués [9].

La figure III.16 représente le rendement quantique externe à une température ambiante pour les LED à 4 et à 5 puits quantiques.

Pour la LED à cinq puits quantiques, le rendement quantique externe est de 70% pour un courant de 1 A et il est de 65 % pour la LED quatre puits quantiques.



**Figure III.16:** Rendement quantique externe pour la LED à 4 puits quantiques et à cinq puits quantiques

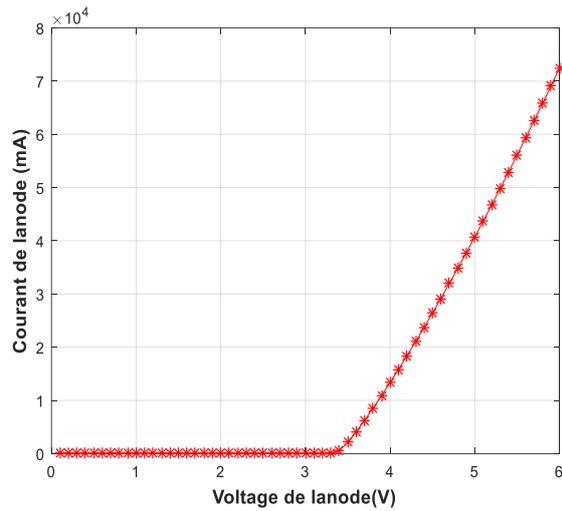
#### III.4.10 Effet de la fraction molaire $x$ de l'AlGaN

Dans le but d'étudier la fraction molaire sur les performances de la diode électroluminescente, Nous avons varié la fraction molaire  $x$  d'AlGaN, matériau constituant les puits quantiques de 0.2 à 0.1 pour les LED à 4 et à 5 puits quantiques.

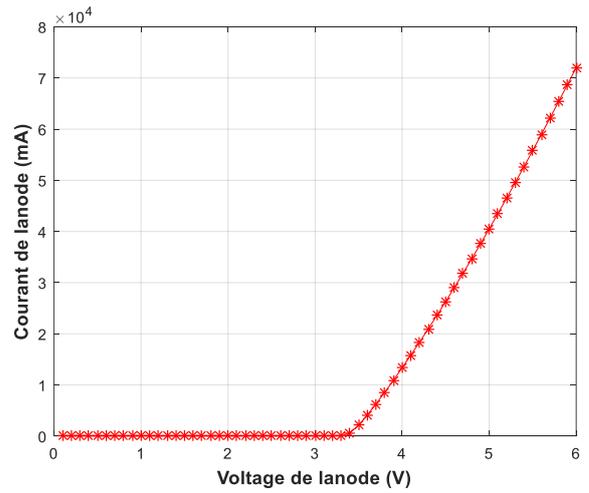
Nous traçons sur les figures (III.17, III.18, III.19 et III.20) les caractéristiques courant-tension, puissance-courant, puissance-tension et le spectre d'émission respectivement.

On constate principalement la puissance totale émise varie proportionnellement avec la fraction d'aluminium  $x$ , c'est, dire la puissance émise diminue avec la diminution de la fraction molaire  $x$ , figure (III.18 et III.19)

La densité spectrale de puissance aussi diminue en diminuant la fraction molaire d'Aluminium (Al) (figure III.20).

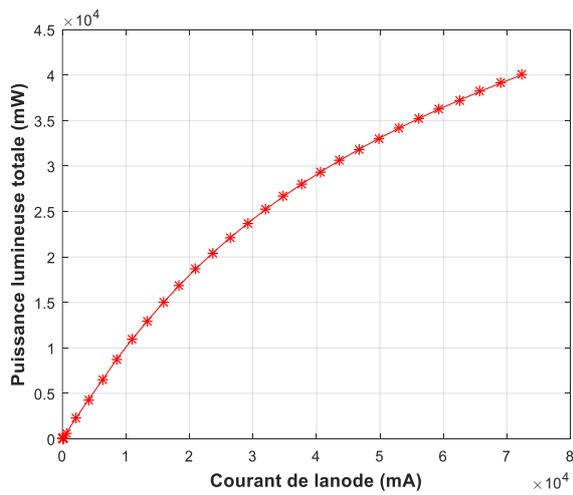


a)

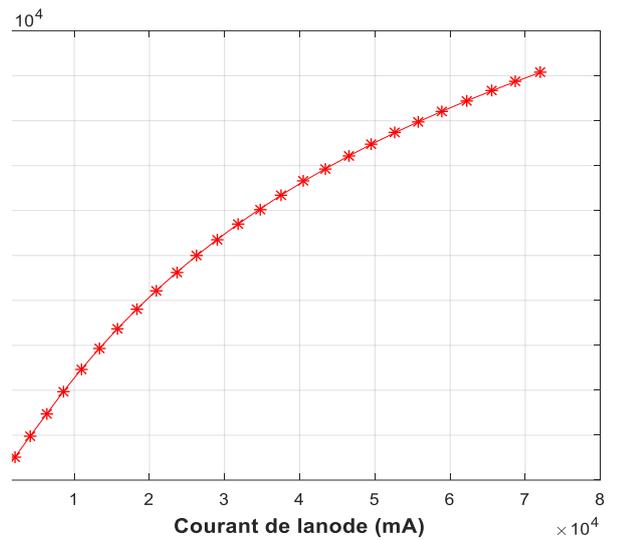


b)

