



HAL
open science

Etude des caractéristiques électro-optiques de micro-LED GaN pour application aux micro-écrans haute-luminance

François Olivier

► **To cite this version:**

François Olivier. Etude des caractéristiques électro-optiques de micro-LED GaN pour application aux micro-écrans haute-luminance. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAT019 . tel-01868252

HAL Id: tel-01868252

<https://theses.hal.science/tel-01868252>

Submitted on 5 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE
GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Nano Electronique et Nano Technologies**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

François OLIVIER

Thèse dirigée par **François TEMPLIER**

préparée au sein des laboratoires LCV et LCEM du CEA LETI
dans l'École Doctorale Electronique, Electrotechnique,
Automatique, Traitement du Signal (EEATS)

Etude des caractéristiques électro-optiques de micro-LED GaN pour application aux micro-écrans haute luminance

Thèse soutenue publiquement le **15 mars 2018**
devant le jury composé de :

Dr Catherine BRU-CHEVALLIER

Directrice de recherche, CNRS, Présidente du Jury

Dr Raphael CLERC

Professeur, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, Rapporteur

Dr Maria TCHERNYCHEVA

Chercheur, Université Paris-Sud, CNRS, Rapporteur

Dr François TEMPLIER

Directeur de recherche, CEA-LETI, Directeur de thèse

Dr Roland MADAR

Directeur de recherche émérite, CNRS, Invité

Dr Ludovic DUPRE

Ingénieur de recherche, CEA-LETI, Encadrant, Invité

Dr Anis DAAMI

Ingénieur de recherche, CEA-LETI, Encadrant, Invité



Remerciements

Labor omnia vincit improbus. Un travail acharné vient à bout de tout. Un travail de trois années, pour lesquelles de simples remerciements semblent peu de choses devant le nombre et la qualité des personnes qui m'ont permis de mener à bien ma thèse. Je me prête cependant volontiers à l'exercice, en espérant que ces quelques lignes suffiront à exprimer ma gratitude.

Au sein de mon laboratoire d'accueil, au CEA LETI de Grenoble, mes premiers remerciements vont vers mon directeur de thèse, François TEMPLIER, pour m'avoir accordé sa confiance pour mener ce travail de thèse. Sa disponibilité et ses compétences m'ont guidé jour après jour. J'espère avoir été un doctorant à la hauteur de sa direction. Merci à Stéphanie LE CALVEZ et Stéphanie GAUGIRAN de m'avoir accueilli au sein de leur laboratoire, quand bien même je monopolisais tous les tableaux blancs de l'open-space. Un grand merci collectif à toutes celles et tous ceux qui font la vie du laboratoire et contribuent à créer un environnement de travail privilégié. Une énumération serait trop longue ici pour exprimer ma gratitude envers chacun d'entre eux pour leur soutien. J'exprime un remerciement tout particulier à Anis DAAMI qui, dès son arrivée au laboratoire, a accepté de suivre ma thèse. Ses qualités humaines et scientifiques, ainsi que sa propension à s'écrier « c'est une publi ça ! » à chaque nouveau résultat furent une aide précieuse au quotidien. Je pense aussi aux anciens du laboratoire qui sont partis vers d'autres aventures et qui m'ont aidé pendant leur présence, notamment Eddie et Fabian. Enfin, merci aux doctorants du laboratoire pour tous les moments d'entraide et de convivialité. Je leur souhaite le meilleur, à commencer par devenir docteur !

J'adresse mes remerciements à l'ensemble des autres laboratoires du LETI qui m'ont accueilli et aidé au cours de ma thèse, que ce soit pour des besoins de process, de caractérisation ou de simulation. En particulier, je tiens à exprimer ma reconnaissance à Ludovic DUPRE, qui a accepté d'assurer l'encadrement de ma thèse. La qualité de son travail, ainsi que celle de toute l'équipe en charge du développement process, fut une chance inestimable pour mes recherches.

Je remercie Raphael CLERC et Maria TCHERNYCHEVA d'avoir accepté de rapporter ma thèse, ainsi que Roland MADAR et Catherine BRU-CHEVALLIER pour examiner ce travail. Ces trois années de thèse sont l'aboutissement de 25 années d'apprentissage et de savoir. Aussi je tiens ici à remercier chaudement l'ensemble des professeurs qui ont jalonné ma scolarité. Puisse ce manuscrit de thèse leur faire honneur.

Enfin, mes derniers remerciements s'adressent à mes amis et à ma famille pour leur soutien indéfectible. Je pense en particulier à mes parents. Qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de mon immense gratitude, et affection.

Merci à tous

Sommaire

Introduction générale	1
I Les matrices de micro-LED pour l'affichage	3
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 LES ECRANS : TECHNIQUES, BESOINS ET APPLICATIONS.....	5
I.2.1 <i>Etat de l'art des écrans</i>	5
I.2.2 <i>Les nouvelles applications et leurs besoins</i>	10
I.2.3 <i>Synthèse</i>	12
I.3 LES DIODES ELECTROLUMINESCENTES.....	13
I.3.1 <i>Physique des semi-conducteurs</i>	13
I.3.2 <i>Le nitrure de gallium (GaN) et ses alliages</i>	20
I.3.3 <i>Performances et rendements d'une LED</i>	26
I.4 APPLICATIONS DES LED	35
I.4.1 <i>Les LED pour l'éclairage</i>	35
I.4.2 <i>Les écrans LED</i>	36
I.5 PRESENTATION DE LA THESE.....	41
I.5.1 <i>Spécificités des matrices de micro-LED</i>	41
I.5.2 <i>Les objectifs de thèse</i>	42
I.5.3 <i>Plan du manuscrit</i>	43
I.6 CONCLUSION	43
I.7 REFERENCES	44
II Optimisation du rendement électro-optique de LED à travers l'étude du procédé de fabrication	49
II.1 INTRODUCTION	51
II.2 EPITAXIES LED	51
II.2.1 <i>Choix de l'épitaxie</i>	51
II.2.2 <i>Etude de l'épitaxie utilisée</i>	52
II.3 PRESENTATION DU PROCEDE DE MATRIÇAGE ET DES MOYENS DE CARACTERISATION.....	57
II.3.1 <i>Principales étapes du procédé de fabrication</i>	57
II.3.2 <i>Méthode de caractérisation des matrices de micro-LED</i>	60
II.3.3 <i>Caractérisations du process initial : LOT 1</i>	61
II.4 ETUDE DE L'HOMOGENEITE D'EMISSION	65
II.4.1 <i>Observations de l'émission</i>	65
II.4.2 <i>Caractérisations de la zone dégradée</i>	68
II.4.3 <i>Amélioration process : LOT 2</i>	72
II.5 ETUDE DE LA METALLISATION SUPERIEURE	75
II.5.1 <i>Les différentes fonctions du métal P</i>	75
II.5.2 <i>Etude de l'ohmicité du contact P</i>	75
II.5.3 <i>Etude de la réflectivité du métal P</i>	79
II.5.4 <i>Amélioration process : LOT 3</i>	84
II.6 CONCLUSION	90
II.7 REFERENCES	91
III Influence de la taille des LED sur leurs performances électro-optiques	93
III.1 INTRODUCTION	95
III.2 EFFETS DE LA TAILLE DES LED SUR LEUR PERFORMANCE.....	95
III.2.1 <i>Etude bibliographique</i>	95
III.2.2 <i>Caractérisations électro-optiques</i>	99

III.2.3	<i>Etude de l'inhomogénéité d'émission sur le droop</i>	107
III.2.4	<i>Synthèse</i>	109
III.3	MODELISATION ET SIMULATION.....	110
III.3.1	<i>Le modèle ABC</i>	110
III.3.2	<i>Extraction des paramètres A, B et C</i>	110
III.3.3	<i>Etude en fonction de la taille</i>	113
III.3.4	<i>Utilisation du nouveau modèle ABC</i>	114
III.4	ETUDE DES BORDS DE PIXEL.....	117
III.4.1	<i>Etude bibliographique</i>	117
III.4.2	<i>Luminescence en bord de pixel</i>	118
III.4.3	<i>Estimation de la largeur dégradée par l'étude du rendement</i>	121
III.4.4	<i>Etudes complémentaires en cathodoluminescence</i>	122
III.4.5	<i>Caractérisation IVL de diodes de même surface, au périmètre différent</i>	124
III.5	ETUDE DES LED VERTES	127
III.5.1	<i>Introduction</i>	127
III.5.2	<i>Caractérisations I-V-L</i>	127
III.5.3	<i>Etude des bords</i>	130
III.5.4	<i>Homogénéité d'émission</i>	131
III.6	CONCLUSION	135
III.7	REFERENCES	137
IV	Etude de micro-LED en matrice permettant la formation d'images	141
IV.1	INTRODUCTION	143
IV.2	CARACTERISATIONS DE MICRO-LED EN MATRICE.....	143
IV.2.1	<i>Comparaison de micro-LED unitaires et matricées</i>	143
IV.2.2	<i>Dispersion à l'échelle de l'écran</i>	146
IV.2.3	<i>Dispersion à l'échelle de l'épitaixie</i>	151
IV.3	ETUDE DE LA DIAPHOTIE	153
IV.3.1	<i>Définition et présentation</i>	153
IV.3.2	<i>Simulations optiques</i>	153
IV.3.3	<i>Modification du procédé de fabrication</i>	158
IV.3.4	<i>Caractérisations électro-optiques</i>	159
IV.4	ETUDES ET CARACTERISATIONS DE MICRO-ECRANS LED	163
IV.4.1	<i>Réalisation et fonctionnement de micro-écrans à matrice active</i>	163
IV.4.2	<i>Performances des micro-écrans LED</i>	164
IV.5	CONCLUSION	171
IV.6	REFERENCES	172
	Conclusion générale	173

Introduction générale

" a curious phenomenon "

Première observation du phénomène d'électroluminescence dans un semi-conducteur
dans une note publiée dans *Electrical World* par Henry Joseph Round en 1907

Le début du XX^e siècle fut marqué par de grandes découvertes scientifiques. Du quantum d'action de Planck à la relativité générale d'Einstein en passant par le principe d'incertitude de Heisenberg, notre compréhension du monde se trouve bouleversée en l'espace d'une génération. Les inventions se succèdent, transformant profondément les conditions de vie humaine. Avec les transports et la médecine, le secteur de l'information et des communications connut peut-être la plus formidable avancée. Diodes, lasers et transistors sont inventés grâce aux recherches sur la physique des semi-conducteurs et apparaissent radios, télévisions, ordinateurs et téléphones portables. Le monde change et devient connecté. L'information circule plus vite que jamais, et les écrans, moyens de présentation de l'information, envahissent notre quotidien.

L'évolution des écrans est rapide. En quelques années la couleur apparaît, l'écran s'aplatit, sa résolution augmente et il devient tactile. De quelques millimètres à quelques mètres de diagonale, il se décline sous toutes les tailles pour toutes les applications. Pour permettre ces métamorphoses, de nouvelles technologies d'écrans se succèdent. L'écran à tube cathodique du XX^e siècle est vite dépassé par les écrans à cristaux liquides, à plasma ou OLED (*Organic Light Emitting Diode*) et disparaît au début des années 2000. L'essor des nouvelles applications n'en est certainement qu'à ses débuts. L'écran de demain sera transparent, 3D et flexible. Il sera aussi - très - petit.

En effet, le domaine des micro-écrans est en développement. Contrairement aux écrans traditionnels, les micro-écrans nécessitent un système de grandissement de l'image pour être vus par l'œil humain. Ils doivent cependant pouvoir afficher une image de qualité similaire à celle des écrans standards, notamment en termes de définition, c'est-à-dire en nombre de pixels. Pour afficher autant de pixels sur une surface plus petite il faut diminuer le pas de pixellisation, c'est-à-dire la distance entre deux pixels, le faisant passer de quelques centaines de micromètres à quelques micromètres seulement.

Outre la résolution, de nouvelles contraintes apparaissent pour adresser le marché des micro-écrans. La consommation, la compacité et la luminance de l'écran sont autant de nouveaux défis technologiques à résoudre. Pour y répondre, la technologie OLED s'est imposée depuis plusieurs années sur le marché des petits écrans (smartphones, montres connectées, casques de réalité virtuelle). C'est une technologie d'écran émissif, c'est-à-dire que chaque pixel est sa propre source de lumière, contrairement aux écrans transmissifs, qui nécessitent une source de lumière en amont que les pixels viendront moduler. C'est donc un gain important en termes de consommation et de compacité. En revanche, pour certaines applications, dont la réalité augmentée, les besoins en luminance sont supérieurs aux spécifications actuelles des écrans OLED. C'est pourquoi une nouvelle technologie d'écrans est à l'étude depuis quelques années. Il s'agit des écrans LED (*Light Emitting*

Diode). Depuis leur invention dans les années 1960, de nombreuses recherches ont permis d'utiliser cette technologie pour l'éclairage et la signalisation. L'attribution du prix Nobel de physique 2014 aux inventeurs de la LED bleue à base de nitrure de gallium, plus d'un siècle après la première observation du phénomène d'électroluminescence dans un semi-conducteur par Round, démontre la portée de cette invention et les espoirs qu'elle suscite.

La possible utilisation des LED dans un écran n'en est cependant qu'à ses balbutiements. Un écran LED est un écran constitué d'un grand nombre de LED, disposées en matrice, dont chaque LED constitue un pixel de l'image. C'est un écran émissif au même titre que les OLED. Le premier micro-écran LED (10×10 pixels au pas de 50 μm) est rapporté au début des années 2000. Aujourd'hui les prototypes les plus résolus sont constitués de centaines de milliers de pixels à un pas de pixellisation de l'ordre de 10 μm . La réalisation de micro-écrans d'une définition similaire à celle des écrans standards semble dorénavant accessible dans un futur proche. Il n'existe à ce jour aucun écran LED commercialisé, mais la question n'est sans doute pas de savoir s'ils seront commercialisés, mais quand.

C'est dans ce contexte que j'ai réalisé mes travaux de thèse au sein du CEA LETI de Grenoble sur l'étude des caractéristiques électro-optiques de micro-LED GaN pour application aux micro-écrans haute luminance.

L'objectif général est de comprendre les spécificités des LED en nitrure de gallium (GaN) utilisées pour les micro-écrans, c'est-à-dire des LED :

- utilisées en pixels de quelques micromètres de taille,
- disposées en un réseau bidimensionnel de plusieurs centaines de milliers de pixels,
- permettant la formation d'images.

Chapitre premier

Les matrices de micro-LED
pour l'affichage

du semi-conducteur à l'écran LED

I	Les matrices de micro-LED pour l'affichage.....	3
I.1	INTRODUCTION	5
I.2	LES ECRANS : TECHNIQUES, BESOINS ET APPLICATIONS.....	5
I.2.1	<i>Etat de l'art des écrans</i>	5
I.2.1.a	Généralités sur les écrans	5
I.2.1.b	Les grands-écrans.....	7
I.2.1.c	Les micro-écrans.....	9
I.2.2	<i>Les nouvelles applications et leurs besoins</i>	10
I.2.2.a	La réalité virtuelle	10
I.2.2.b	La réalité augmentée	11
I.2.3	<i>Synthèse</i>	12
I.3	LES DIODES ELECTROLUMINESCENTES.....	13
I.3.1	<i>Physique des semi-conducteurs</i>	13
I.3.1.a	Structure cristalline et bandes d'énergie	13
I.3.1.b	La jonction PN	15
I.3.1.c	Emission spontanée dans un semiconducteur à gap direct.....	17
I.3.1.d	Homojonction, hétérojonction et puits quantiques	18
I.3.1.e	Déviations de la caractéristique I-V idéale.....	19
I.3.2	<i>Le nitrure de gallium (GaN) et ses alliages</i>	20
I.3.2.a	Les matériaux III-V	20
I.3.2.b	Croissance du GaN	21
I.3.2.c	Structure d'une LED InGaN/GaN	24
I.3.3	<i>Performances et rendements d'une LED</i>	26
I.3.3.a	Recombinaisons radiatives et non-radiatives : le rendement quantique interne.....	26
I.3.3.b	Le modèle ABC.....	28
I.3.3.c	Le phénomène de droop et les solutions proposées.....	29
I.3.3.d	L'extraction lumineuse et le rendement quantique externe	32
I.3.3.e	Le rendement total WPE.....	34
I.4	APPLICATIONS DES LED	35
I.4.1	<i>Les LED pour l'éclairage</i>	35
I.4.1.a	Historique de l'utilisation des LED	35
I.4.1.b	Les applications futures	36
I.4.2	<i>Les écrans LED</i>	36
I.4.2.a	Historique	36
I.4.2.b	Ecrans et micro-écrans LED.....	37
I.4.2.c	Etat de l'art des micro-écrans LED.....	39
I.5	PRESENTATION DE LA THESE.....	41
I.5.1	<i>Spécificités des matrices de micro-LED</i>	41
I.5.2	<i>Les objectifs de thèse</i>	42
I.5.3	<i>Plan du manuscrit</i>	43
I.6	CONCLUSION	43
I.7	REFERENCES	44

I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, un état de l'art des matrices de LED pour l'affichage sera présenté. Nous commencerons par introduire les généralités sur les écrans, leur fonctionnement et le marché qu'ils représentent. Nous ferons ensuite la distinction entre 'grand-écran' traditionnel et micro-écran et verrons les différences de fonctionnement et les nouvelles tendances pour ces deux types d'écran. Nous verrons notamment pourquoi l'utilisation de LED est en cours d'étude, en vue d'une possible utilisation dans le domaine des écrans. Les concepts fondamentaux nécessaires à la compréhension du manuscrit seront présentés, de la physique des semi-conducteurs aux LED à base de nitrure de gallium (GaN). Ensuite, nous exposerons les applications des LED, dans le domaine de l'éclairage et des écrans. Enfin, un état de l'art des recherches sur les micro-écrans LED et les objectifs de mes travaux de thèse seront présentés.