**Figure III.17:** Courant en fonction de la tension pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques

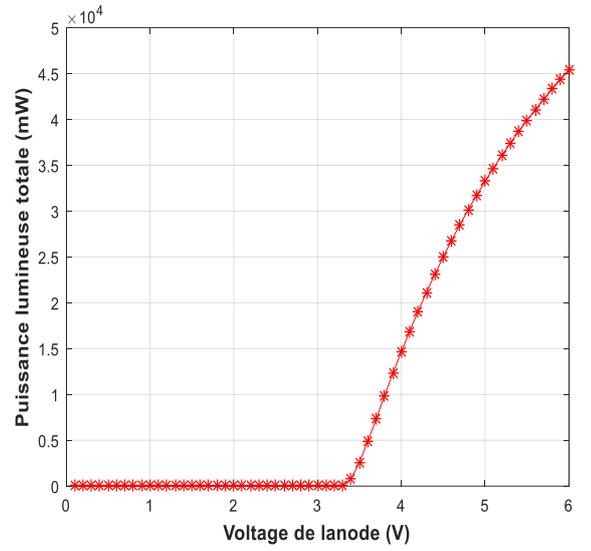
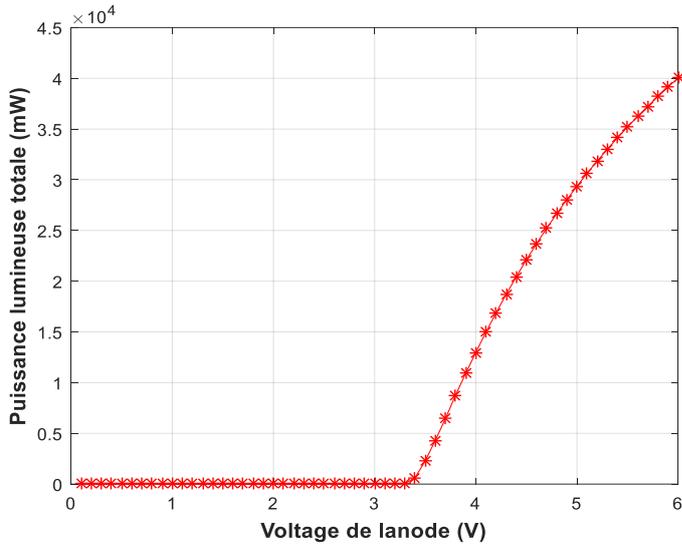


c)



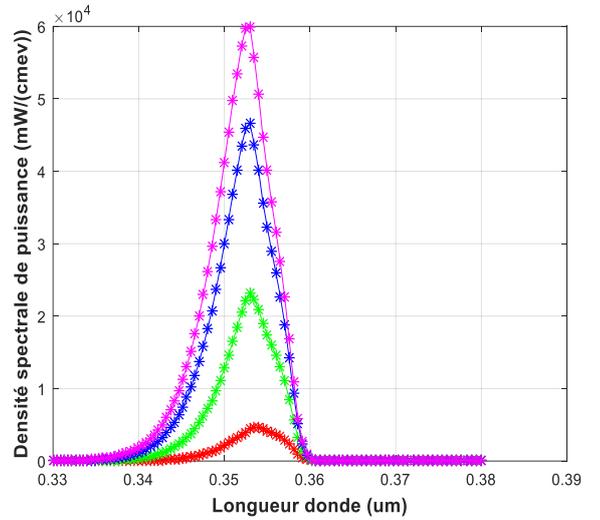
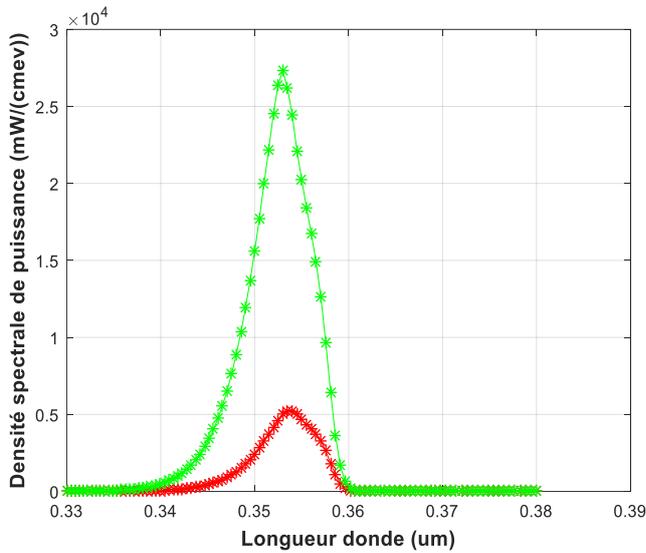
d)

**Figure III.18:** Puissance lumineuse totale en fonction de courant pour LED, (c) à 4 puits quantiques, (d) à cinq puits quantiques



e)

Figure III.19 (f) : Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED, (e) à 4 puits quantiques, (f) à cinq puits quantiques



g)

h)

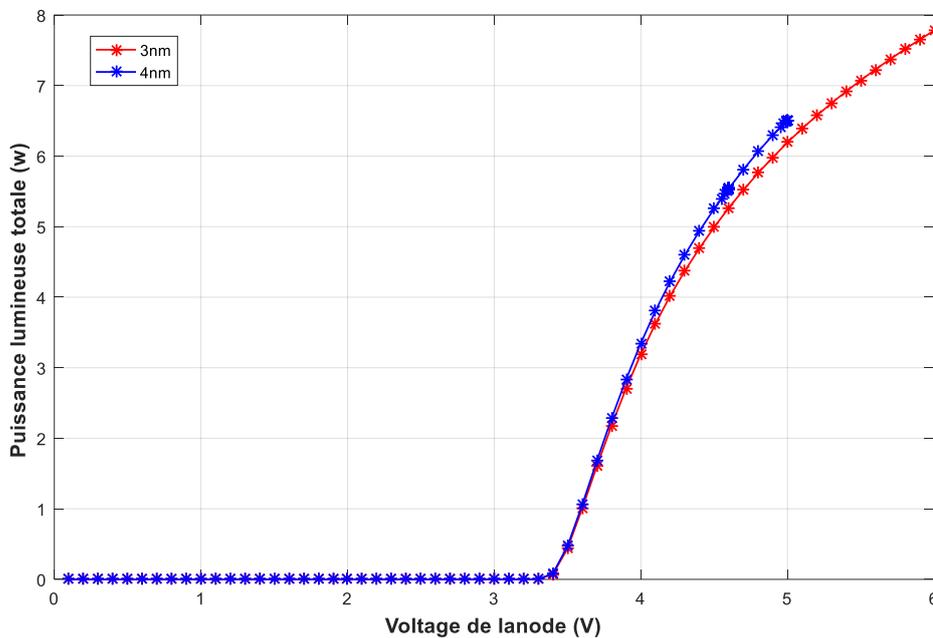
Figure III.20: La densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde pour LED, (c) à 4 puits quantiques, (d) à cinq puits quantiques

### III.4.11 Effet de l'épaisseur de la couche active

Nous varions l'épaisseur de la couche active entre 3nm et 4 nm pour LED à 4 et à 5 puits quantiques pour et la puissance en fonction du courant, de la tension et la densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde.

La puissance émise en fonction de la tension est représentée par les figures (III.21 (a) et III.21 (b)) Pour LED à 4 puits quantiques on obtient 7.9 mW à une tension de 6V et 6.5 mW à 5V respectivement pour 3 nm, 4 nm.

Pour LED à 5 puits quantiques on obtient 8.9 mW à une tension de 6V et 9 mW à 5V respectivement pour 3 nm, 4 nm.



**Figure III.21 (a) :** Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED à 4 puits quantiques.

La puissance émise en fonction du courant est représentée par les figures (III.22 (a) et III.22(b))

Pour LED à 4 puits quantiques on obtient 8mW à un courant de  $9 \times 10^4$  mA et 6.5mW à 5mA respectivement pour 3 nm, 4 nm.

Pour LED à 5 puits quantiques on obtient 8.9 mW, 9.1 mW à un courant de  $9 \times 10^4$  mA respectivement pour 3 nm, 4 nm.

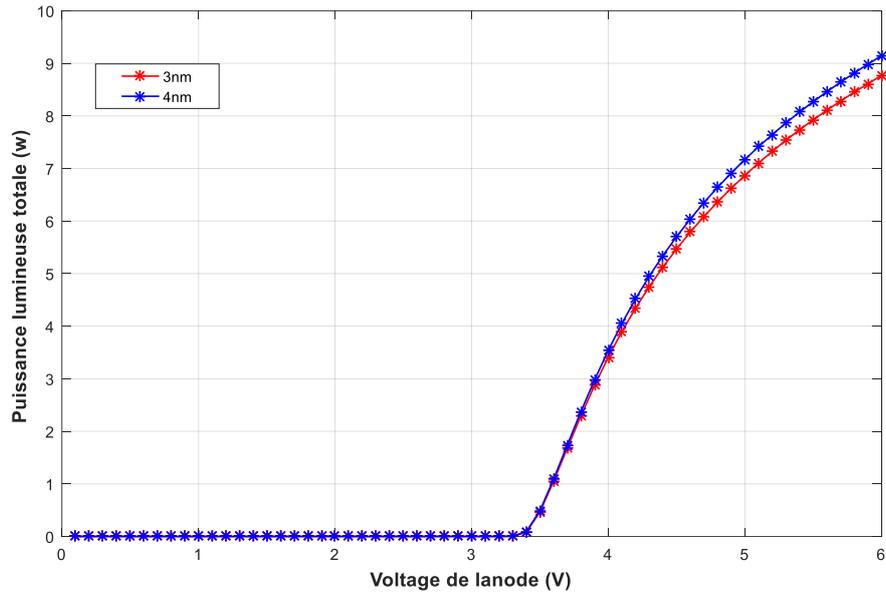


Figure III.21 (b) : Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED à 5 puits quantiques.

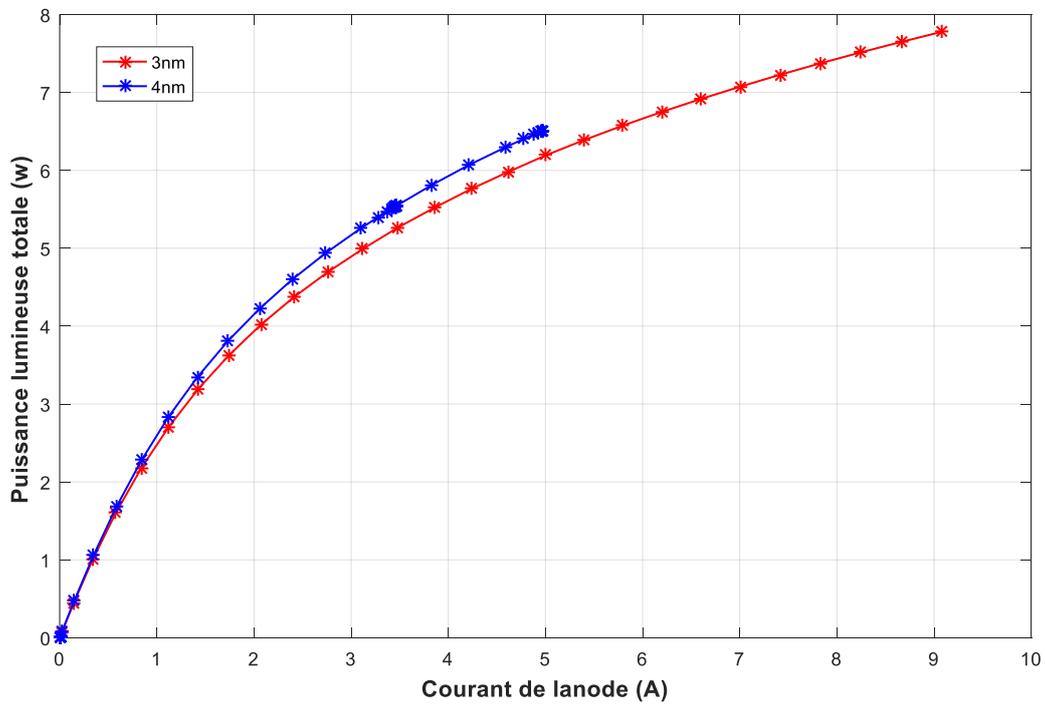
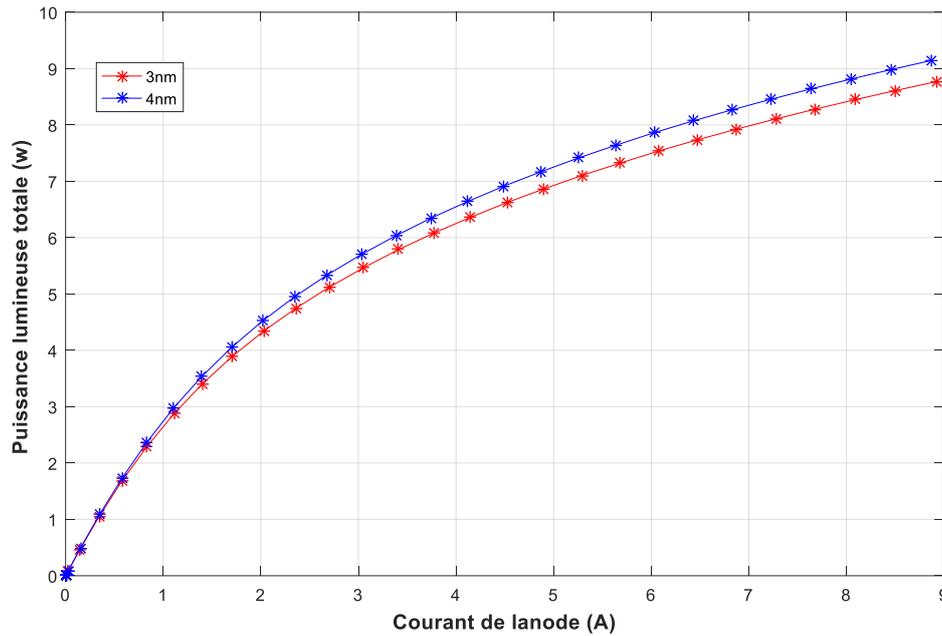