I.2 Les écrans : techniques, besoins et applications

I.2.1 Etat de l'art des écrans

I.2.1.a *Généralités sur les écrans*

Un écran est un dispositif d'affichage électronique d'images. Chaque point de l'image constitue un pixel (de l'anglais *picture element*), et le nombre de pixel d'un écran détermine sa définition. Un pixel est en général constitué de trois sous-pixels de couleurs fondamentales : rouge, vert et bleu, permettant ainsi de reproduire toute la palette des couleurs.

Quelle que soit la technologie utilisée, un écran est composé fondamentalement de deux objets : un circuit électronique de commande et une couche électro-optique (figure I-1).

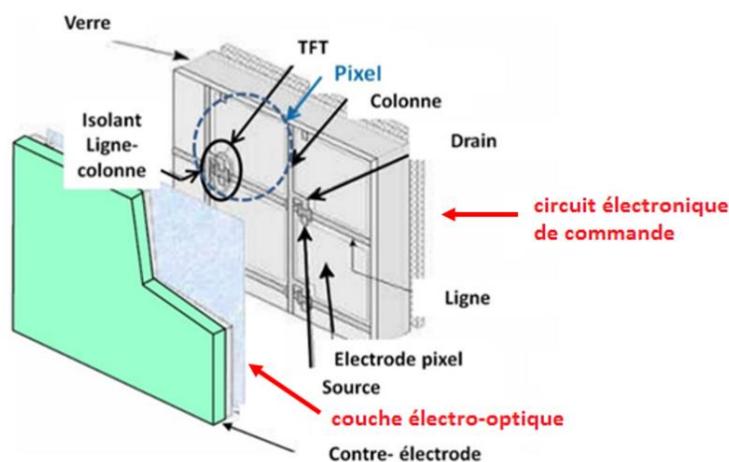


Figure I-1 : structure typique d'un écran [1]

Le circuit électronique a pour fonction de sélectionner le pixel à allumer et d'y envoyer le signal souhaité. La majorité des écrans sont aujourd'hui à matrice active, dans lesquels chaque pixel est connecté à un transistor (ou des transistors) servant principalement d'interrupteur. Des transistors en couches minces TFT (*Thin Film Transistor*) sur du verre sont généralement utilisés.

La couche électro-optique sert à convertir le signal électrique en signal optique. La nature de cette couche peut différer et détermine le type d'écran : plasma, cristal liquide, OLED, etc. On peut alors classer les écrans selon le fonctionnement de la couche électro-optique. Si le pixel émet de la lumière, l'écran est dit émissif. C'est le cas des écrans OLED. Dans le cas contraire, une source de lumière est nécessaire en amont, et le pixel ne joue que le rôle de modulateur de lumière. C'est le cas des écrans LCD.

La taille des écrans (définie par la longueur de sa diagonale, en général exprimée en pouces) varie fortement selon l'application, de quelques centimètres (montres connectées par exemple) à plusieurs mètres pour les plus grands téléviseurs. Il existe ainsi une grande variété d'écrans, que l'on peut classer selon leur taille, leur définition, la nature de leur couche électro-optique ou leur circuit d'adressage. On parlera par exemple d'un écran 32 pouces (81 cm), haute définition (1080 lignes par 1920 colonnes), utilisant la technologie OLED et à matrice active (AMOLED).

Une nouvelle catégorie d'écrans, appelée micro-écrans, consiste à réaliser des écrans de quelques millimètres de diagonale seulement. La différence fondamentale par rapport aux 'grands' écrans traditionnels est le besoin d'un système optique de grandissement de l'image pour que l'image puisse être vue par l'œil humain. Pour atteindre des définitions proches de celles des écrans traditionnels, le pitch (pas de pixellisation) est très fortement réduit, de quelques centaines de micromètres à quelques micromètres seulement. Cette différence de taille implique un changement majeur sur leur fabrication. Le circuit d'adressage utilisé ne peut plus être à base de TFT. Il faut utiliser des circuits CMOS, issus de la micro-électronique, et qui permettent d'adresser de très petits pitches.

Le tableau ci-dessous résume les principales différences entre un écran et un micro-écran.

Type d'écran	Taille typique (cm)	Observation	Pitch (μm)	Technologie d'adressage	Taille du substrat
Ecran	5 à 200	Directe	40 à 300	TFT sur verre	Jusque 3X3m
Micro-écran	0.7 à 2	Grandissement image	4 à 20	CMOS	Wafer de 200 ou 300mm

Tableau I-1 : principales caractéristiques des écrans et micro-écrans, d'après [2]

Avec un chiffre d'affaire de plus de 100 milliards de dollars depuis 2010, le marché total des écrans est considérable. Le marché des écrans en 2012 est présenté ci-dessous (figure I-2), avec une projection jusqu'en 2017.

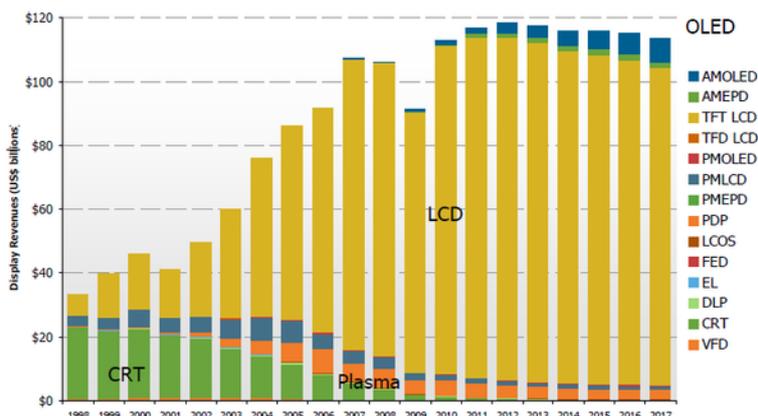


Figure I-2 : marché total des écrans [3]

Après avoir dominé le marché des écrans au XX^e siècle, l'écran à tube cathodique CRT (*Cathode Ray Tube*) disparaît peu à peu au début des années 2000. Dans le même temps, les écrans plasma et à cristaux liquides LCD (*Liquid Crystal Display*) apparaissent. Contrairement aux écrans plasma, les écrans LCD connaissent une croissance très importante pour occuper aujourd'hui la très grande majorité du marché des écrans. Depuis les années 2010, les écrans plasma ont quasiment disparu, et la technologie OLED apparaît et connaît une croissance constante.

Les quatre applications principales des écrans sont les moniteurs de bureau, les téléviseurs, les ordinateurs et les smartphones. Aujourd'hui, le marché des micro-écrans ne représente qu'une très faible part du marché total des écrans.

I.2.1.b Les grands-écrans

Depuis le début des années 2000, l'écran LCD s'est imposé comme la technologie majoritaire pour représenter aujourd'hui près de 90% du marché. Son fonctionnement est présenté ci-dessous.

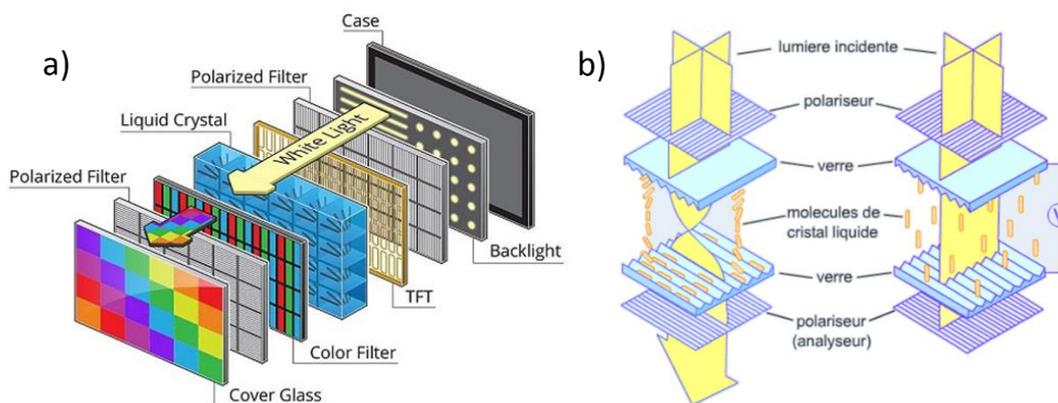


Figure I-3 : a) structure d'un écran LCD [4] et b) fonctionnement d'une cellule à cristal liquide [5].
A gauche le pixel est allumé, à droite il est éteint

Une source de lumière blanche placée à l'arrière de l'écran est polarisée de manière rectiligne. En sortie, un second polariseur est orienté de 90° par rapport au premier polariseur. Entre les deux polariseurs, une cellule à cristal liquide permet de faire varier l'orientation de la polarisation de la lumière incidente. Les cristaux liquides sont des molécules dans un état intermédiaire entre l'état

solide et liquide. Les molécules sont orientées aléatoirement dans l'espace, mais leur orientation suit une direction privilégiée. La couche de cristaux liquides est prise en sandwich entre deux substrats transparents qui ancrent les cristaux dans deux directions perpendiculaires. Par défaut, c'est-à-dire sans polarisation de la cellule, les molécules s'orientent et la lumière, guidée par l'orientation naturelle des cristaux, sort librement de la cellule. Lorsqu'un champ électrique est appliqué entre les deux électrodes, les molécules s'alignent suivant la direction du champ. La lumière n'est plus déviée, et est donc stoppée par le second polariseur. En faisant varier la tension appliquée, il est possible de moduler la lumière sortant de la cellule. Enfin, des filtres colorés permettent de modifier la couleur du pixel.

Précisons ici que la source de lumière en amont peut être composée de LED. On parle alors d'écran LCD à rétro-éclairage LED, parfois présenté comme 'écran LED'. Il ne faut pas les confondre avec les écrans LED au sens strict du terme, qui seront étudiés dans ce manuscrit et qui sont des écrans émissifs dont la couche électro-optique est constituée d'un réseau de LED, dans lequel chaque LED constitue un pixel de l'image.

Les écrans OLED sont apparus au début des années 2010 et sont aujourd'hui la deuxième technologie d'écrans la plus utilisée derrière les LCD. Ce sont des écrans dont la couche électro-optique est constituée de diodes à base de matériaux organiques (C, O, H, N). La première réalisation d'OLED date de 1987 [6]. En 2007, Samsung commercialise le smartphone Galaxy S, premier produit largement commercialisé avec un écran OLED. En 2016, l'écran AMOLED représentait 23 % des ventes de smartphones. C'est donc un marché très important. La technologie OLED est en effet particulièrement adaptée aux écrans nomades. Les écrans émissifs, ne nécessitant pas de source de lumière en amont, ni de système optique de polarisation, sont plus compacts et consomment moins d'énergie que les écrans LCD.

Les OLED apparaissent aussi sur le marché des grands écrans de type téléviseurs et doivent permettre d'adresser de nouveaux marchés, notamment celui des écrans miroirs, transparents ou pliables (figure I-4).



Figure I-4 : exemples d'application des écrans OLED [7]

Le fonctionnement d'un écran OLED est présenté ci-dessous (figure I-5). La couche électro-optique, constituée de matériaux organiques, est entourée de deux électrodes, dont l'une (ici la cathode) est transparente afin de laisser passer la lumière. Le circuit d'adressage permet d'allumer plus ou moins le pixel voulu, suivant la tension appliquée. Des niveaux d'énergie discrets dans le matériau permettent la conversion des porteurs en photons.

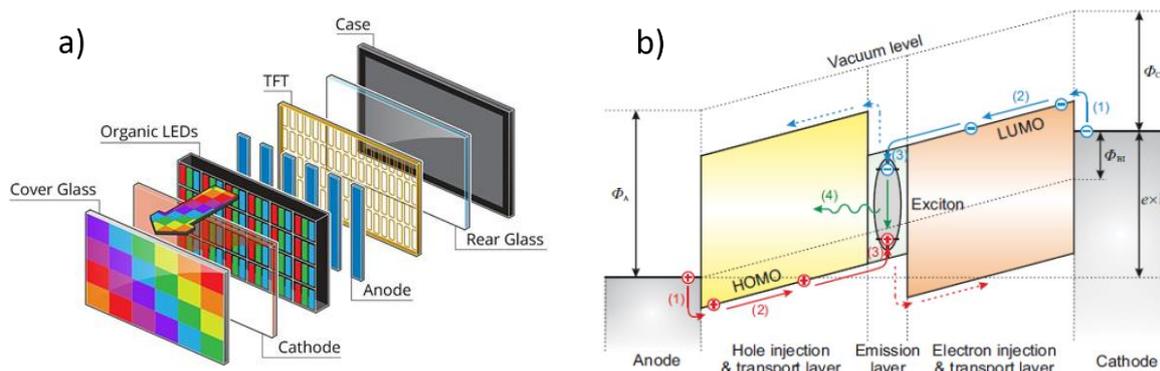


Figure I-5 : a) structure d'un écran OLED [4] et b) principe de fonctionnement d'une OLED [8]

Les performances des écrans actuels sont très bonnes (définition, contraste, couleur, taille, etc.) et leur prix sont bas. Ainsi, peu de progrès sont attendus, et les leviers d'amélioration et de croissance sont peu nombreux. Un axe de recherche fait cependant l'objet de recherches importantes aujourd'hui : celui de la consommation de l'écran. Pour cela, une nouvelle technologie d'écran fait l'objet de recherches très récentes. Il s'agit des écrans LED. Les deux technologies OLED et LED ont un principe de fonctionnement similaire. Ce sont des écrans émissifs, ce qui garantit des qualités intéressantes (compacité, consommation, contraste) par rapport aux écrans LCD.

I.2.1.c Les micro-écrans

Les micro-écrans adressent des marchés très spécifiques. Les principales applications actuelles sont les projecteurs, les viseurs d'appareil photographique et les lunettes de réalité augmentée.

Trois technologies de micro-écrans existent aujourd'hui au niveau industriel (MEMS, LCD et OLED). Nous avons vu que les micro-écrans remplacent un substrat TFT sur verre par un circuit CMOS. Le silicium n'étant pas transparent, cela implique un changement important dans le fonctionnement des micro-écrans non-émissifs. Les cristaux liquides sont alors déposés sur silicium (LCoS : *Liquid Crystal on Silicon*) et l'écran devient réfléchissant (figure I-6.a). La principale différence de fonctionnement vient du fait que la lumière traverse maintenant deux fois la cellule à cristal liquide. La technologie LCoS est notamment très utilisée dans les projecteurs.

La deuxième technologie de micro-écrans utilise des MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*). Ces dispositifs fonctionnent à l'aide d'un miroir présent pour chaque pixel. Suivant la position du miroir, la lumière est transmise vers une lentille de projection, ou déviée loin de celle-ci (figure I-6.b). Le terme DLP (*Digital Light Processing*) est généralement utilisé, du nom du premier projecteur utilisant cette technologie.

I. Les matrices de micro-LED pour l'affichage

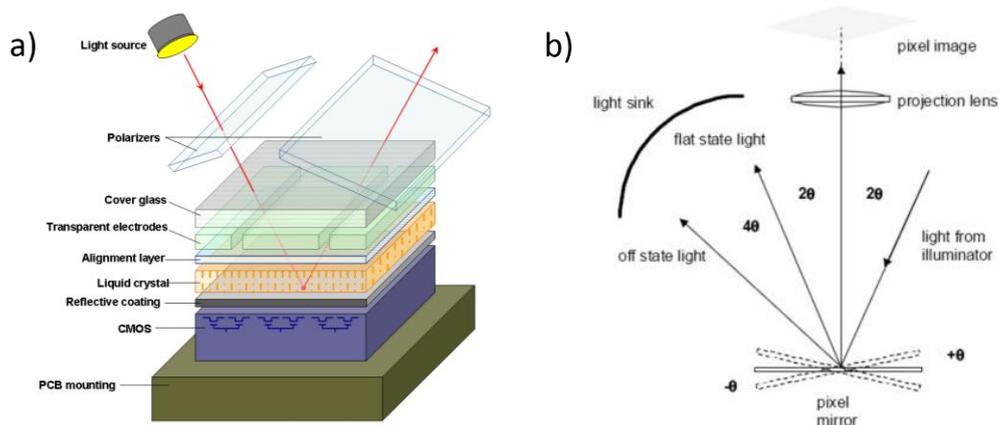


Figure I-6 : a) fonctionnement d'un micro-écran à cristaux liquides (LCoS) [9] et b) d'un écran MEMS [2]

Enfin, la troisième technologie de micro-écran utilise des OLED. C'est la seule technologie émissive, ce qui garantit de bonnes performances en termes de consommation électrique, de compacité et de temps de réponse. La couche électro-optique peut être déposée directement sur un substrat silicium, à de très petits pas de pixels, utilisant les règles de dessin de la micro-electronique. Suivant la molécule déposée, il est possible d'obtenir des sous-pixels rouges, verts et bleus. Les micro-écrans OLED actuels présentent des pas de pixellisation de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$, avec des définitions semblables à celles des écrans traditionnels. Ils sont notamment utilisés dans les viseurs d'appareils photographique ou casques de réalité virtuelle. En revanche, les micro-écrans OLED ne conviennent pas pour de nouvelles applications qui nécessitent de très forts niveaux de luminance, les technologies actuelles à l'état de l'art annonçant des luminances de l'ordre de $10^3\ \text{cd}/\text{m}^2$ [10] [11].

1.2.2 Les nouvelles applications et leurs besoins

Deux nouvelles applications sont apparues au cours des dernières années et bousculent le marché des écrans. Il s'agit de la réalité virtuelle et augmentée.

1.2.2.a *La réalité virtuelle*

La réalité virtuelle consiste à faire évoluer son utilisateur dans un environnement virtuel, généré par ordinateur. Si elle peut utiliser chacun des sens, c'est en général la vue qui est sollicitée au moyen de casques de réalité virtuelle. Ce sont des casques occultants, qui plongent l'utilisateur dans un univers différent. Le principal marché est actuellement celui du jeu-vidéo, mais les utilisations sont possibles dans de nombreux domaines (armée, culture, formation, industrie, santé, etc.).

La réalité virtuelle apparait pour le grand public en 2016. Oculus (mars), HTC (avril), Sony (octobre) et Google (novembre) lancent leur produit et rejoignent le Gear VR de Samsung, premier casque de réalité virtuelle sorti en 2015. Ce secteur d'applications est donc en plein développement.