Figure III.22 (a) : Puissance lumineuse totale en fonction de courant pour LED à 4 puits quantiques.



**Figure III.22 (b) :** Puissance lumineuse totale en fonction de courant pour LED à 5 puits quantiques.

#### III.4.12 Effet de la température sur la densité spectrale de puissance

L'intensité d'émission des LED diminue avec l'augmentation de la température ; elle est due à plusieurs facteurs dépendant de la température, notamment :

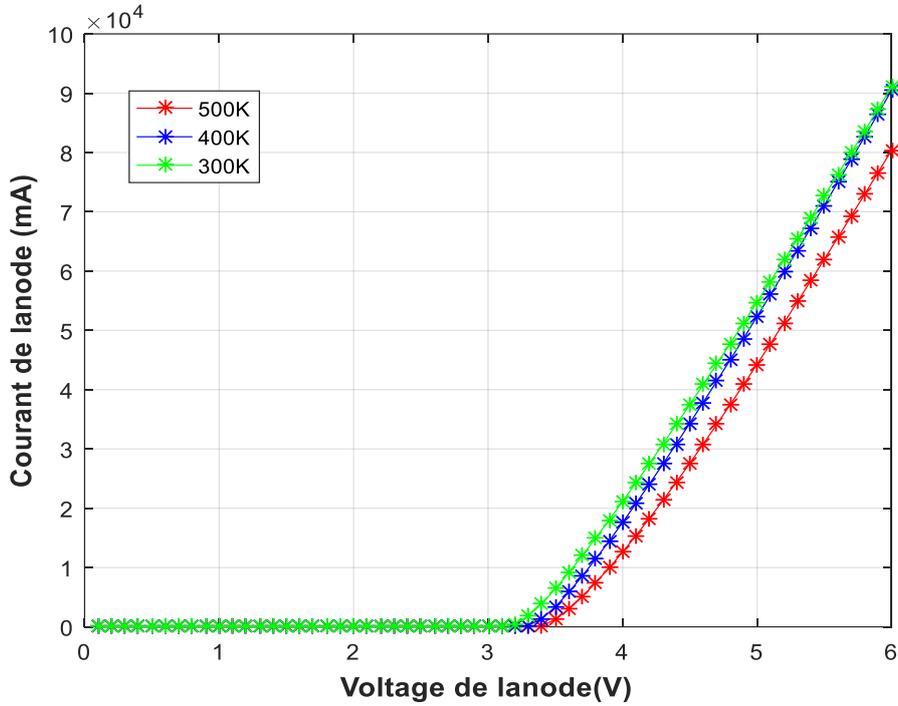
- la recombinaison non radiative par des niveaux profonds,
- la recombinaison de surface,
- la perte de porteurs par des barrières d'hétérostructure.

Nous étudions l'effet de la température qui varie de 300 K à 500 K avec un pas de 100 K, sur la caractéristique courant-tension courant; les résultats sont représentés par les figures (III.23 (a), III.23 (b)).

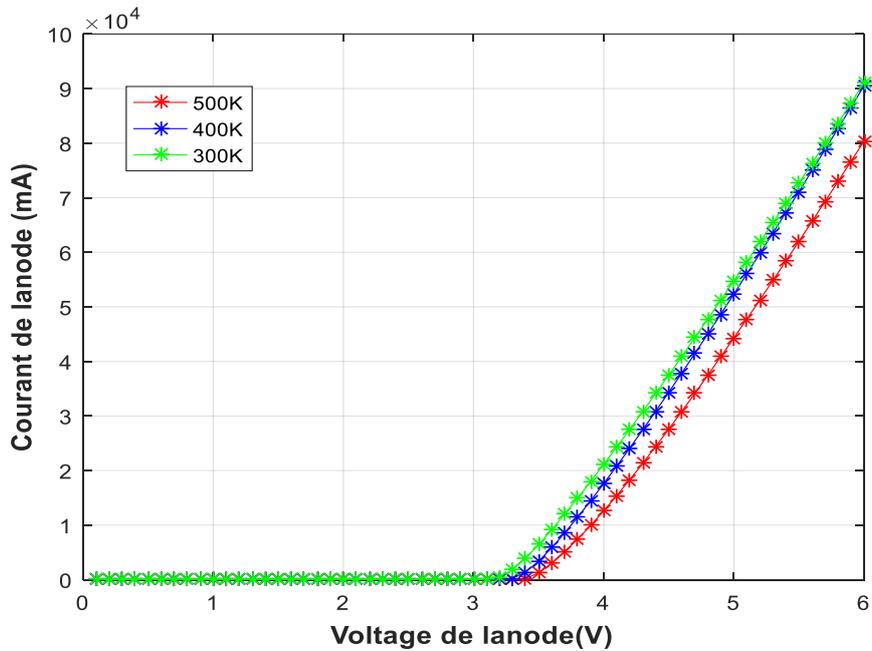
Durant la simulation nous fixons les paramètres physiques et géométriques suivants :

- L'épaisseur de la couche de contact GaN est de 100 nm dopée type p avec une concentration de  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .
- L'épaisseur des couches AlGaIn est de 3nm.
- L'épaisseur de la couche de contact GaN est de 300 nm dopée type n avec une concentration de  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

Le courant diminue avec l'augmentation de la température pour les deux structures simulées (diode LED à quatre et à cinq puits quantiques) on obtient  $8 \times 10^4$  mA,  $9 \times 10^4$  mA pour 500K, 400K et 300K respectivement.



a)



b)

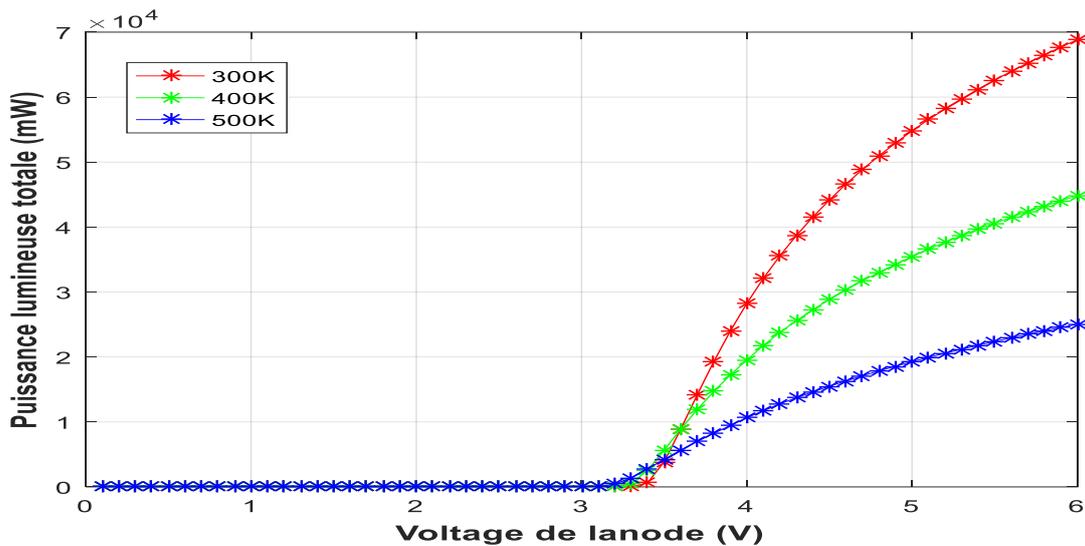
Figure III.23 : Courant en fonction de la tension pour LED à 5puits quantiques.

Sur les figures (III.24 (a) et III.24 (b)), nous étudions l'effet de la température qui varie de 300 K à 500 K, sur la puissance lumineuse en fonction de la tension et de courant ;

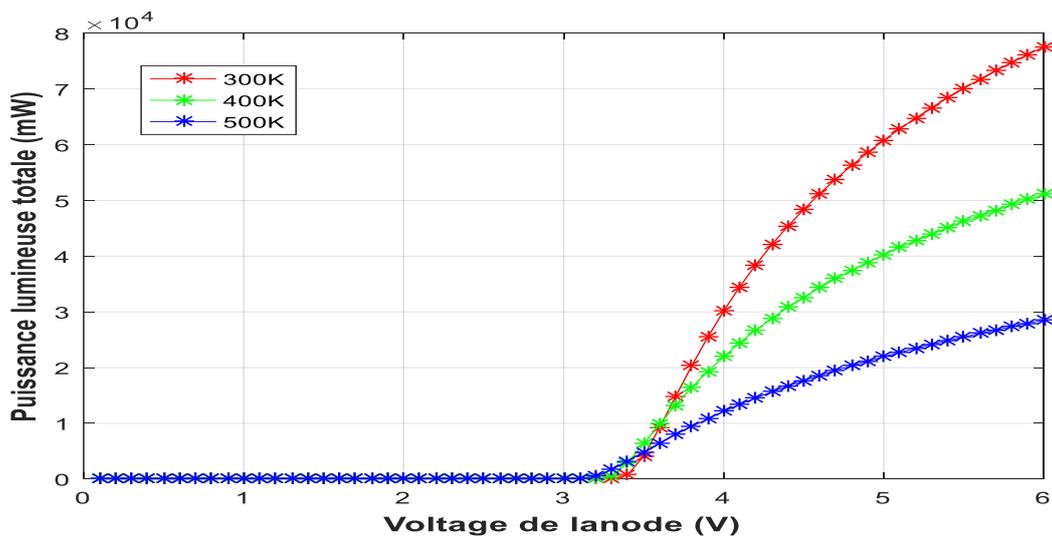
Pour LED à 4 puits quantiques les puissances sont  $7 \times 10^4$  mW,  $4.5 \times 10^4$  mW et  $2.5 \times 10^4$  mW respectivement pour 300K, 400K et 500K.

Pour LED à 5 puits quantiques les puissances sont  $8 \times 10^4$  mW,  $5 \times 10^4$  mW et  $3 \times 10^4$  mW respectivement pour 300K, 400K et 500K.

On note principalement que la puissance diminue lorsque la température augmente, pour les deux structures simulées.



a)

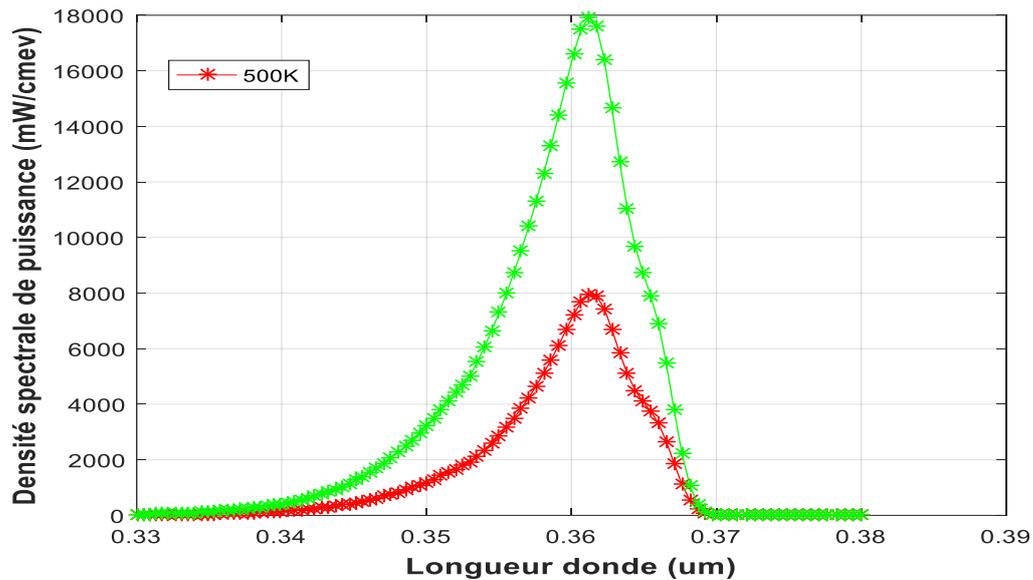


b)