Le principal besoin auquel l'écran doit répondre pour les besoins de la réalité virtuelle est la définition. En effet, l'objectif de la réalité virtuelle est de simuler des conditions aussi proches que possible du

monde réel pour l'utilisateur. L'un des principaux défis est celui du champ de vision. L'œil humain possède une vision périphérique importante (240° horizontalement), qu'il faut pouvoir être capable de recréer virtuellement. Pour atteindre ce champ de vision, le besoin en nombre de pixel est très important, et supérieur aux résolutions actuelles.

A titre d'exemple, le casque Oculus Rift utilise un écran OLED 1080p (1080X1200) de 5,7 pouces. Avec un champ de vision restreint à 110°, la qualité de l'image obtenue reste insuffisante, car l'image est pixellisée. Les écrans utilisés par la réalité virtuelle sont donc des 'grands-écrans', typiquement des écrans de smartphones, aux résolutions très fortes, avec des besoins faibles en luminance puisque l'utilisateur est plongé dans le noir.

I.2.2.b La réalité augmentée

La réalité augmentée est un concept plus récent. Elle consiste à superposer au monde réel des informations générées par ordinateur. Contrairement à la réalité virtuelle, entièrement générée par ordinateur, la réalité augmentée maintient l'utilisateur dans le monde réel. Les casques deviennent des lunettes de réalité augmentée, c'est-à-dire des lunettes transparentes dans lesquelles sont intégrés des dispositifs optiques qui affichent une image dans le champ de vision de l'utilisateur. Dans ce cas, l'utilisateur ne regarde pas directement l'écran, mais une image virtuelle agrandie par un système optique (figure I-7).

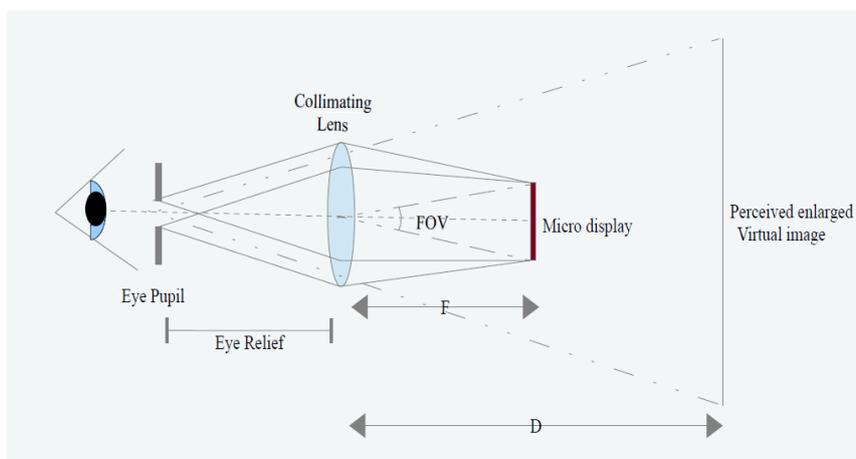


Figure I-7 : schéma de principe d'un système de projection rétinienne [1]

Cette différence de fonctionnement implique une différence majeure sur les spécificités de l'écran. La luminance attendue pour la réalité augmentée est supérieure à celle de la réalité virtuelle de plusieurs ordres de grandeur. En effet, l'image affichée doit pouvoir être facilement visible malgré l'éclairage ambiant (tableau I-2) et les pertes dans le système optique. On estime ainsi la luminosité nécessaire de l'écran de l'ordre de 10^4 cd/m², soit environ une décade supérieure aux technologies OLED actuelles.

Environnement	Eclairement (lux)
Pleine lune	1
Eclairage urbain	10
Eclairage de bureau	100 à 1000
Plein soleil	100 000

Tableau I-2 : éclairement typique dans différents environnements, d’après [11]

La luminance n’est pas le seul besoin, car écran et batterie doivent pouvoir être intégrés dans des montures de lunettes. L’écran doit donc être très compact, avec une faible consommation électrique.

En résumé, la réalité augmentée a besoin de micro-écrans compacts, économes en énergie, et très lumineux, ce qu’aucune technologie d’écran ne permet de réaliser aujourd’hui. C’est historiquement pour cette application que les recherches ont débutées sur les micro-écrans LED. D’autres applications des micro-écrans sont envisagées, notamment pour des projecteurs ou des systèmes d’affichage tête-haute HUD (*Head-Up Display*) compacts.

1.2.3 Synthèse

En résumé de cet état de l’art des écrans et de leurs nouvelles applications, les technologies d’écrans évoluent rapidement pour répondre à de nouveaux besoins. L’hégémonie des écrans LCD commence à être bousculée par l’apparition des écrans OLED. Ces écrans émissifs présentent de nombreux avantages (contraste, compacité, consommation, conformabilité, etc.) qui les rend particulièrement adaptés aux écrans nomades (smartphones, tablettes, etc.).

En l’espace de vingt ans, les écrans ont subi de nombreux changements (nouvelles technologies d’affichage, d’adressage, diminution de l’épaisseur, augmentation de la taille, de la définition et de la qualité d’image). Aujourd’hui, les voies d’amélioration de rupture sont peu nombreuses, et la problématique de la consommation pourrait faire émerger une nouvelle technologie d’écran à base de LED.

D’autre part, le marché des micro-écrans est en plein développement avec l’arrivée de nouvelles applications qui bousculent le marché. En particulier, les besoins de micro-écrans très lumineux apparaissent pour la réalité augmentée et les systèmes de projection. L’utilisation de LED doit permettre la réalisation de micro-écrans résolus, compacts, faible consommation et très haute-luminance. C’est pourquoi cette technologie fait l’objet de recherches importantes depuis quelques années.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, l’utilisation de LED pour la réalisation de micro-écrans haute-luminance sera étudiée. Nous présenterons dans la suite de ce chapitre les notions fondamentales liées au fonctionnement des LED, leurs applications actuelles et futures, avant d’introduire les spécificités des micro-LED, les objectifs de la thèse et les axes d’études retenus.

I.3 Les diodes électroluminescentes

I.3.1 Physique des semi-conducteurs

I.3.1.a *Structure cristalline et bandes d'énergie*

L'arrangement périodique et régulier d'atomes forme un réseau cristallin. Un motif, appelé maille élémentaire, constitué d'un atome ou d'un assemblage d'atomes, est répété à l'infini dans les trois directions de l'espace. A ce réseau direct, formé des vecteurs primitifs $(\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3)$, est associé un réseau réciproque rapporté à trois vecteurs de base $(\vec{a}_1^*, \vec{a}_2^*, \vec{a}_3^*)$ et satisfaisant aux conditions :

$$\vec{a}_i^* \cdot \vec{a}_j = 2\pi \cdot \delta_{ij} \quad (1.1)$$

Ce qui donne :

$$\vec{a}_m^* = \frac{2\pi}{V} \vec{a}_n \wedge \vec{a}_p \quad (1.2)$$

où (m, n, p) est une permutation circulaire de $(1, 2, 3)$; et V est le volume de la maille du réseau direct : $V = \vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \wedge \vec{a}_3)$

L'ensemble des énergies permises par le réseau forme la structure de bande du matériau. Elle est généralement obtenue en résolvant l'équation de Schrödinger. En raison de la périodicité de la structure cristalline, les propriétés des électrons sont invariantes dans une translation du réseau. En particulier, les bandes d'énergie sont périodiques en \vec{k} (\vec{k} est le vecteur d'onde), avec la période donnée par le réseau réciproque.

Il existe des domaines d'énergie pour lesquels il n'y a pas de solution de l'équation de Schrödinger. L'ensemble de ces énergies non permises est appelé bande interdite et les électrons sont localisés dans des bandes d'énergie permises.

Au zéro absolu, la dernière bande pleine d'électrons est la bande de valence, et la première bande vide est la bande de conduction. La différence d'énergie entre le sommet de la bande de valence (E_v) et le bas de la bande de conduction (E_c) est appelée gap du matériau (E_g).

$$E_g = E_c - E_v \quad (1.3)$$

Afin de calculer les transitions entre ces bandes, nous devons introduire deux concepts : celui de densités d'états dans les bandes permises et de fonction de distribution.

La densité d'états au voisinage de l'extremum d'une bande s'écrit sous la forme :

$$N(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_0)^{1/2} \quad (1.4)$$

L'énergie est comptée positivement vers le haut pour les électrons et vers le bas pour les trous. E_0 est l'énergie du bord de bande, m^* la masse effective de densité d'états correspondante et \hbar la constante de Planck réduite.

La fonction de distribution $f_n(E)$ représente la probabilité pour qu'un électron occupe un état d'énergie E et est donnée par :

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/kT}} \quad (1.5)$$

La fonction de distribution des trous est de manière logique :

$$f_p(E) = 1 - f_n(E) = \frac{1}{1 + e^{-(E-E_f)/kT}} \quad (1.6)$$

Où E_f est le potentiel chimique, parfois appelé énergie de Fermi. Il représente la variation d'énergie libre du système en fonction du nombre de particules, k est la constante de Boltzmann, et T la température.

Le nombre d'électrons, ou de trous, d'énergie E dans le semiconducteur est alors donné par le produit de la densité d'état par la fonction de distribution. Les densités totales d'électrons (n) dans la bande de conduction et de trous (p) dans la bande de valence sont alors données par :

$$n = \int_{E_c}^{E_c \max} N_c(E) \cdot f_n(E) \cdot dE \quad (1.7)$$

$$p = \int_{E_v \min}^{E_v} N_v(E) \cdot f_p(E) \cdot dE \quad (1.8)$$

Dans le cas des semi-conducteurs non dégénérés, c'est-à-dire lorsque le niveau de Fermi est situé dans la bande interdite, les densités de porteurs libres se simplifient sous la forme :

$$n = N_c \cdot e^{-(E_c-E_f)/kT} \quad (1.9)$$

$$p = N_v \cdot e^{(E_v-E_f)/kT} \quad (1.10)$$

On appelle N_c et N_v les densités équivalentes d'états dans les bandes de conduction et de valence. N_c (resp. N_v) représente le nombre d'états utiles dans la bande de conduction (resp. valence).

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_c kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (1.11)$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_v kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (1.12)$$

Le semiconducteur intrinsèque, *i.e.* dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteur, possède alors une densité de porteurs intrinsèques donné par :

$$n = p = n_i \quad (1.13)$$

C'est-à-dire que les électrons et les trous existent nécessairement par paires. Il en résulte que la densité de porteurs intrinsèques s'écrit :

$$n_i = (N_c \cdot N_v)^{1/2} \cdot e^{-E_g/2kT} \quad (1.14)$$

Le niveau de Fermi E_{Fi} d'un semiconducteur intrinsèque est donné par :

$$E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{1}{2} kT \cdot \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right) \quad (1.15)$$

Ainsi, dans un semiconducteur intrinsèque, le niveau de Fermi est toujours très voisin du milieu du gap à température ambiante :

$$E_{Fi} \approx \frac{E_c + E_v}{2} \quad (1.16)$$

I.3.1.b La jonction PN

Le dopage consiste à implanter des atomes (ou impuretés) à l'intérieur d'un semi-conducteur afin d'en modifier les propriétés électriques. Le semiconducteur est alors dit extrinsèque. Un dopage de type P est obtenu en augmentant la densité de trous (par ajout d'accepteurs), et un dopage de type N en augmentant la densité d'électrons (par ajout de donneurs). On appelle N_d l'excédent de donneurs dans la région N et N_a l'excédent d'accepteurs dans la région P. Dans la pratique N_a et N_d sont toujours très supérieurs à n_i de sorte que les densités d'électrons et trous s'écrivent :

$$n \approx N_d - N_a \quad \text{et} \quad p \approx \frac{n_i^2}{N_d - N_a} \quad \text{dans un semiconducteur N et} \quad (1.17)$$

$$p \approx N_a - N_d \quad \text{et} \quad n \approx \frac{n_i^2}{N_a - N_d} \quad \text{dans un semiconducteur P} \quad (1.18)$$

Dans chaque type de semi-conducteur, le niveau de Fermi se rapproche d'autant plus de la bande de porteurs majoritaires que le dopage est important. On exprime alors E_{Fn} et E_{Fp} les niveaux de Fermi dans les semiconducteurs extrinsèques types N et P par les relations :

$$E_{Fn} = E_c - kT \cdot \ln \left(\frac{N_c}{N_d - N_a} \right) \quad (1.19)$$

$$E_{Fp} = E_v - kT \cdot \ln \left(\frac{N_v}{N_a - N_d} \right) \quad (1.20)$$

Une jonction PN est la juxtaposition de ces deux régions d'un même semiconducteur. La mise en contact de ces deux types de semiconducteur en x_0 (figure I-8) entraîne la diffusion des électrons et des trous. Cette diffusion fait apparaître une zone de charge d'espace (ZCE) d'épaisseur W . Nous notons x_p et x_n les limites de la ZCE dans les zones P et N.

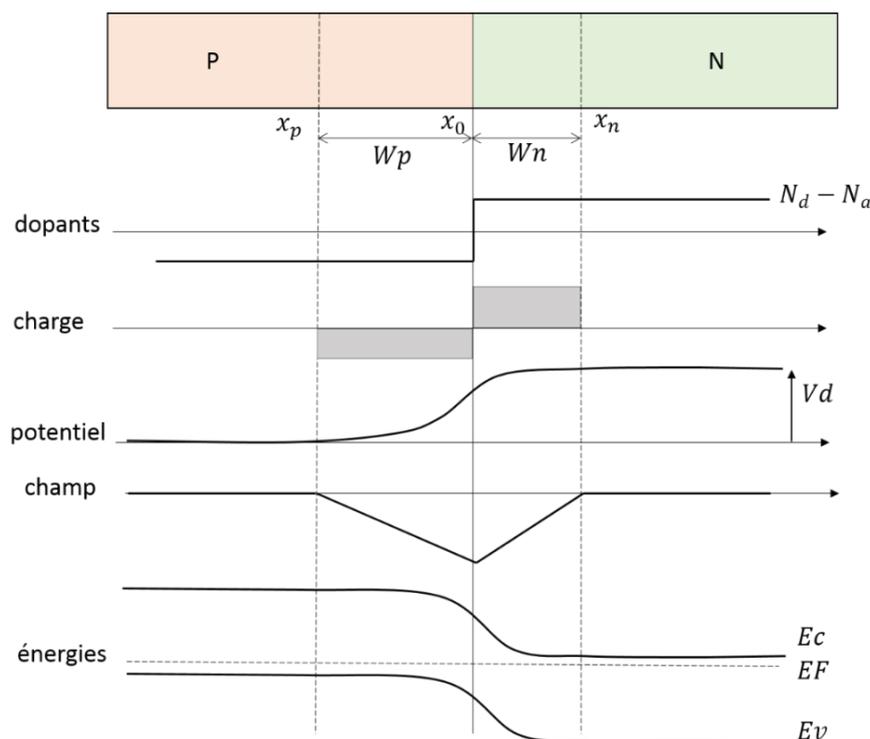


Figure I-8 : jonction PN à l'équilibre thermodynamique, d'après [12]

La charge d'espace est positive côté N et négative côté P, car elle résulte de la présence de donneurs ionisés N_d et des accepteurs ionisés N_a . En dehors de la ZCE, le semiconducteur est neutre et la densité de charge est nulle. On peut ainsi résumer la densité de charge ρ dans les différentes régions :

$$\rho(x) = 0 \text{ pour } x < x_p \text{ et } x > x_n \quad (1.21)$$

$$\rho(x) = -q \cdot N_a \text{ pour } x_p < x < x_0 \quad (1.22)$$

$$\rho(x) = q \cdot N_d \text{ pour } x_0 < x < x_n \quad (1.23)$$

La zone de charge d'espace s'étend dans les régions P et N (W_n et W_p) en satisfaisant l'équation :

$$N_a W_p = N_d W_n \quad (1.24)$$

Cette équation traduit que la zone de charge d'espace s'étend principalement dans la région la moins dopée.

La présence de cette zone de charge d'espace entraîne l'existence d'un champ électrique et d'une variation de potentiel. La tension associée, appelée tension de diffusion, est donnée par la relation :

$$V_d = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (1.25)$$

Le champ électrique dans la structure peut s'exprimer sous la forme :

$$E = -\frac{q \cdot N_a}{\epsilon} (x - x_p), \text{ pour } x_p < x < x_0 \quad (1.26)$$

$$E = \frac{q \cdot N_d}{\epsilon} (x - x_n), \text{ pour } x_0 < x < x_n \quad (1.27)$$

Enfin, l'évolution des bandes de valence et de conduction est représentée figure I-8. Elle résulte de l'alignement du niveau de Fermi dans toute la structure.

Nous avons étudié jusqu'à présent la jonction PN à l'équilibre thermodynamique. Lorsqu'une polarisation est appliquée, la barrière de potentiel est modifiée et par conséquence une diffusion des porteurs apparaît d'une région vers l'autre. La tension appliquée, notée V , s'ajoute à la tension de diffusion V_d . Lorsque la tension appliquée est négative, la différence de potentiel aux bornes de la ZCE augmente. La diffusion des porteurs majoritaire est impossible, seuls les porteurs minoritaires, propulsés par le champ électrique, passent dans la région opposée. C'est le courant de conduction. A l'inverse, lorsque la polarisation appliquée est positive, la barrière de potentiel n'est plus suffisante pour empêcher la diffusion des porteurs. Les électrons diffusent de la région N vers la région P, et les trous de la région P vers la région N. Le courant circulant dans la jonction s'exprime alors sous la forme :

$$I = I_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1.28)$$

Où I_s est le courant de saturation.

I.3.1.c Emission spontanée dans un semiconducteur à gap direct

Au zéro absolu, un semiconducteur est isolant, avec une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Cependant, les électrons peuvent être excités (thermiquement, électriquement ou optiquement) de la bande de valence vers la bande de conduction. Ils laissent alors dans la bande de valence une lacune, pseudo-particule appelée trou. Une fois l'électron dans la bande de conduction, il peut se désexciter vers la bande de valence, remplissant ainsi le trou. Cette recombinaison électron-trou peut être accompagnée par l'émission d'un photon. C'est l'émission spontanée à la base du fonctionnement des LED.

Cette émission est caractérisée par la conservation de l'énergie et du moment. L'énergie du photon, dont dépend sa longueur d'onde (λ), est celle du gap du semiconducteur (E_g).

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (1.29)$$

h est la constante de Planck et c la vitesse de la lumière dans le vide. La lumière émise par un semiconducteur est donc intrinsèquement quasi-monochromatique et dépend du gap du matériau semiconducteur utilisé (figure I-9).

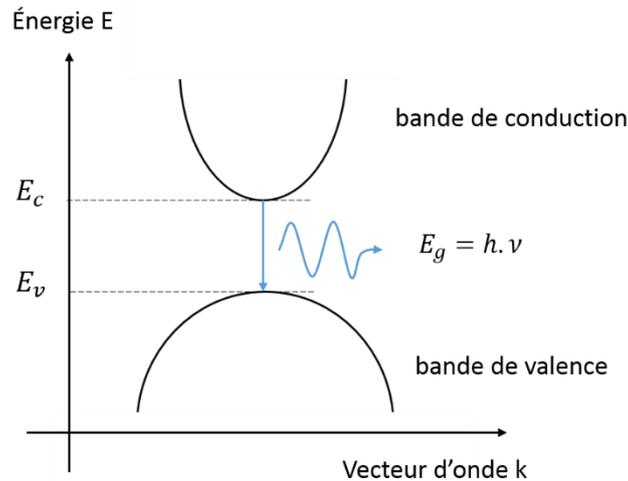


Figure I-9 : structure énergétique d'un semi-conducteur à gap direct, d'après [13]

La jonction PN présentée auparavant a pour but d'injecter les électrons vers la région P et les trous vers la région N, créant ainsi les conditions de l'émission spontanée. En effet, la probabilité qu'un électron se recombiner avec un trou est proportionnelle au produit de la concentration d'électrons et de trous. On définit alors le taux de recombinaison radiative par :

$$R_{rad} = B \cdot n \cdot p \quad (I.30)$$

B est appelé coefficient de recombinaison bimoléculaire. Il possède des valeurs typiques de l'ordre de 10^{-11} à $10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour les semi-conducteurs III-V à gap direct [14].

I.3.1.d Homojonction, hétérojonction et puits quantiques

Afin de favoriser le processus d'émission spontanée, des structures appelées hétérojonctions sont utilisées. Contrairement à la jonction PN constituée d'un seul matériau (appelée homojonction), une hétérojonction consiste à utiliser deux matériaux semi-conducteurs avec des énergies de gap différentes (figure I-10).

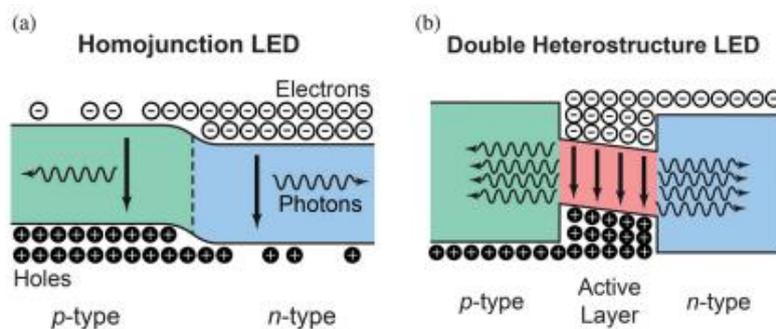


Figure I-10 : diagramme de bande d'énergie a) d'une homojonction et b) d'une hétérojonction [15]

Si l'énergie de gap du matériau utilisé est inférieure à celle du matériau initial, il se forme une couche active dans laquelle électrons et trous se concentrent (figure I-10.b). Ce confinement des porteurs favorise alors très fortement la probabilité d'émission spontanée. Dans le cas où l'épaisseur de cette couche active est faible, le fort confinement crée des niveaux d'énergie discrets (figure I-11). On parle alors de puits quantique. L'épaisseur des puits est en général très faible, quelques nanomètres. Lorsque plusieurs puits quantiques sont réalisés, on parle de région à multiples puits quantiques MQW (*Multiple Quantum Wells*).

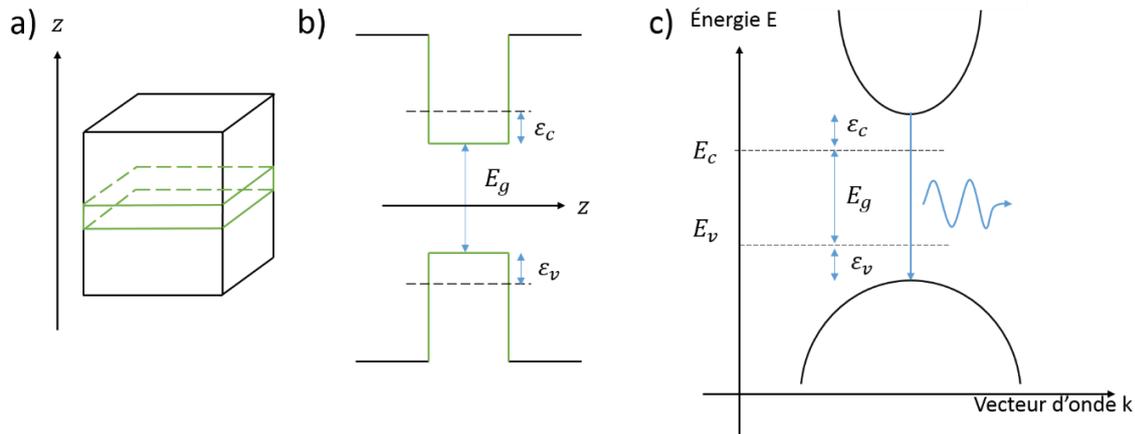


Figure I-11 : a) croissance d'une hétérojonction selon l'axe de croissance z, b) premier niveau d'énergie dans un puits quantique et c) diagramme de bande dans l'espace du vecteur d'onde k. D'après [16]

Dans le cas de LED à base de nitrure de gallium, les zones P et N sont constituées de GaN, tandis que les puits quantiques sont réalisés à l'aide d'une alternance de couche GaN/InGaN. Le GaN joue le rôle de barrière, et l'InGaN de puits quantique.

I.3.1.e Déviations de la caractéristique I-V idéale

L'équation idéale d'une diode (I.28), est généralement modifiée pour décrire les caractéristiques expérimentales. L'équation suivante est communément utilisée pour décrire le fonctionnement d'une diode non-idéale [14].

$$I - \frac{(V - I \cdot R_s)}{R_p} = I_s \cdot \exp\left(\frac{q((V - V_s) - I \cdot R_s)}{n_{id}kT}\right) \quad (I.31)$$

Le coefficient d'idéalité n_{id} , généralement compris entre 1 et 2 traduit la compétition entre le courant de diffusion (à l'extérieur de la zone de déplétion) et celui de génération-recombinaison (dans la zone de déplétion) [17]. Dans le cas des LED GaN/InGaN, des valeurs supérieures à 2 ont été rapportées (généralement entre 4 et 8 [18]), parfois attribuées au courant tunnel assisté par les pièges [19], à un transport inefficace à travers les barrières quantiques [20], ou à une répartition du courant non-homogène (*current crowding*)[21], sans véritable consensus sur le sujet.

La tension de seuil V_s est la tension pour laquelle le courant augmente fortement. Sa valeur est proche de la tension de diffusion V_D .

D'autre part, les termes R_s et R_p sont les résistances série et parallèle de la diode idéale, qui traduisent par exemple la résistance d'accès à la diode (R_s) ou les courants de fuites qui contournent la jonction PN (R_p). Pour une diode idéale $R_s \rightarrow 0$ et $R_p \rightarrow \infty$. Une représentation schématique d'une diode 'réelle' est présentée figure I-12, représentée par une diode idéale, une résistance série et une résistance parallèle, ainsi que les courbes I-V d'une diode idéale et d'une diode non-idéale. Les caractéristiques de la diode 'idéale' présentée ici sont : $I_s = 10^{-13} A$, $n_{id} = 1$ et $V_s = 2V$.

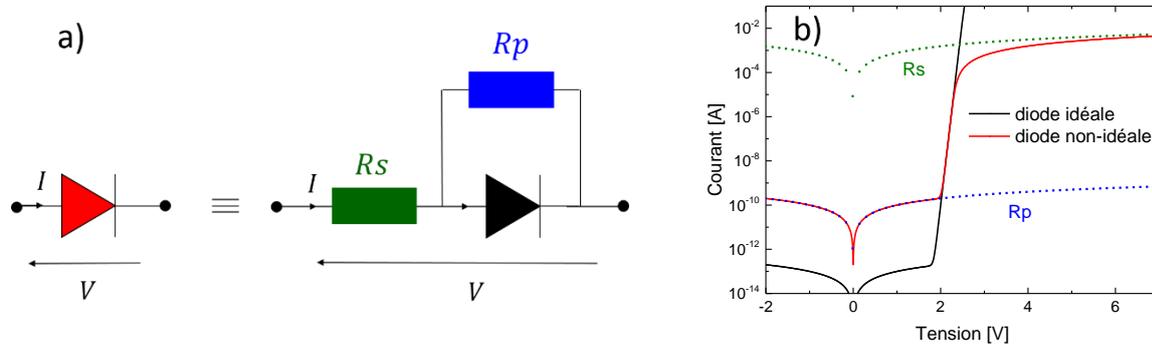


Figure I-12 : a) représentation schématique d'une diode 'réelle', symbolisée par une diode idéale, une résistance série et une résistance parallèle et b) caractéristiques I-V associées

1.3.2 Le nitrure de gallium (GaN) et ses alliages

1.3.2.a Les matériaux III-V

Les semi-conducteurs III-V sont majoritairement à gap direct, et sont donc favorables aux applications optoélectroniques. L'arséniure de gallium GaAs et le phosphure d'indium InP sont parmi les plus connus, et sont largement étudiés, notamment pour les télécommunications optiques grâce à leur longueur d'onde d'émission proche des fenêtres de transmission (1300 nm et 1550 nm). Le nombre quasi-illimité d'alliages possibles entre Ga, As, Al, In et P a permis d'adresser des longueurs d'onde du rouge jusqu'au vert (figure I-13).

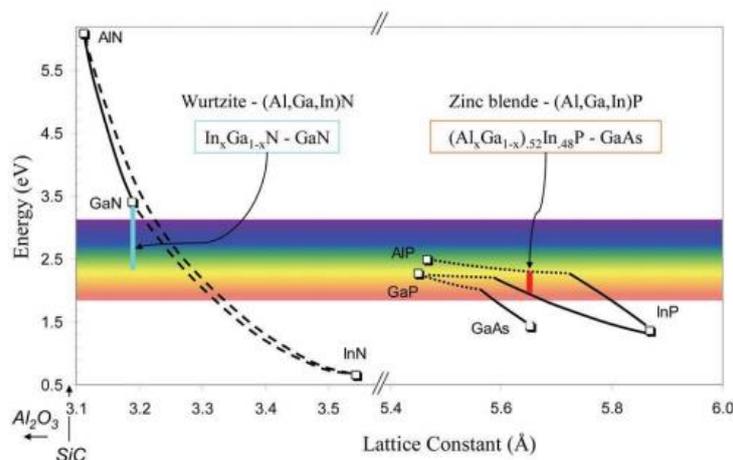


Figure I-13 : énergie du gap des principaux semi-conducteurs [22]

Le nitrure de gallium (GaN), grâce à son grand gap de 3.43 eV à 300 K, a permis d'obtenir des longueurs d'onde plus faibles, jusqu'à l'ultra-violet. Il présente l'avantage de pouvoir réaliser un alliage InGaN qui permet, selon le taux d'indium incorporé dans le GaN, de couvrir la gamme 400-550 nm. La réalisation de LED bleues a été une avancée décisive vers la réalisation de LED blanches (associant une LED bleue et un luminophore assurant la conversion d'une partie de la lumière bleue vers le jaune), aujourd'hui commercialisées pour l'éclairage.

I.3.2.b Croissance du GaN

Le nitrure de gallium (GaN) peut cristalliser sous forme de structure zinc blende ou wurtzite. Cependant la structure wurtzite est la plus commune car thermodynamiquement stable. Le réseau de Bravais est hexagonal, et l'axe perpendiculaire aux hexagones est appelé axe c. Les paramètres de maille a et b sont égaux. La structure wurtzite est composée de deux réseaux hexagonaux, interpénétrés et décalés suivant l'axe de de $5/8^{\circ}$ de la maille élémentaire (figure I-14).

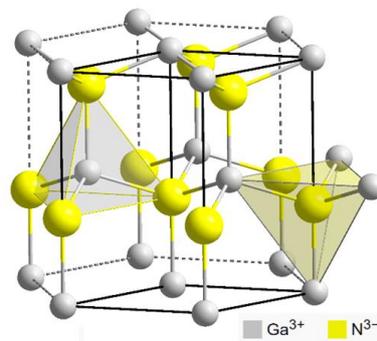


Figure I-14 : arrangement des atomes dans la maille élémentaire du GaN hexagonal

Le GaN est généralement épitaxié par MOCVD (*Metal Organic Chemical Vapor Deposition*) sur un substrat saphir, selon l'axe c ou (0001). Le désaccord de maille de 13% entre le GaN et le saphir, illustré ci-dessous, entraîne des dislocations durant la croissance du GaN et une mise sous contrainte du matériau.

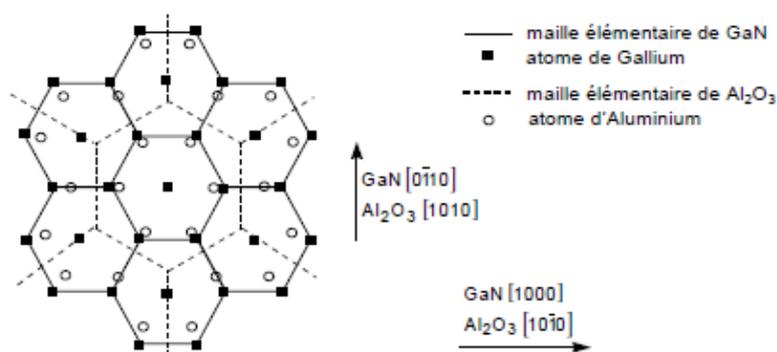


Figure I-15 : désaccord de maille entre le GaN et le saphir [23]

Ce fort désaccord de maille oblige à faire croître une couche de GaN tampon non-dopée où les défauts d'empilement vont se concentrer (figure I-16), ce qui permet d'obtenir une jonction PN avec une densité réduite de dislocations dans la zone active. Typiquement, la densité de dislocations dans le GaN épitaxié sur saphir est de l'ordre de 10^8 à 10^{10} cm^{-2} [24][25][26].

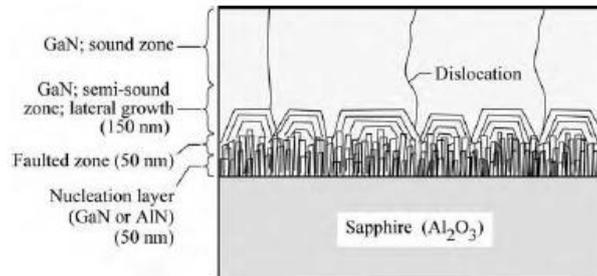


Figure I-16 : croissance de GaN sur saphir et dislocations [14]

Ces dislocations agissent comme des centres de recombinaison non-radiatifs et dégradent ainsi les performances des LED. D'autre part, il a été montré que la densité de dislocations affecte la longueur de diffusion des porteurs minoritaires [27]. La longueur de diffusion (L) d'un porteur dépend de son coefficient de diffusion (D), de sa durée de vie (τ) et de sa mobilité (μ).

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} \quad \text{avec} \quad D = \mu \frac{kT}{q} \quad (1.32)$$

La concentration de porteurs minoritaires dépend du taux de dislocation et varie en fonction de la longueur de diffusion des porteurs [28].

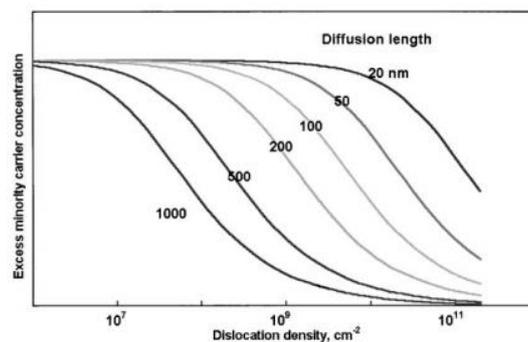


Figure I-17 : variation de la concentration de porteurs minoritaires en fonction de la densité de dislocations et de la longueur de diffusion [28]

Il a ainsi été montré dans la littérature (figure I-18) que les diodes qui présentent des faibles taux de dislocation TDD (*Threading Dislocation Density*) obtiennent un meilleur rendement [29] [30].

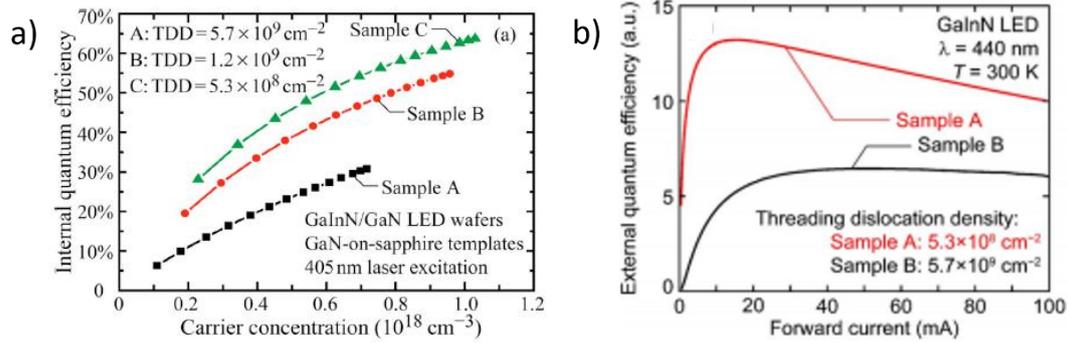


Figure I-18 : rendements de diodes pour différents taux de dislocation a) [29] b) [30]

Pour améliorer les performances des LED, de nombreuses recherches essayent de minimiser le taux de dislocations. L'utilisation de substrats patternés, ou PSS (*Patterned Sapphire Substrate*), permet de réduire le taux de dislocations. Pour cela, une structure micrométrique est répétée périodiquement à la surface du saphir. Cette structure est généralement de forme conique. Les dimensions typiques sont de l'ordre de 1,5 μm , 2 μm et 3 μm de hauteur, diamètre et pas de répétition respectivement.