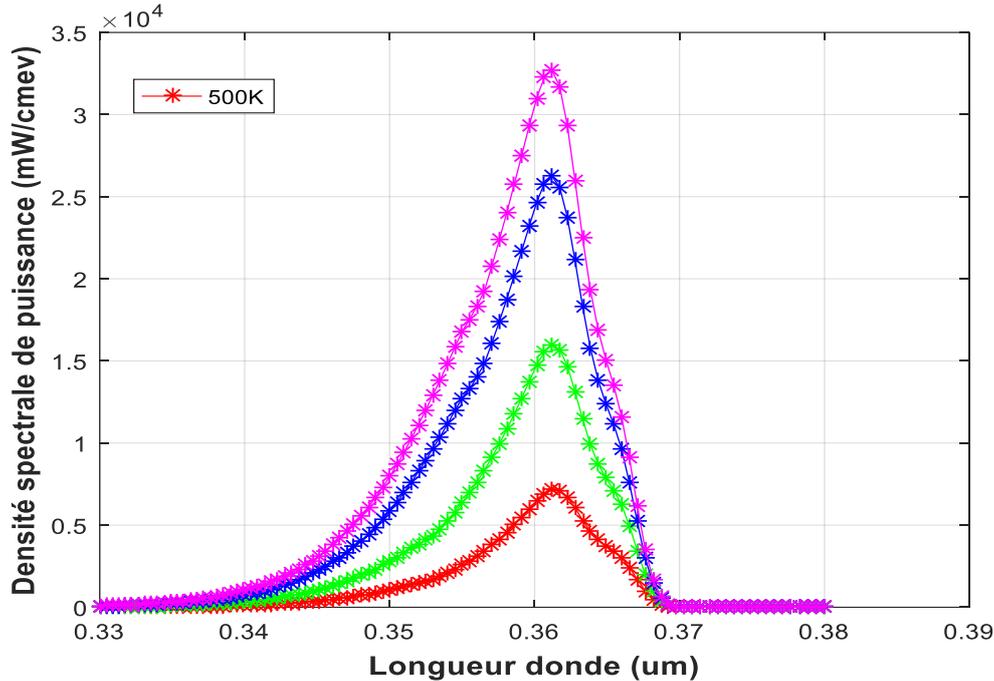
**Figure III.24:** Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED à 5 puits quantiques.

La densité spectrale de puissance est tracée en fonction de la longueur d'onde, pour deux polarisation de l'anode ( $V_{anode} = 3.5$  et  $4$  V) figure (III.25 (a) et (b)) pour les LEDs à 4 et à 5 puits quantiques respectivement.

Pour les deux configurations des LED, on remarque qu'à la température  $T=500$  K le niveau de la densité de puissance diminue. Ainsi un décalage du spectre d'émission d'environ  $360$  nm ( $V_{anode} = 4$  V) pour la LED à 4 puits quantiques, et d'environ  $364$  nm ( $V_{anode} = 6$  V) pour la LED à 5 puits quantiques.



a)



b)

**Figure III.25:** La densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde pour LED à 5 puits quantiques.

#### III.4.13 Effet de dopage de la couche d'AlGaN

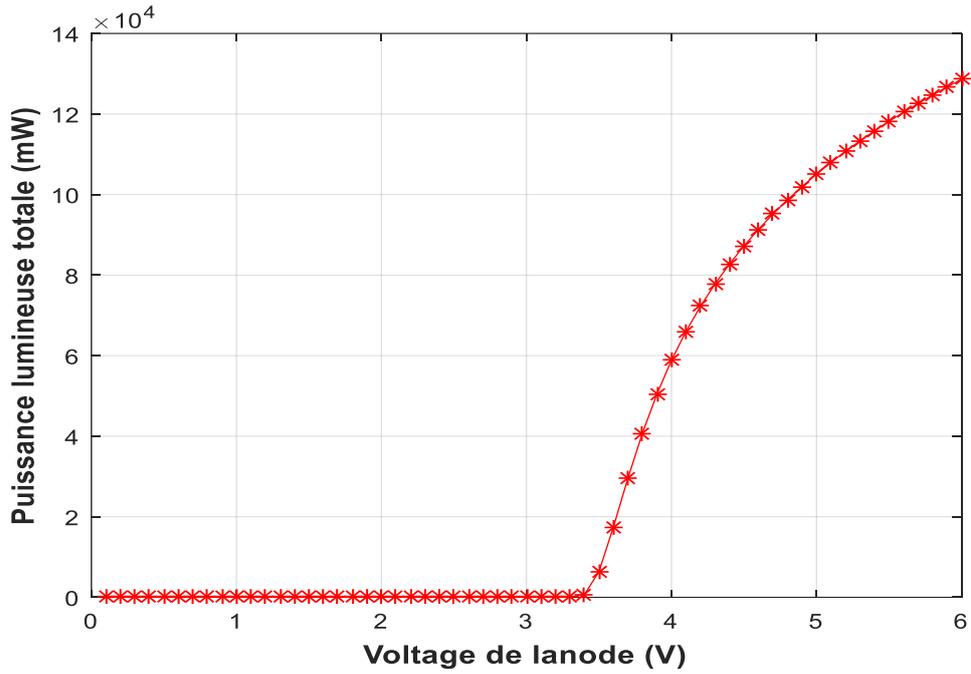
Dans cette partie nous étudions l'effet de dopage des couches AlGaN dans le but de voir l'effet de dopage sur les performances électriques et optiques sur les deux structures de LED.

Nous fixons le dopage de type p de la couche AlGaN à  $2 \times 10^{20}$  et le dopage de type n à  $8 \times 10^{19}$  avec une épaisseur de la couche active de 3nm pour LED à 4 et à 5 puits quantiques.

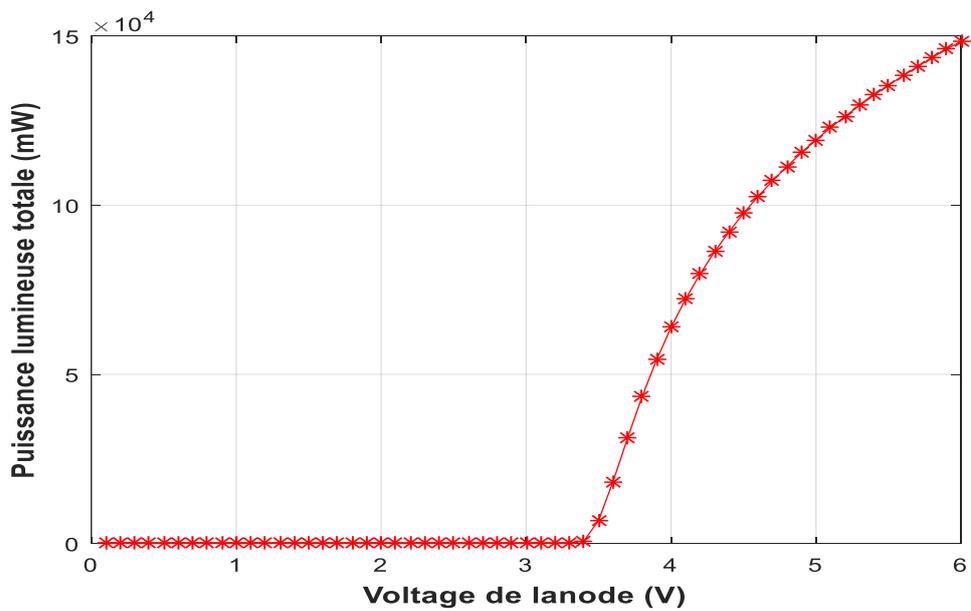
La puissance émise en fonction de la tension et la densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde sont tracés pour différents dopages. Les résultats obtenus sont représentés respectivement dans les figures (III.26, III.27).

On voit clairement une augmentation de la puissance émise avec le dopage de la couche d'AlGaN. Nous obtenons une puissance de  $13 \times 10^4$  mW pour LED à 4 puits quantiques et  $15 \times 10^4$  mW pour LED à 5 puits quantiques.

Nous observons aussi une augmentation de la densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde, pour LED à 4 puits quantiques, nous obtenons une densité de  $10 \times 10^4$  mW/(cm.ev) pour longueur d'onde de 355nm et  $2 \times 10^5$  mW/(cm ev) en fonction de la même longueur d'onde pour la LED à 5 puits quantiques.

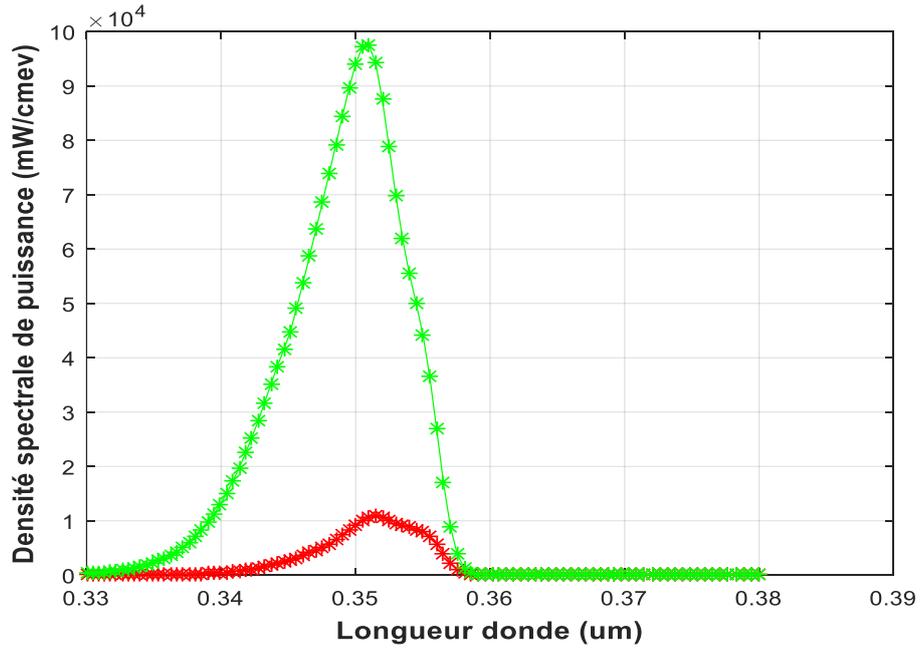


a)

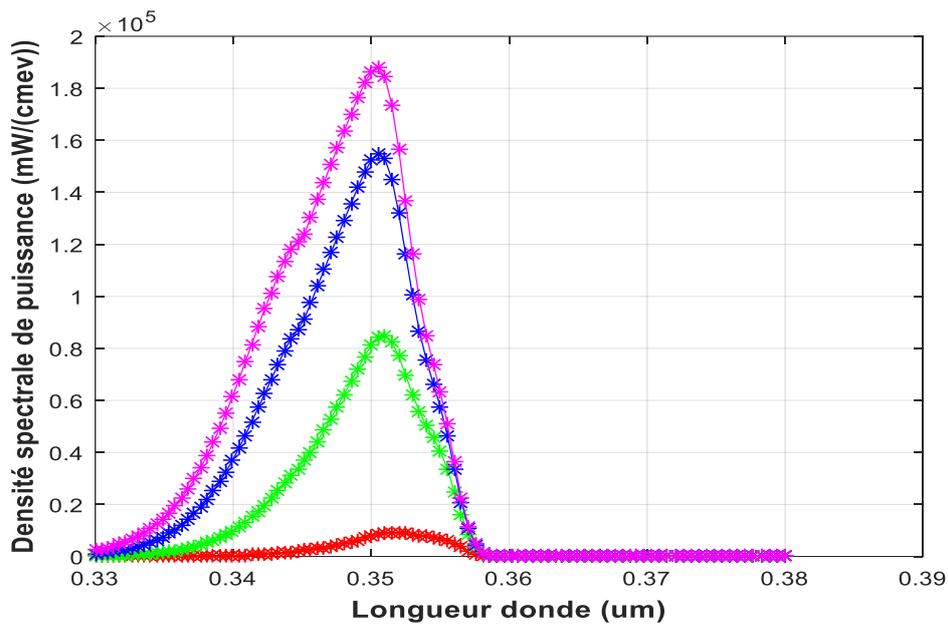


b)