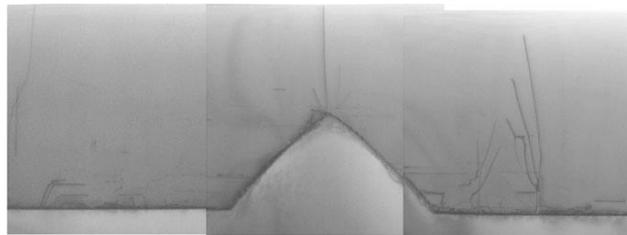


Figure I-19 : substrat PSS et dislocations sur PSS [31]

Lors de la croissance du GaN, certaines dislocations générées à l'interface GaN/saphir sont courbées et se terminent sur la face inclinée du cône. De plus, le GaN ne croît pas sur les flancs du cône, il n'y a donc pas de dislocations générées à ces endroits (figure I-19).

D'autre part, le GaN wurtzite est non centro-symétrique, c'est-à-dire que les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident pas. Cela donne naissance à une polarisation spontanée \vec{P}_{spont} dans le cristal selon l'axe c. Cette polarisation est présente dans le cristal à l'équilibre en l'absence de toute contrainte.

Nous avons vu que le GaN était contraint sur le saphir. Cette contrainte crée une polarisation piézoélectrique \vec{P}_{piezo} qui s'ajoute à la polarisation spontanée. La polarisation totale du GaN épitaxié sur du saphir selon l'axe c présente donc une polarisation totale de la forme :

$$\vec{P}_{totale} = \vec{P}_{spont} + \vec{P}_{piezo} \quad (I.33)$$

Cette polarisation se manifeste aux interfaces avec un autre composé, ce qui a des répercussions importantes dans la région à puits quantiques InGaN/GaN. En effet, le désaccord de maille entre le GaN et l'InGaN entraîne une forte polarisation. Cette polarisation crée un champ électrique dans les puits quantiques, ce qui entraîne une courbure de bandes. Les porteurs sont

spatialement séparés. Les fonctions d'onde des électrons et des trous se décalent, et la probabilité de recombinaison radiative baisse. De plus cette courbure crée un décalage vers le rouge des transitions optiques. Cet effet est appelé effet Stark confiné quantique QCSE (*Quantum Confined Stark Effect*). Une illustration du phénomène est présentée figure I-20.

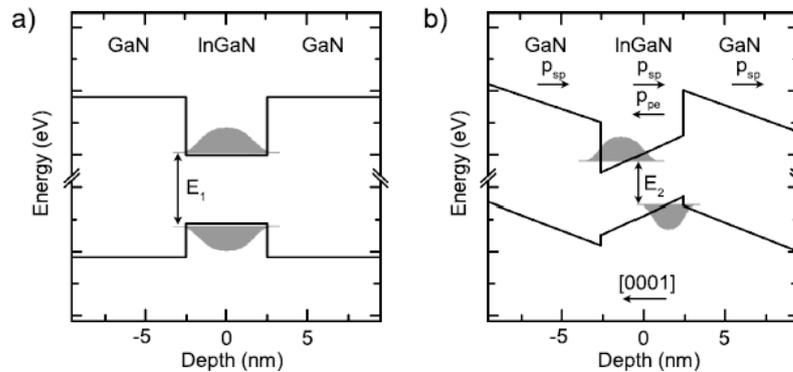


Figure I-20 : illustration schématique des bandes d'énergie dans un puits quantique a) soumis et b) non-soumis à la polarisation [32]

I.3.2.c Structure d'une LED InGaN/GaN

Nous avons vu en 1.3.1 qu'une LED est constituée d'une jonction PN, associée à une région à multiples puits quantiques pour favoriser le processus de recombinaison radiative. Pour réaliser une LED InGaN/GaN il faut donc pouvoir réaliser une couche GaN dopée P, une couche GaN dopée N et une région à puits quantiques, siège des recombinaisons radiatives des paires électron-trou en photons.

Le GaN peut facilement être dopé N, notamment grâce au silicium, dont le niveau donneur se situe à environ 30 meV sous la bande de conduction [33]. Ainsi à température ambiante, les porteurs sont tous ionisés et des dopages de l'ordre de 10^{19} cm^{-3} sont typiquement réalisés [34]. En revanche, le dopage P est plus difficile à réaliser. Ceci est dû à l'énergie d'activation élevée du Magnésium utilisé comme dopant (entre 120 meV et 200 meV [35]) qui implique que seulement 1% de tous les atomes de Magnésium sont ionisés à 300 K, contribuant ainsi à la densité de trous dans le GaN type P [36]. La qualité cristallographique du GaN étant fortement dégradée pour des concentrations de magnésium supérieures à 10^{20} cm^{-3} , il est difficile d'obtenir des couches avec des densités de trous supérieures à 10^{18} cm^{-3} [37].

La couche active, constituée de multiples puits quantiques, est réalisée à base d'une superposition de couches InGaN / GaN. Les couches d'InGaN forment un puits de potentiel, entre deux barrières de GaN. Les puits en InGaN déterminent la longueur d'onde d'émission. Pour une émission dans le bleu à 440 nm, le taux d'indium est d'environ 15%. L'épaisseur des puits d'InGaN et des barrières de GaN influe sur les niveaux d'énergies permis dans les puits et sur la densité de porteurs. Dans la pratique, l'épaisseur des puits est de l'ordre du nanomètre et celle des barrières de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Le nombre de puits varie typiquement de 5 à 15.

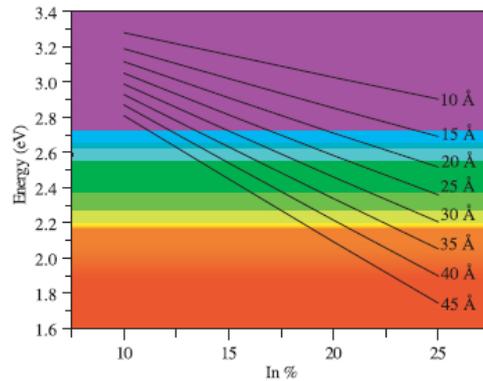


Figure I-21 : variation du gap de l'InGaN suivant la composition en indium et l'épaisseur des puits [38]

En augmentant la concentration d'indium, il est possible d'obtenir des LED vertes, et théoriquement rouges (figure I-21). Cependant, l'augmentation du taux d'indium augmente la contrainte du matériau et donc les effets néfastes de polarisation, ainsi que des défauts d'empilement qui agissent comme des centres de recombinaison non-radiatifs. Les LED vertes à base de GaN présentent pour cette raison un rendement inférieur aux LED bleues.

Enfin, une dernière couche est régulièrement utilisée dans la fabrication des LED GaN, il s'agit d'une couche dite bloqueuse d'électron EBL (*Electron Blocking Layer*). Cette couche en AlGaN s'oppose au passage des électrons afin qu'ils ne s'échappent pas de la zone active.

Ainsi, la structure finale classique d'une LED à base de GaN est constituée :

- d'une couche de GaN tampon, non intentionnellement dopée.
- d'une couche GaN dopé N à l'aide de silicium
- d'une région à multiples puits quantiques : InGaN/GaN
- d'une région EBL en AlGaN
- et enfin d'une couche GaN dopée P à l'aide de magnésium.

La structure finale des niveaux d'énergie d'une épitaxie LED est représentée figure I-22.

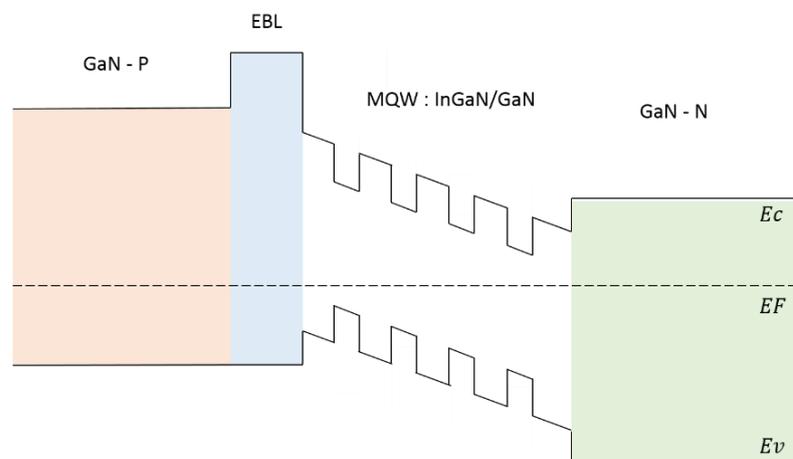


Figure I-22 : structure de bande classique d'une épitaxie InGaN/GaN, d'après [14]

En résumé, toutes ces zones : P-GaN, EBL, puits quantiques et N-GaN ont une fonction commune : injecter électrons et trous dans la région active et favoriser leur recombinaison de manière radiative. Ainsi, les épitaxies actuelles présentent des efficacités d'injection proche de 100% [39]. C'est-à-dire que la quasi-totalité des porteurs injectés dans la LED se recombinent dans la zone active. En revanche, toutes les recombinaisons ne sont pas radiatives.

1.3.3 Performances et rendements d'une LED

1.3.3.a *Recombinaisons radiatives et non-radiatives : le rendement quantique interne*

Les recombinaisons électrons-trous peuvent être radiatives, c'est-à-dire accompagnées de l'émission d'un photon, ou non-radiatives, c'est-à-dire typiquement accompagnées de l'émission de phonons (vibrations du réseau).

Le rendement quantique interne IQE (*Internal Quantum Efficiency*) traduit le rapport du taux de recombinaison radiative sur la somme de toutes les recombinaisons, soit

$$IQE = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{non-rad}} \quad (1.34)$$

Nous avons déjà vu que le taux de recombinaison radiative s'écrit sous la forme :

$$R_{rad} = B \cdot n \cdot p \quad (1.35)$$

Il existe plusieurs mécanismes par lesquels électrons et trous se recombinent de manière non radiatives ($R_{non-rad}$).

Les défauts dans la structure cristalline sont les causes principales de recombinaisons non radiatives (atomes étrangers, lacunes, dislocations, etc.). Ce sont les recombinaisons SRH (Shockley-Read-Hall). Ces défauts ont des niveaux d'énergie différents des atomes qu'ils remplacent. Ils forment ainsi des niveaux d'énergie dans la bande interdite du semiconducteur, qui sont d'efficaces centres de recombinaison, en particulier si le niveau d'énergie est proche du milieu du gap.

La statistique de ces processus fut établie en 1952 par Shockley et Read [40], et Hall [41]. Le taux de recombinaison SRH (R_{SRH}) est donnée par [41]:

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_n(p + p_0) + \tau_p(n + n_0)} \quad (1.36)$$

τ_n et τ_p sont les durées de vie des électrons et des trous, p_0 et n_0 sont les concentrations d'électrons et de trous à l'équilibre si le niveau de Fermi coïncide avec le niveau d'énergie du piège.

Considérant N_T la concentration de pièges et $c_{n,p}$ le coefficient de capture, il est possible d'exprimer la durée de vie des porteurs par :

$$\tau_{n,p} = \frac{1}{c_{n,p} N_T} \approx \frac{1}{A} \quad (1.37)$$

Où A est une constante traduisant le taux de recombinaisons SRH. Ce résultat indique que les recombinaisons SRH sont limitées par le taux de capture des porteurs minoritaires. Dans le cas d'un semi-conducteur dopé, où l'un des deux types de porteurs est dominant, on peut écrire le taux de recombinaison SRH sous la forme :

$$R_{SRH} = A \cdot n \quad (1.38)$$

Ceci traduit que le taux de recombinaison SRH est proportionnel à la concentration d'électrons (n) ou de trous (p).

D'autre part, d'importantes recombinaisons non-radiatives peuvent avoir lieu à la surface des semi-conducteurs. En effet, les surfaces constituent une forte perturbation de la périodicité du réseau cristallin, ce qui modifie le diagramme de bande théorique, valable dans un réseau strictement périodique et infini. De plus, les atomes à la surface n'ont pas les mêmes liaisons puisqu'il manque des atomes voisins. Ainsi, les électrons en limite du cristal ont des liaisons pendantes, c'est-à-dire des liaisons sans atomes voisins, dirigées vers le vide. Ces états électroniques peuvent être situés dans la bande interdite du semiconducteur et agir comme centres de recombinaison, similaires aux défauts cristallins des recombinaisons SRH. Les liaisons pendantes peuvent reconstruire des liaisons de surface ou piéger des électrons de la bande de conduction. Cet appariement des liaisons pendantes, appelé reconstruction de surface, peut générer localement une nouvelle structure atomique avec des niveaux d'énergie différents de ceux du cristal. Il a ainsi été montré que des états électroniques dans la bande interdite apparaissent à la surface du semiconducteur [14]. Le modèle de recombinaison de surface est similaire à celui des recombinaisons SRH.

Nous regrouperons sous le terme recombinaison SRH l'ensemble des recombinaisons non-radiatives liés à des défauts dans la structure cristalline et liés à des recombinaisons de surface.

Un autre mécanisme important de recombinaisons non-radiatives est appelé recombinaisons Auger. Dans ce cas, l'énergie disponible durant la recombinaison (environ E_g , l'énergie du gap) est dissipée par l'excitation d'un électron libre haut dans la bande de conduction, ou par un trou dans la bande de valence. Puisque deux porteurs du même type sont requis dans le procédé de recombinaison, le taux de recombinaison Auger (C) est donné par :

$$R_{Auger} = C_p \cdot n \cdot p^2 + C_n \cdot n^2 \cdot p \quad (1.39)$$

Que l'on peut simplifier sous la forme :

$$R_{Auger} = C \cdot n^3 \quad (1.40)$$

La dépendance cubique en concentration de porteurs traduit que les recombinaisons Auger ne réduisent l'efficacité lumineuse d'une LED qu'à fort courant d'injection de porteurs.

La figure I-23 résume les principales recombinaisons présentes dans une LED.

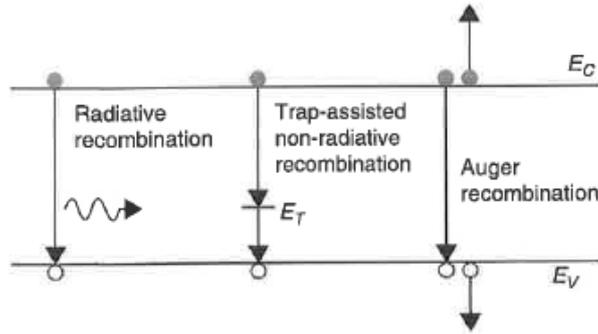


Figure I-23 : les principales recombinaisons électron-trou [42]

Ainsi, le taux de recombinaison globale (R) peut s'exprimer sous la forme :

$$R = R_{SRH} + R_{rad} + R_{Auger} \quad (1.41)$$

I.3.3.b Le modèle ABC

Les différents mécanismes de recombinaison présentés peuvent être résumés dans l'équation du taux de recombinaison total R :

$$R = A \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3 \quad (1.42)$$

Où les coefficients A , B et C représentent respectivement les recombinaisons non-radiatives SRH, radiatives et non-radiatives Auger.

Le rendement IQE peut alors s'exprimer en fonction des paramètres A , B et C selon l'équation :

$$IQE = \frac{B \cdot n^2}{A \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3} \quad (1.43)$$

D'autre part, le courant s'exprime par la relation :

$$I = q \cdot V_R \cdot (A \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3) \quad (1.44)$$

Avec V_R le volume de recombinaison.

Ces deux équations sont à la base du modèle ABC, communément utilisé dans l'étude des LED à base de GaN [43]. Dans l'exemple ci-dessous, une courbe caractéristique du rendement d'une LED est ajustée à l'aide du modèle ABC [44].

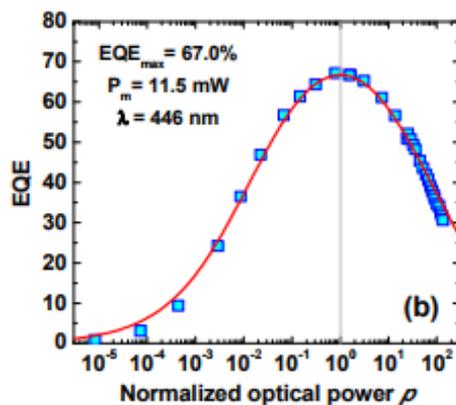


Figure I-24 : courbe EQE expérimentale ajustée par le modèle ABC [44]

Les valeurs typiques des paramètres A , B et C pour les LED GaN/InGaN obtenues dans la littérature sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Année	2007 [45]	2010 [46]	2013 [47]	2015 [48]	2016 [49]	2016 [50]
A (s^{-1})	$5 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$		$3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^5$
B ($cm^3 \cdot s^{-1}$)	$2 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-12}$	10^{-12}
C ($cm^6 \cdot s^{-1}$)	$2 \cdot 10^{-30}$	$1 \cdot 10^{-29}$	$2 \cdot 10^{-31}$	$1 \cdot 10^{-31}$		10^{-31}

Tableau I-3 : valeurs typiques des coefficients A , B et C de LED InGaN/GaN parues dans la littérature

I.3.3.c Le phénomène de droop et les solutions proposées

Un des défis majeurs des matériaux III-N est celui de la performance à haute densité de courant. L'allure typique d'une courbe IQE présente un maximum de rendement à faible injection, puis décroît lorsque le courant augmente, c'est le phénomène de 'droop'. Une illustration est donnée figure I-25.