**Figure III.26:** Puissance lumineuse totale en fonction de la tension pour LED, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques



a)



b)

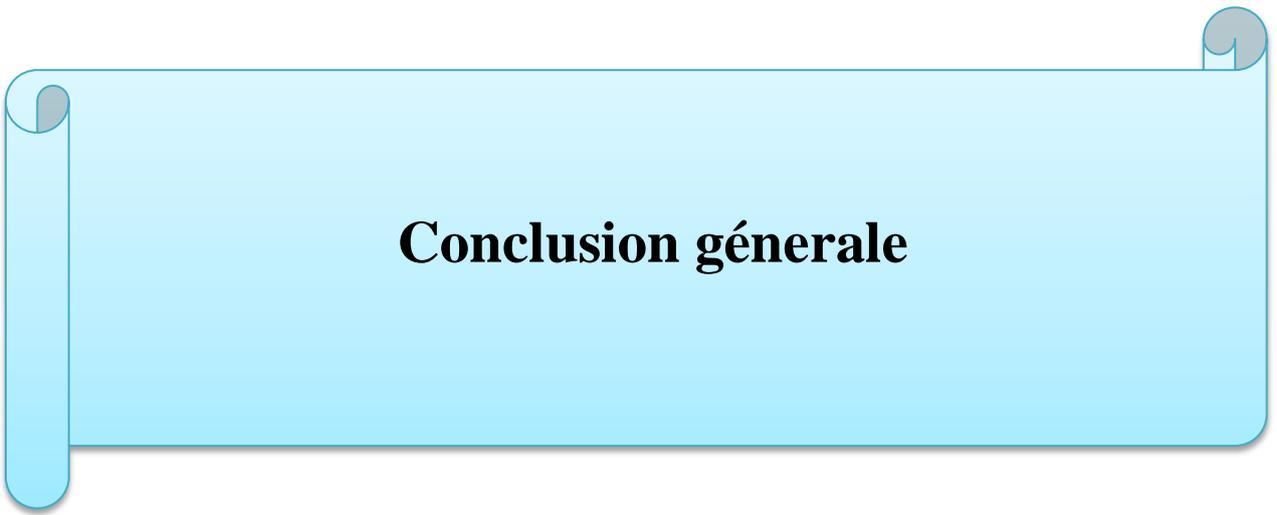
**Figure III.27:** La densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde, (a) à 4 puits quantiques, (b) à cinq puits quantiques

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation des diodes électroluminescente à 4 et à 5 puits quantiques d'AlGaIn/GaN sur substrat de GaN. Ces résultats ont été menés à l'aide du module Atlas du simulateur SILVACO. Ce dernier nous a permis de modéliser le comportement électro-optique des diodes électroluminescentes à quatre et cinq puits quantiques d'AlGaIn/GaN. Donc, nous avons pu déterminer les caractéristiques statiques (courant-tension, puissance-courant et puissance-courant), nous avons examiné l'impact de certains paramètres technologiques tels que la fraction molaire du matériau constituant les puits quantiques, l'épaisseur des couches actives, le dopage et la température sur ces performances.

# Bibliographie du chapitre III

- [1] Navickas V. B, « Microtechnologies », Vilnius gediminas technical university, 2012.
- [2] Taberkit. M « Etude conception et simulation numérique d'un transistor MOSFET biaxial contraint », Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2018.
- [3] Articale , Sin, Y. F. Z. L.W. T. N. J. K. O « Integrated power devices and TCAD simulation »,  
Number 1466583819, 9781466583818. CRC press, 2014.
- [4] Mancer Mansoura, « Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs) », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [5] J.D. Plummer, M.D. Deal, and P.B. Griffin, « Silicon VLSI Technology Fundamentals, Practice and Modeling, Prentice Hall », 2000.
- [6] Site web [www.silvaco.com](http://www.silvaco.com), Patrick Henry, January 8 2014.
- [7] M. Dilmi, « étude des performances de la cellule InGaP/GaAs/Ge par simulation », mémoire de Master, Université Mohammed Boudhiaf de faculté de technologie électronique, 2016.
- [8] silvaco ALAS UltraViolet Multi-quantum well LED APL Vol.73 No.12. 21 pp.1688-1690 ,Sep 1998.
- [9] Y. Gwangseo, J. Younghu, K. Byung-Ja, and K. Jihyun, « Electrical and optical damaget GaN-base light-emittingdiodes by 20-MeV proton irradiation. Science of Advanced Materials 8, 160 », 2016.



## **Conclusion générale**

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et la simulation de diodes électroluminescentes ultraviolette à quatre et à cinq puits quantiques en AlGaIn/GaN. Les épaisseurs des puits quantiques et des couches de confinement sont 3 nm et 7 nm respectivement dont l'objectif principal est de déterminer les performances électriques et optiques des deux diodes électroluminescentes.

Cette étude a été menée à l'aide du simulateur Silvaco. En effet, nous avons exploité un modèle électro-optique en mettant en évidence tous les paramètres physiques, électriques et optiques des matériaux AlGaIn et GaN et les paramètres technologiques nécessaires à la conception de nos composants.

Dans un premier temps, pour les deux diodes, et pour le même jeu de paramètres technologiques nous avons déterminé les caractéristiques statiques (courant-tension, puissance-courant et puissance-courant) et la densité spectrale.

Dans un second temps, nous avons examiné l'impact de certains paramètres technologiques tels que la fraction molaire du matériau constituant les puits quantiques (AlGaIn), l'épaisseur des couches actives, le dopage et la température sur les performances de nos diodes.

En effet, ce projet nous a permis une bonne compréhension et explication des mécanismes physiques électriques et optique dans le monde des diodes électroluminescente ultraviolette AlGaIn/GaN. Aussi, cette étude a permis de mettre en évidence une comparaison entre les deux structures simulées et l'effet de l'insertion du cinquième puits sur les performances de la diode LED.

En termes de perspectives, nous suggérons :

- L'étude des structures plus complexe avec des nouveau matériaux et nouvelle architecture.
- Développer et concevoir une structure LED sous logiciel Athéna.
- Conception des diodes électroluminescentes multi-longueurs d'onde.
- L'amélioration du rendement des diodes électroluminescentes en incorporant des matériaux plus résistifs.