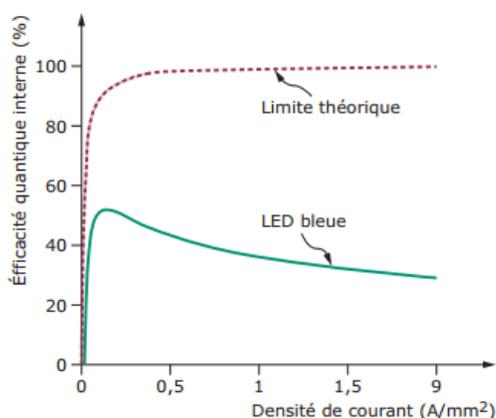


Figure I-25 : comparaison de l'allure du rendement d'une LED bleue réelle et d'une LED théorique [13]

En 2013, deux publications passent en revue les différentes causes possibles du droop et les solutions pour le réduire [51][52]. Les trois principales causes présentées sont les recombinaisons Auger, les dislocations et la fuite des électrons.

Les recombinaisons Auger, par lesquelles un électron se recombine avec un trou et transfère l'énergie ainsi créée pour exciter un troisième porteur, au lieu d'émettre de la lumière, est une piste privilégiée pour expliquer le droop de par sa dépendance cubique avec la concentration de porteurs. Bien que Iveland *et al.* [53] attribuent « sans ambiguïté » le droop aux recombinaisons Auger en 2013, le débat semble toujours ouvert.

La contribution des défauts cristallins au droop est aussi discutée. La forte concentration de dislocations dans les LED GaN est généralement associée aux recombinaisons SRH à faible densité de courant. Cependant, il a été proposé qu'un fort taux de dislocations puisse favoriser le droop en favorisant des mécanismes de transport non-radiatifs ou en créant une délocalisation des porteurs. Ce phénomène de délocalisation s'explique par le confinement des électrons et des trous aux minima de potentiel dans un puits quantique. Ces minima peuvent être causés par des fluctuations dans l'épaisseur des puits, dans leur composition ou par des barrières de potentiels entourant les défauts SRH. Les porteurs dans le puits sont séparés des dislocations et ont une longue durée de vie non-radiative. A faible courant, la concentration de porteurs injectée est faible, et les porteurs restent confinés dans les minima de potentiel. A forte densité de courant, ces minima de potentiels sont remplis et les porteurs sont délocalisés vers des sites non-radiatifs, ce qui mène à des durées de vie non-radiative plus faibles. La hausse du droop avec l'augmentation de la concentration d'indium semble aller en ce sens.

Enfin, la fuite des électrons est la troisième cause de droop étudiée. Bien que la couche EBL ait pour rôle d'empêcher ce phénomène, son efficacité est parfois remise en cause, car elle peut entraîner une moins bonne injection des trous, ou des effets de polarisation néfastes, sans assurer pour autant un confinement complet des électrons dans la zone active.

Les LED pour applications haute-luminance sont particulièrement sujettes au droop puisqu'elles nécessitent de fonctionner à des densités de courant élevées. De nombreuses études visent à comprendre et limiter le droop. Le principal axe de recherche consiste à faire croître le GaN sur un autre substrat que le saphir, ou bien sur un plan semi-polaire ou non polaire, autre que le plan c traditionnellement utilisé. L'utilisation d'un autre substrat que le saphir a pour but de réduire le désaccord de maille et ainsi réduire le taux de dislocations. D'autre part, la croissance sur du saphir selon un plan de croissance semi-polaire ou non-polaire permet de supprimer les effets de polarisation.

Ainsi, en 2010 Ling *et al.* [54] comparent le rendement de LED épitaxiées selon le plan c (c-LED) et le plan m non-polaire (m-LED). Selon eux, la forte polarisation des c-LED accentue la fuite des électrons et la distribution non-uniforme des trous, à l'origine du droop, tandis que le droop « négligeable » des m-LED est dû à l'absence de polarisation.

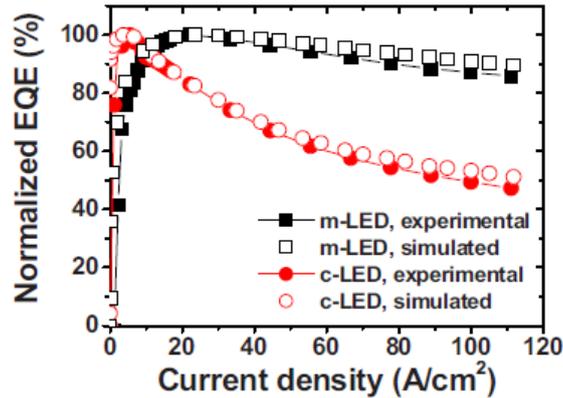


Figure I-26 : influence du plan de croissance sur le rendement d'une LED [54]

En 2013, DenBaars *et al.* [55] montrent l'avantage théorique du plan de croissance m ($10\bar{1}0$) non-polaire et donc vierge de polarisation spontanée. Les puits InGaN épitaxiés sur un GaN non-polaire n'induisent pas de polarisation piézo-électrique due à la contrainte du matériau. Le recouvrement des fonctions d'ondes de l'électron et du trou est alors très bon grâce à des bandes d'énergie qui restent plates (figure I-27).

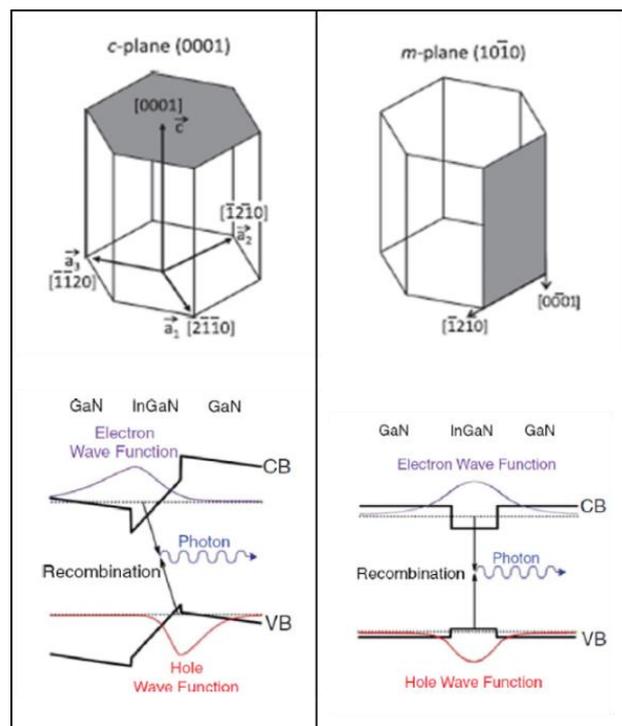


Figure I-27 : plan de croissance c et m , et conséquence sur la courbure des bandes [55]

Dans le même article, ils présentent l'avantage d'une croissance sur du GaN plutôt que du saphir pour s'affranchir des problématiques des contraintes liées à la différences de maille, et des dislocations qui en résultent (figure I-28). La croissance sur du GaN est cependant très chère, et les LED industrielles sont aujourd'hui réalisées en très grande majorité sur du saphir pour des raisons de coût.

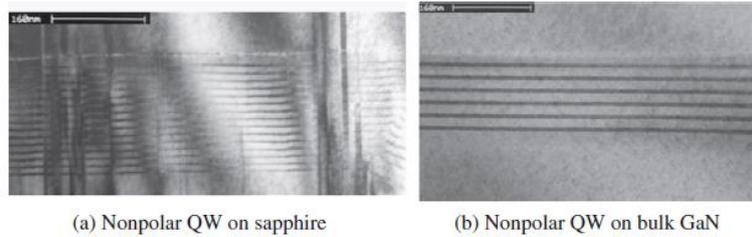


Figure I-28 : influence de la polarité du plan de croissance sur les dislocations [55] a) croissance de puits quantiques sur saphir b) croissance de puits quantiques sur GaN

En 2016, Badcock *et al.* [56] montrent que le rendement des LED polaires suit le modèle ABC, tandis que les LED non-polaires présentent un rendement constant, indépendant de la densité de porteurs (figure I-29).

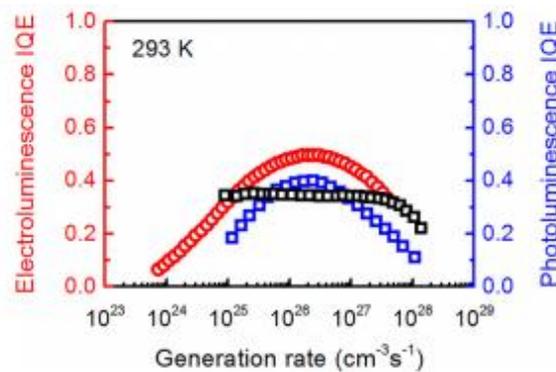


Figure I-29 : rendement IQE de LED sur plan c (en rouge par électroluminescence, et bleu par photoluminescence) et sur plan m (en noir) [56]

1.3.3.d L'extraction lumineuse et le rendement quantique externe

L'extraction lumineuse est un point critique du rendement des LED. En effet, tous les photons créés dans la zone active de la jonction PN ne sont pas émis en dehors de la LED. Le rendement quantique externe EQE (*External Quantum Efficiency*) traduit alors le rapport du nombre de photons émis en dehors de la LED sur le nombre de porteurs injectés, et s'exprime sous la forme :

$$EQE = IQE \times LEE \quad (1.45)$$

Où LEE est l'extraction lumineuse (*Light Extraction Efficiency*), rapport du nombre de photons extrait de la LED sur le nombre de photons émis dans la région à puits quantiques.

L'extraction est régie par la loi de Snell-Descartes.

$$n_{GaN} \cdot \sin \theta = n_{air} \cdot \sin \varphi \quad (1.46)$$

Où θ est l'angle d'incidence à l'interface semiconducteur/air et φ l'angle du rayon réfracté (figure I-30).

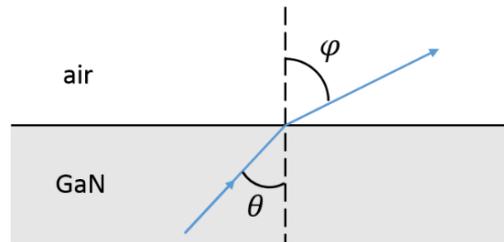


Figure I-30 : loi de Descartes à l'interface GaN / air

L'angle critique ϕ_c pour lequel les rayons entrent en réflexion totale interne est obtenue pour $\varphi = 90^\circ$, soit :

$$\phi_c = \arcsin\left(\frac{n_{air}}{n_{GaN}}\right) \quad (1.47)$$

Les rayons émis dans le cône d'extraction sont extraits, les autres entrent en réflexion totale interne (figure I-31).

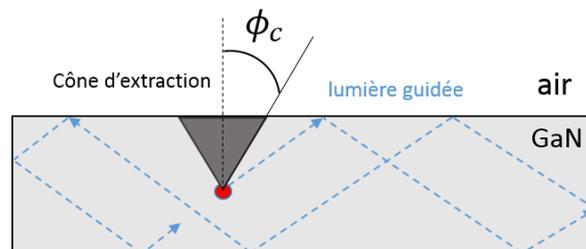


Figure I-31 : réflexion totale interne et cône d'extraction

Dans le cas du GaN, d'indice de réfraction $n = 2.45$ à 440 nm, l'angle critique ϕ_c vaut environ 23.6° . Le pourcentage de lumière extraire vaut alors :

$$\frac{P_{extraite}}{P_{totale}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \phi_c) \quad (1.48)$$

Ainsi, environ 4.3% de lumière est extraite à l'interface GaN / air.

L'extraction lumineuse est donc un point critique dans le rendement global d'une LED et de nombreuses solutions ont été proposées pour l'améliorer. Les principales techniques sont la texturation de surface [57][58], l'utilisation de substrat patterné [59] [60] [61], l'utilisation de cristaux photoniques [62][63] et de nouvelles formes de LED (triangulaires par exemple) [64] [65]. Dans tous les cas l'objectif est de rompre la symétrie du système pour favoriser l'extraction lumineuse. La figure I-32 résume les différentes techniques actuelles permettant d'améliorer l'extraction lumineuse dans une LED.

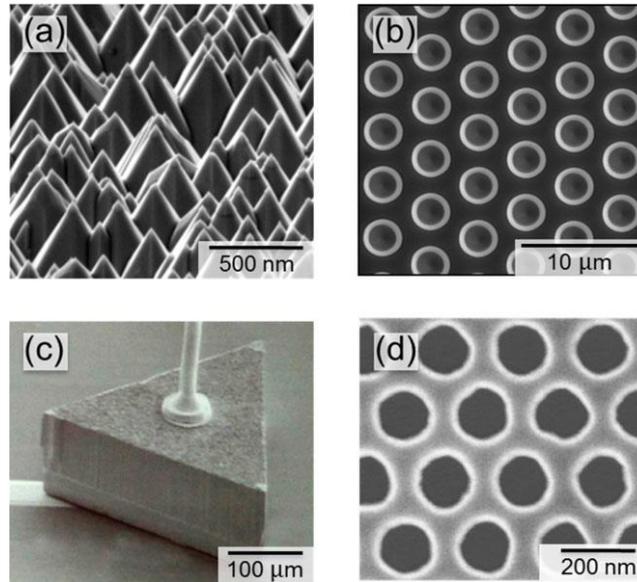


Figure I-32 : solutions pour améliorer l'extraction lumineuse dans une LED : a) texturation de surface, b) substrat patterné PSS, c) LED de forme triangulaire et d) cristaux photoniques [66]

Les LED commerciales utilisent typiquement un substrat PSS, associé à un dôme en époxy afin d'obtenir une extraction lumineuse de l'ordre de 50%. L'utilisation de cristaux photoniques peut permettre d'obtenir une extraction lumineuse jusqu'à 73% [63]. Des rendements d'extraction allant jusque 90% ont été rapportés en combinant la texturation de surface et l'utilisation d'une LED triangulaire [67].

I.3.3.e Le rendement total WPE

Le rendement total d'une LED, ou rendement WPE (*Wall-Plug Efficiency*) est défini par le rapport de la puissance optique sur la puissance électrique.

$$WPE = \frac{P_{opt}}{P_{elec}} \quad (1.49)$$

Contrairement au rendement EQE, il prend en compte les pertes d'énergie dans le système. On peut l'exprimer sous la forme d'un produit de rendements :

$$WPE = INJ \times IQE \times LEE \times ALIM \quad (1.50)$$

Où *INJ* est l'efficacité d'injection, c'est-à-dire la fraction de paires électron-trou injecté dans la LED qui atteignent la jonction PN. *IQE* est la part de ces paires électron-trou qui se recombine radiativement. *LEE* est la portion de photons créés qui sort de la LED. Enfin *ALIM* est le ratio de l'énergie d'un photon émis sur l'énergie de la paire électron-trou injectée dans la LED, ce qui correspond aux contacts électriques et pertes résistives dans le circuit.

Les technologies plus avancées étudiées en laboratoire permettent d'atteindre des rendements WPE de l'ordre de 85% [67].

I.4 Applications des LED

I.4.1 Les LED pour l'éclairage

I.4.1.a Historique de l'utilisation des LED

Les premières LED furent utilisées à des fins de signalisation, pour des applications nécessitant peu de flux lumineux. En effet, la première LED commercialisée en 1968 n'émettait que 10^{-3} lm de lumière rouge. Dans les années 1990, les recherches sur les LED GaN permirent la réalisation de LED bleues, ouvrant la voie vers la réalisation de LED blanches par l'utilisation couplée de LED bleue et de luminophore jaune. Aujourd'hui, des LED blanches de haute brillance sont disponibles sur le marché et produisent plusieurs centaines de lumens. Leur forte efficacité énergétique, faible consommation et longue durée de vie en font des dispositifs prometteurs pour différents types d'éclairage (intérieur, extérieur, phares de voitures, etc.).

L'augmentation du flux lumineux des LED suit une loi d'évolution, analogue à celle de la loi de Moore de la micro-électronique. Cette loi, dite loi de Haitz (figure I-33), et publiée en 2000, stipule que le flux lumineux augmente d'un facteur 20 par décennie tandis que le coût par lumen baisse d'un facteur 10.

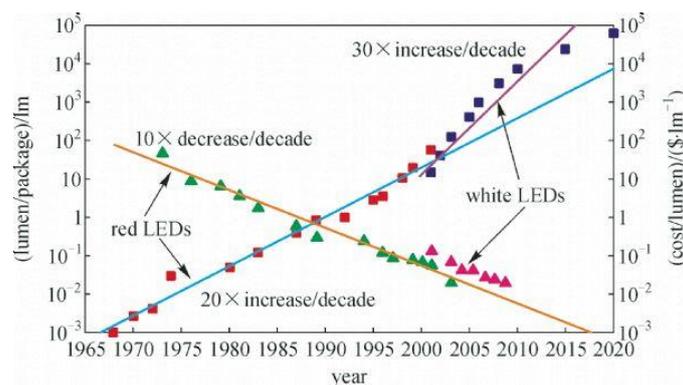


Figure I-33 : loi de Haitz [68]

Le principal marché des LED est aujourd'hui celui de l'éclairage. Les autres applications sont essentiellement les phares pour l'automobile et le rétro-éclairage dans les écrans LCD (figure I-34).

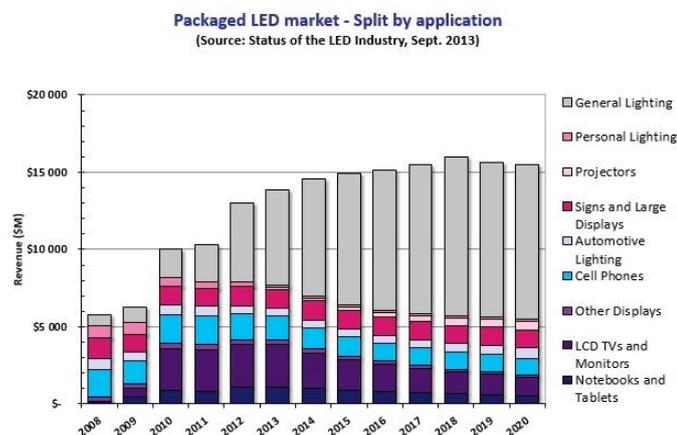


Figure I-34 : le marché des LED en 2013 [69]

I.4.1.b *Les applications futures*

Avec les LED, l'éclairage devient 'intelligent' (*smart-lighting*) et ouvre de nombreuses possibilités. C'est un levier de croissance important espéré pour le développement des LED. Le concept vise à associer l'éclairage à des capteurs et des outils de communication. Ainsi, il est possible d'augmenter l'efficacité énergétique en faisant évoluer l'intensité lumineuse selon les conditions environnementales. L'éclairage intelligent consiste par exemple à ajuster la lumière émise à la luminosité ambiante ou au niveau d'occupation d'un lieu.

Une nouvelle application, appelée Li-Fi (*Light-Fidelity*), consiste à moduler la lumière émise par une LED pour transmettre un contenu numérique. Elle doit permettre une consommation inférieure à une liaison Wifi, avec une directivité du signal qui permet une diffusion localisée de l'information.

L'utilisation de matrices de LED pour l'éclairage est apparue depuis plusieurs années. Utilisées par exemple pour les phares de voiture, elles permettent de réduire l'éclairement de certaines LED du réseau pour moduler l'éclairage. De manière plus générale, une matrice de LED sert à fonctionnaliser et contrôler la lumière émise. Elle peut aussi permettre d'afficher une information. Enfin, on peut mentionner ici d'autres utilisations possibles des LED, notamment pour la purification de l'eau (LED UV) [70], dans le domaine médical [71], ou pour l'agriculture [72].

I.4.2 Les écrans LED

I.4.2.a *Historique*

Les écrans LED apparaissent peu de temps après l'invention des LED rouges, sous forme d'afficheurs à segments. Dès 1972 la première montre digitale à afficheur LED est commercialisée, suivie en 1976 de calculatrices à afficheurs LED. Plus tard, les LED sont largement utilisées pour la signalisation urbaine (figure I-35).



Figure I-35 : exemples d'application d'afficheurs LED [14]

Ces afficheurs, à mi-chemin entre le domaine de l'éclairage et de l'écran, nous questionnent sur la notion même d'écran. Il est généralement admis qu'un écran est composé d'un grand nombre de pixels, de petite taille, et proches les uns des autres. Dans le cas contraire, on parlera d'afficheur.

L'une des premières utilisations commerciales d'un écran LED apparaît dès 1995, déjà pour la réalité virtuelle, avec la console de jeux vidéo *Virtual Boy* de Nintendo (figure I-36).



Figure I-36 : première utilisation d'un écran LED pour la réalité virtuelle : la console Virtual Boy

L'écran est en réalité constitué d'une barrette de 1X224 LED rouges, les seules existantes commercialement à cette époque, associée à un miroir pivotant permettant d'afficher une image d'une définition de 384 X 224 pixels sur 32 niveaux de gris. C'est un échec commercial majeur, et le projet est abandonné dès l'année suivant sa sortie.

Cet exemple est intéressant à plus d'un titre. Il nous rappelle que la commercialisation de casques de réalité virtuelle débuta dès 1995, et que déjà, le manque de maturité de l'écran nuit fortement à la qualité du casque. De plus, le manque de compacité de l'ensemble fut une raison importante de son échec. D'autre part, l'utilisation d'une simple barrette associée à un miroir pivotant peut permettre la formation d'une image 2D en utilisant la possibilité de modulation rapide des LED.

Après cet échec, aucun écran LED ne fut commercialisé, et il faut attendre le début des années 2010 pour que les recherches sur les écrans LED reprennent, motivées notamment par le besoin de micro-écrans haute-luminance pour la réalité augmentée.

I.4.2.b Ecrans et micro-écrans LED

Deux types d'écrans LED font l'objet de recherches actuellement. Il s'agit d'écrans et de micro-écrans LED, dont la distinction est rappelée figure I-37. Le premier est à vision directe, constitué de pixels reportés sur une grande surface, avec une faible densité de pixels. Le second est à très forte densité de pixels, et nécessite un système de grandissement de l'image. Dans les deux cas, la brique de base est un réseau de diodes de taille micrométrique (micro-LED ou μ LED).

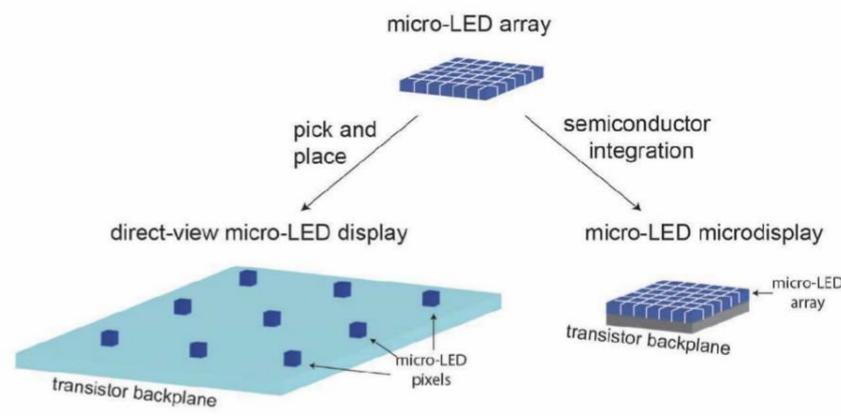


Figure I-37 : les écrans et micro-écrans LED [73]

La réalisation de micro-écrans LED est historiquement la première utilisation des matrices de micro-LED. Elle consiste à assembler un réseau de transistor (circuit d'adressage) au réseau de LED (couche électro-optique de l'écran). Les températures élevées d'épitaxie ne permettent pas de déposer le GaN directement sur CMOS. En conséquence, il faut connecter le circuit électronique de commande au réseau de diodes. Pour cela, trois approches peuvent être considérées (figure I-38).

La première consiste à hybrider un réseau de LED sur un circuit CMOS. C'est cette solution que nous utiliserons pour la réalisation des micro-écrans. La seconde approche consiste à fabriquer de manière monolithique le réseau de LED et le circuit électronique. La dernière consiste à transférer une épitaxie sur un substrat CMOS puis la graver. Dans ce dernier cas, la densité de pixels obtenue peut être très élevée puisque les contraintes d'alignement sont évitées. Des diodes de $3\ \mu\text{m}$ à un pas de $5\ \mu\text{m}$ ont ainsi été rapportées [74]. Dans tous les cas, l'objectif est d'obtenir un micro-écran à matrice active avec une densité de pixel élevée. Les principales applications visées de ces micro-écrans sont aujourd'hui les lunettes de réalité augmentée et les systèmes de projection.

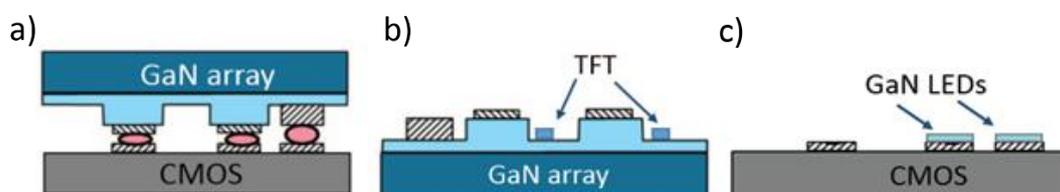


Figure I-38 : les technologies de fabrication de micro-écrans LED [75]
 a) hybridation b) intégration monolithique c) report sur substrat CMOS

La seconde application d'un réseau de micro-LED, plus récente, consiste à réaliser des écrans à vision directe. Dans ce cas, les pixels sont reportés sur un substrat TFT (par *pick and place*, figure I-37). Les applications sont alors des écrans traditionnels (smartphones, téléviseurs, etc.). Cette technologie, bien que plus complexe technologiquement permet de reporter des LED de différentes couleurs, et de réaliser ainsi des écrans couleur [76].

En résumé, ces deux technologies adressent deux marchés différents. L'une vise les applications haute-luminance : lunettes de réalité augmentée et micro-projecteurs. L'autre vise des applications faible-luminance : tablettes, smartphones et téléviseurs (figure I-39).

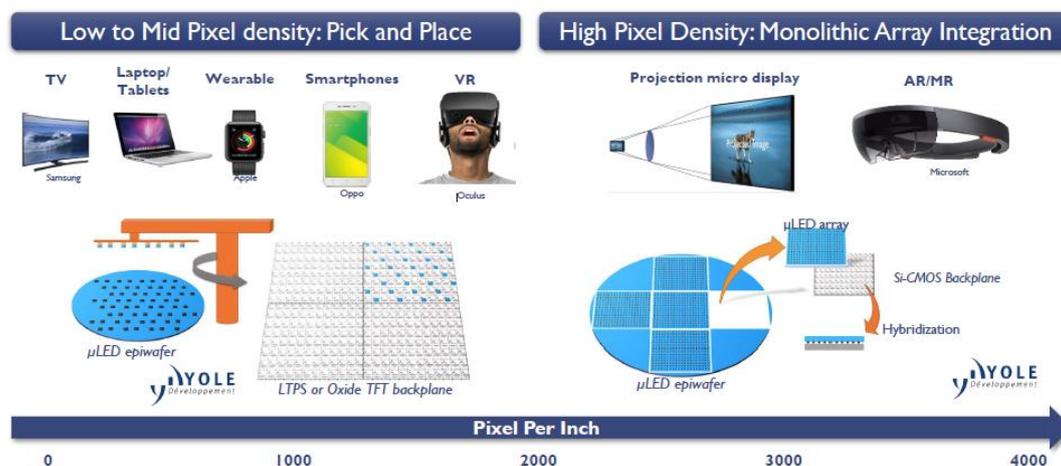


Figure I-39 : les applications des écrans et micro-écrans LED [77]

I.4.2.c Etat de l'art des micro-écrans LED

L'étude de micro-LED GaN pour la réalisation de micro-écrans apparaît dans la littérature au début des années 2000. En 2001, le premier prototype de micro-écran à base de LED III-N est publié [78].

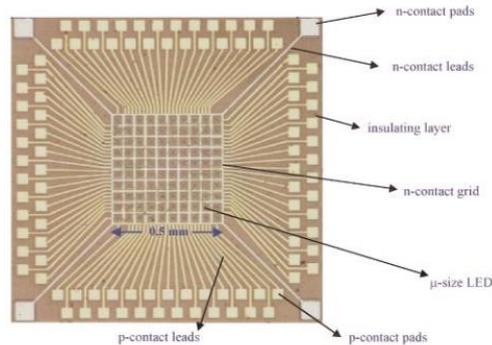


Figure I-40 : premier prototype de micro-écran LED [78]

L'écran de 10X10 pixels (figure I-40), constitué de diodes de 12 μm de diamètre au pas de 50 μm à adressage individuel, ouvre la voie vers la réalisation de micro-écrans. L'un des premiers défis technologiques pour fabriquer un réseau de micro-LED avec un grand nombre de pixels est le circuit électronique permettant d'adresser chaque pixel.

Dans un premier temps, l'adressage matriciel (cross-bar) permet d'augmenter la définition et de diminuer le nombre de contacts nécessaire. Dans un tel adressage, tous les pixels d'une même ligne (et d'une même colonne) partagent un contact commun (cathode ou anode). Ainsi, le nombre de contacts pour adresser un réseau de $N \times N$ LED passe de $2N^2$ à $2N$. Entre les années 2000 et 2010, la définition des micro écrans augmente, 12X12 [79], 25X25 [80], 32X32 [81], 64X64 [82] puis 128X96 [83], mais reste limité par cet type d'adressage.

L'adressage à matrice active à l'aide d'un circuit CMOS permet dans un second temps l'obtention d'écran avec des définitions de plus en plus élevées. La définition des micro-écrans LED augmente fortement en quelques années : 160X240 [84], 400X240 [85], 640X480 [86] et dernièrement 873X500 à un pas de pixellisation de 10 μm [87]. La réalisation de micro-écrans full-HD (1920X1080) semble dorénavant accessible dans un futur proche. Elle est principalement limitée par la disponibilité d'un circuit CMOS adapté permettant d'adresser un réseau très dense de pixels.



Figure I-41 : les premiers micro-écrans LED à matrice active (vert et bleu), rapportés en 2012 [50] et 2016 [49].
A droite le premier micro-écran LED couleur, rapporté en 2015 [88]

On peut enfin citer l'entreprise américaine *Ostendo*, qui dévoile en 2015 [88] le premier micro-écran couleur composé de 640X360 pixels à un pas de 10 μm . La particularité de leur technologie est d'empiler les trois couleurs (rouge, vert et bleu) de sorte que le pixel ne soit pas plus volumineux qu'un pixel monochrome, contrairement aux écrans traditionnels pour lesquels le pixel couleur est constitué de trois sous-pixels monochromes.

L'engouement pour l'étude des micro-LED GaN pour application d'affichage débute réellement en 2005 et connaît une croissance importante depuis, comme le montre le nombre de publications parues sur le sujet (figure I-42.a). Un résumé des principaux acteurs (académiques, start-up et PME) ayant publiés leurs résultats est proposé figure I-42.b. La tendance actuelle est la course aux très petits pas de pixellisation et à la haute définition.

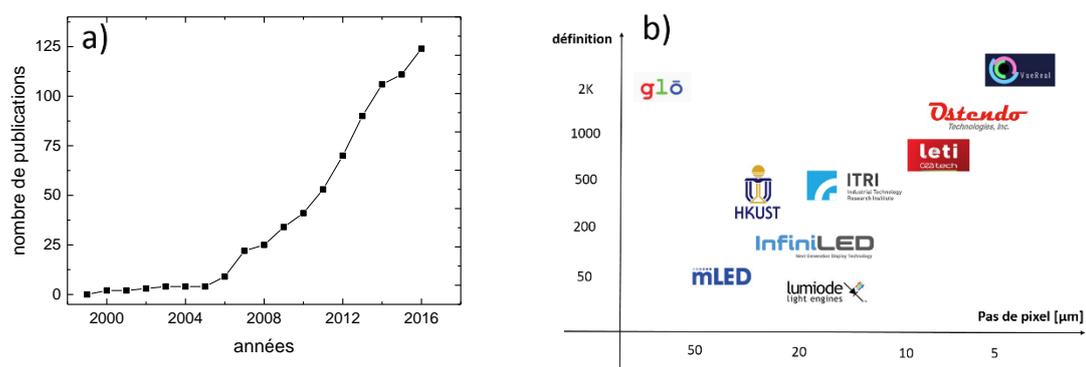


Figure I-42 : a) nombre de publications répondant aux mots-clés : écran, micro, LED et GaN. b) définition et pas de pixellisation publiés des micro-écrans LED

Dans le même temps, les industriels s'intéressent aux micro-écrans LED et les rachats de start-up travaillant sur les micro-LED par de grands groupes se multiplient. Ainsi, Apple rachète *Luxvue* en 2014, suivi par Oculus en 2016 (*infiniLED* et *mLED*), Sharp (*eLux*) et Google, qui investit dans *Glo*, en 2017. L'intérêt pour les micro-LED connaît donc une très forte hausse depuis quelques années.

En conclusion de cet état de l'art des applications des LED, il apparaît que le domaine des écrans LED pourrait bouleverser le marché des LED dans un futur proche. Les premières études sur les micro-écrans LED apparaissent au début des années 2000, et les premiers prototypes de micro-écrans LED à matrice active apparaissent au début des années 2010. L'avènement du domaine de la réalité virtuelle et augmentée à partir de 2015 met en exergue les lacunes des écrans actuels. Dès lors, l'étude des écrans LED rencontre un vif intérêt de la part des industriels, notamment les micro-écrans haute-luminance pour la réalité augmentée.

I.5 Présentation de la thèse

I.5.1 Spécificités des matrices de micro-LED

Nous avons vu précédemment que la brique de base nécessaire à la réalisation d'écrans LED est le réseau de micro-LED. Les premières études sur des diodes de taille micrométrique datent du début des années 2000. Choi *et al.* [89] observent en 2003 que les micro-LED présentent une meilleure émission lumineuse que les LED de taille macrométrique (figure I-43.a). La même année, Jeon *et al.* [82] dévoilent que les micro-LED présentent une tension de seuil plus élevée (figure I-43.b).

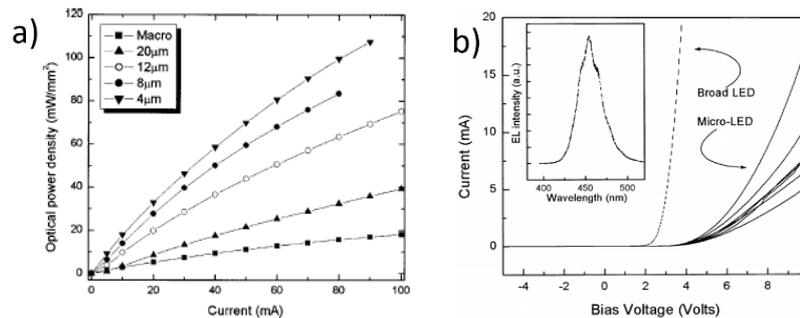


Figure I-43 : comparaison a) optique [89] et b) électrique [82] d'une LED et de micro-LED

Deux ans plus tard, Tian *et al.* [90] étudient l'influence de la taille des LED sur le rendement, en particulier sur le *droop*. Ils montrent qu'à faible densité de courant, le rendement des micro-LED est réduit (encart figure I-44), ce qu'ils attribuent à des recombinaisons non-radiatives de type SRH induites par les défauts sur les flancs. En revanche, à forte densité de courant, le rendement des micro-LED est supérieur grâce à une meilleure répartition du courant (figure I-44).

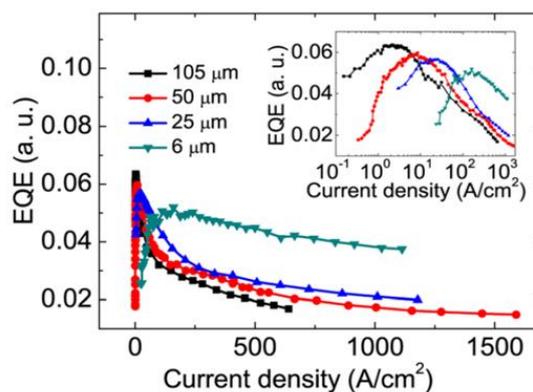


Figure I-44 : courbes de rendement EQE en fonction de la densité de courant de micro-LED de différentes tailles

L'effet de la miniaturisation du pixel n'est pas le seul élément à considérer. Le matricage de diode commence à être étudié dans la littérature. En 2015, Herrnsdorf *et al.* [91] étudient la thermique dans un réseau de micro-LED. Ils montrent notamment l'intérêt d'un plan de masse autour de chaque pixel pour que le courant soit distribué de manière homogène sur la surface de la LED, évitant ainsi l'échauffement du dispositif (figure I-45).

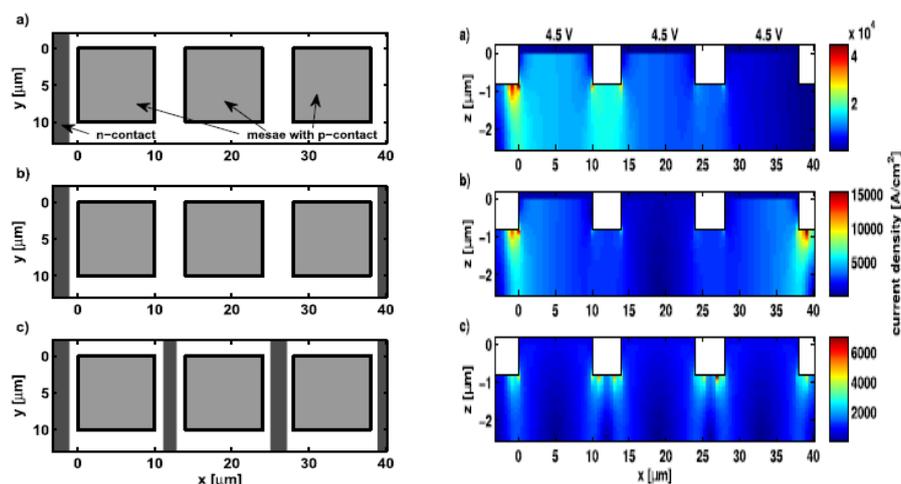


Figure I-45 : impact d'un plan de masse N sur la dissipation thermique dans un réseau de LED

D’autre part, Li *et al.* [92] étudient le cross-talk optique dans un réseau de micro-pixels GaN. Ils montrent que les LED épitaxiées sur saphir montrent un fort cross-talk optique, contrairement aux LED sur silicium. Ils attribuent le cross-talk au saphir transparent qui facilite une propagation de la lumière dans les directions latérales. C’est une problématique importante à considérer dans le cas de réseau de LED pour obtenir des images de bonne qualité.

Les premières études semblent donc montrer des densités de courant et de puissance optique plus élevées pour les micro-LED. Une distribution plus homogène du courant ainsi qu’une meilleure extraction lumineuse sont évoquées pour expliquer ces observations. D’autre part, l’influence du matriçage commence à être étudiée. Il semble bénéfique thermiquement en permettant une meilleure dissipation de la chaleur, mais néfaste optiquement car à l’origine de cross-talk optique.

Les publications étudiant les propriétés des matrices de micro-LED sont cependant relativement peu nombreuses. De plus, ces études sont difficiles à comparer, à cause d’épitaxies différentes, de procédés de fabrication ou de moyens de caractérisation différents. Une analyse plus systémique est donc nécessaire pour étudier les réseaux de micro-LED. Il faut pouvoir comprendre les rôles relatifs de l’épitaxie, du procédé de fabrication et des moyens de caractérisation sur les résultats. D’autre part, le matriçage d’une épitaxie LED à forte densité de pixel implique de nombreuses conséquences. L’impact de la proximité des LED sur les aspects thermiques, électriques et optiques, ainsi que la dispersion de ces paramètres sont autant de points à considérer.

1.5.2 Les objectifs de thèse

L’objectif général de la thèse est de comprendre les spécificités des LED à base de nitrure de gallium GaN utilisées pour les micro-écrans, c’est-à-dire des LED :

- utilisées en pixel de quelques micromètres de taille, au lieu de quelques centaines de micromètres pour l’éclairage,

- disposées en matrice 2D, à plusieurs centaines de milliers d'exemplaires, à la différence de l'unité pour l'éclairage,
- permettant la formation d'images, notamment haute-luminance.

I.5.3 Plan du manuscrit

Les travaux menés au cours de cette thèse seront divisés en trois chapitres.

Le chapitre 2 traitera de l'optimisation du rendement des LED à travers l'étude du procédé de fabrication. Nous présenterons les épitaxies utilisées, les principales étapes du procédé de fabrication, et les améliorations apportées afin de favoriser notamment l'injection électrique et l'extraction lumineuse.

Dans le chapitre 3, l'impact de la taille sur les performances des LED sera étudié. Les caractéristiques électro-optiques de LED de différentes tailles seront présentées. Les effets observés seront modélisés et le rôle des bords de pixels sera étudié. Des pistes d'améliorations envisagées pour améliorer les performances des micro-LED seront proposées. Enfin, le cas particulier des LED vertes sera présenté.

Enfin dans le chapitre 4, nous étudierons les LED en tant que réseau 2D permettant la formation d'images. Des matrices de micro-LED seront caractérisées et les effets de dispersion seront en particulier analysés. L'impact du matriçage de micro-LED sur le cross-talk optique sera ensuite présenté et les micro-écrans LED réalisés au cours de ces travaux de thèse seront caractérisés (luminance, directivité, qualité d'image, taux de fonctionnement, etc.).

En conclusion générale de ce manuscrit, les principaux résultats de la thèse seront résumés, et les perspectives envisagées dans le domaine des micro-écrans LED seront présentées.

I.6 Conclusion

La technologie LED est une technologie prometteuse dans le domaine des écrans, et en particulier des micro-écrans pour lesquels les besoins de compacité, de consommation et de luminance sont des contraintes fortes. La physique des semi-conducteurs a été présentée, en particulier des LED à base de GaN, ainsi que les principaux facteurs limitant leur rendement. Nous avons ensuite procédé à un état de l'art des recherches sur les micro-écrans LED et présenté les axes d'étude qui seront abordés dans la suite de ce manuscrit. Les trois principaux axes d'étude qui formeront le plan de ce manuscrit de thèse seront l'amélioration du rendement des LED à travers l'étude du procédé de fabrication, l'impact des effets de taille des LED sur leurs caractéristiques électro-optiques et l'étude des micro-LED en tant que réseau 2D permettant la formation d'images.

I.7 Références

- [1] F. Templier, "Séminaire écrans et systèmes de visualisation," 17-Mar-2015.
- [2] F. Templier, *OLED microdisplays*. ISTE Ltd/John Wiley and Sons Inc, 2014.
- [3] P. Analytics, "Global Display Market - progression from CRT (past) >>> LCD / PDP (present) >>> OLED (approaching) >>> AMOLED... <http://fb.me/15xLuzbXk>," @panoptic_in, 10-Mar-2012. .
- [4] "What Makes A Tablet PC - What Are The Parts?," *Techy View*. [Online]. Available: <https://techyview.com/tablet-guides/what-are-the-parts-of-a-tablet/>.
- [5] "fonctionnement des écrans à cristaux liquides." [Online]. Available: <http://cristauxliquides.free.fr/fonctionnement.htm>.
- [6] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, "Organic electroluminescent diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, no. 12, pp. 913–915, Sep. 1987.
- [7] Y. Murat, *Nouvelles structures électroluminescentes organiques pour applications signalétiques et petits afficheurs*. Bordeaux, 2017.
- [8] W. Brütting, J. Frischeisen, T. D. Schmidt, B. J. Scholz, and C. Mayr, "Device efficiency of organic light-emitting diodes: Progress by improved light outcoupling," *Phys. Status Solidi A*, vol. 210, no. 1, pp. 44–65, Jan. 2013.
- [9] "LCoS," *Wikipedia*. 18-May-2015.
- [10] A. Ghosh *et al.*, "Ultra-High-Brightness 2 x 2K Full-Color OLED Microdisplay Using Direct Patterning of OLED Emitters," *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 48, no. 1, pp. 226–229, May 2017.
- [11] J. Spindler *et al.*, "High Brightness OLED Lighting," *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 47, no. 1, pp. 294–297, May 2016.
- [12] H. Mathieu and H. Fanet, *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques cours et exercices corrigés*. Paris: Dunod, 2009.
- [13] G. Zissis and X. De Logivière, "Diodes électroluminescentes LED pour l'éclairage Panorama et tendances technologiques," *Tech. Ing.*, p. Référence IN18, Nov. 2011.
- [14] E. F. Schubert, *Light-emitting diodes*, 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2006.
- [15] S. Nakamura, "Nobel Lecture: Background story of the invention of efficient blue InGaN light emitting diodes*," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 87, no. 4, pp. 1139–1151, Oct. 2015.
- [16] A. David, "High-efficiency GaN-based light-emitting diodes : light extraction by photonic crystals and microcavities.," phdthesis, Ecole Polytechnique X, 2006.
- [17] J. M. Shah, Y.-L. Li, T. Gessmann, and E. F. Schubert, "Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors ($n \gg 2.0$) in AlGaIn/GaN p-n junction diodes," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 4, pp. 2627–2630, Jul. 2003.
- [18] A. David, C. A. Hurni, N. G. Young, and M. D. Craven, "Electrical properties of III-Nitride LEDs: Recombination-based injection model and theoretical limits to electrical efficiency and electroluminescent cooling," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, no. 8, p. 083501, Aug. 2016.
- [19] M. Auf der Maur, B. Galler, I. Pietzonka, M. Strassburg, H. Lugauer, and A. Di Carlo, "Trap-assisted tunneling in InGaIn/GaN single-quantum-well light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 13, p. 133504, Sep. 2014.
- [20] D. Zhu *et al.*, "The origin of the high diode-ideality factors in GaInN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 8, p. 081113, Feb. 2009.
- [21] V. K. Malyutenko and S. S. Bolgov, "Effect of current crowding on the ideality factor in MQW InGaIn/GaN LEDs on sapphire substrates," presented at the Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XIV, 2010, vol. 7617, p. 76171K.
- [22] M. R. Krames *et al.*, "Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting," *J. Disp. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 160–175, Jun. 2007.
- [23] A. Philippe, *Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus*. Lyon, INSA, 1999.

- [24] D.-P. Han *et al.*, “Nonradiative recombination mechanisms in InGaN/GaN-based light-emitting diodes investigated by temperature-dependent measurements,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 15, p. 151108, Apr. 2014.
- [25] P. Tian *et al.*, “Characteristics of GaN-based light emitting diodes with different thicknesses of buffer layer grown by HVPE and MOCVD,” *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 7, p. 075101, 2017.
- [26] J. Yu *et al.*, “Influence of dislocation density on internal quantum efficiency of GaN-based semiconductors,” *AIP Adv.*, vol. 7, no. 3, p. 035321, Mar. 2017.
- [27] K. Kumakura, T. Makimoto, N. Kobayashi, T. Hashizume, T. Fukui, and H. Hasegawa, “Minority carrier diffusion length in GaN: Dislocation density and doping concentration dependence,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 5, p. 052105, Jan. 2005.
- [28] J. S. Speck and S. J. Rosner, “The role of threading dislocations in the physical properties of GaN and its alloys,” *Phys. B Condens. Matter*, vol. 273, pp. 24–32, Dec. 1999.
- [29] Q. Dai *et al.*, “Internal quantum efficiency and nonradiative recombination coefficient of GaInN/GaN multiple quantum wells with different dislocation densities,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 11, p. 111109, Mar. 2009.
- [30] M. F. Schubert *et al.*, “Effect of dislocation density on efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 23, p. 231114, Dec. 2007.
- [31] N. Okada, T. Murata, K. Tadatomo, H. C. Chang, and K. Watanabe, “Growth of GaN Layer and Characterization of Light-Emitting Diode Using Random-Cone Patterned Sapphire Substrate,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 12R, p. 122103, Dec. 2009.
- [32] S. Suihkonen, “Fabrication of InGaN Quantum Wells for LED Applications,” 978-951-22-9286-8.
- [33] W. Götz, N. M. Johnson, C. Chen, H. Liu, C. Kuo, and W. Imler, “Activation energies of Si donors in GaN,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 22, pp. 3144–3146, May 1996.
- [34] S. Nakamura and G. Fasol, *The blue laser diode GaN based light emitters and lasers*. Berlin; New York: Springer, 1997.
- [35] I. P. Smorchkova *et al.*, “Mg doping of GaN layers grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 6, pp. 718–720, Feb. 2000.
- [36] A. Castiglia, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, “Role of stable and metastable Mg–H complexes in p-type GaN for cw blue laser diodes,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 21, p. 213505, May 2011.
- [37] J. O. Song, J.-S. Ha, and T.-Y. Seong, “Ohmic-Contact Technology for GaN-Based Light-Emitting Diodes: Role of P-Type Contact,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 1, pp. 42–59, Jan. 2010.
- [38] P. Mottier, *LED for Lighting Applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [39] I. E. Titkov, D. A. Sannikov, Y.-M. Park, and J.-K. Son, “Blue light emitting diode internal and injection efficiency,” *AIP Adv.*, vol. 2, no. 3, p. 032117, Jul. 2012.
- [40] W. Shockley and W. T. Read, “Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons,” *Phys. Rev.*, vol. 87, no. 5, pp. 835–842, Sep. 1952.
- [41] R. N. Hall, “Electron-Hole Recombination in Germanium,” *Phys. Rev.*, vol. 87, no. 2, pp. 387–387, Jul. 1952.
- [42] J.-J. Huang, H.-C. Kuo, and S.-C. Shen, Eds., *Nitride semiconductor light-emitting diodes (LEDs): materials, technologies and applications*. Oxford: Woodhead Publishing, 2014.
- [43] S. Karpov, “ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs: a review,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 47, no. 6, pp. 1293–1303, Jun. 2015.
- [44] S. Karpov, “ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs,” in *Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 2014*, 2014, pp. 17–18.
- [45] Y. C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe, N. F. Gardner, A. Munkholm, and M. R. Krames, “Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 14, p. 141101, Oct. 2007.
- [46] A. David and M. J. Grundmann, “Droop in InGaN light-emitting diodes: A differential carrier lifetime analysis,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 10, p. 103504, 2010.

- [47] E. Kioupakis, Q. Yan, D. Steiauf, and C. G. V. de Walle, "Temperature and carrier-density dependence of Auger and radiative recombination in nitride optoelectronic devices," *New J. Phys.*, vol. 15, no. 12, p. 125006, 2013.
- [48] J. Piprek, F. Römer, and B. Witzigmann, "On the uncertainty of the Auger recombination coefficient extracted from InGaN/GaN light-emitting diode efficiency droop measurements," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 10, p. 101101, Mar. 2015.
- [49] X. Meng *et al.*, "Study on efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 1, p. 013501, Jan. 2016.
- [50] T. H. Ngo, B. Gil, P. Valvin, B. Damilano, K. Lekhal, and P. D. Mierry, "Auger effect in yellow light emitters based on InGaN–AlGaIn–GaN quantum wells," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 5S, p. 05FG10, Apr. 2016.
- [51] J. Cho, E. F. Schubert, and J. K. Kim, "Efficiency droop in light-emitting diodes: Challenges and countermeasures," *Laser Photonics Rev.*, vol. 7, no. 3, pp. 408–421, May 2013.
- [52] G. Verzellesi *et al.*, "Efficiency droop in InGaN/GaN blue light-emitting diodes: Physical mechanisms and remedies," *J. Appl. Phys.*, vol. 114, no. 7, p. 071101, Aug. 2013.
- [53] J. Iveland, L. Martinelli, J. Peretti, J. S. Speck, and C. Weisbuch, "Direct Measurement of Auger Electrons Emitted from a Semiconductor Light-Emitting Diode under Electrical Injection: Identification of the Dominant Mechanism for Efficiency Droop," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, no. 17, Apr. 2013.
- [54] S.-C. Ling, T.-C. Lu, S.-P. Chang, J.-R. Chen, H.-C. Kuo, and S.-C. Wang, "Low efficiency droop in blue-green m-plane InGaN/GaN light emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 23, p. 231101, Jun. 2010.
- [55] S. P. DenBaars *et al.*, "Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays," *Acta Mater.*, vol. 61, no. 3, pp. 945–951, Feb. 2013.
- [56] T. J. Badcock, M. Ali, T. Zhu, M. Pristovsek, R. A. Oliver, and A. J. Shields, "Radiative recombination mechanisms in polar and non-polar InGaN/GaN quantum well LED structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, no. 15, p. 151110, Oct. 2016.
- [57] H.-W. Huang *et al.*, "Investigation of InGaN/GaN light emitting diodes with nano-roughened surface by excimer laser etching method," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 136, no. 2–3, pp. 182–186, Jan. 2007.
- [58] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, "Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 6, p. 855, 2004.
- [59] G. Yang *et al.*, "Investigation of light output performance for gallium nitride-based light-emitting diodes grown on different shapes of patterned sapphire substrate," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 33, pp. 149–153, May 2015.
- [60] Q. Zhou, M. Xu, Q. Li, and H. Wang, "Improved Efficiency of GaN-Based Green LED by a Nano-Micro Complex Patterned Sapphire Substrate," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 12, pp. 983–986, Jun. 2017.
- [61] J. H. Lee, D. Y. Lee, B. W. Oh, and J. H. Lee, "Comparison of InGaN-Based LEDs Grown on Conventional Sapphire and Cone-Shape-Patterned Sapphire Substrate," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 1, pp. 157–163, Jan. 2010.
- [62] A. David *et al.*, "Photonic crystal laser lift-off GaN light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 13, p. 133514, Mar. 2006.
- [63] J. J. Wierer, A. David, and M. M. Megens, "III-nitride photonic-crystal light-emitting diodes with high extraction efficiency," *Nat. Photonics*, vol. 3, no. 3, pp. 163–169, Mar. 2009.
- [64] C.-C. Kao *et al.*, "Light-output enhancement in a nitride-based light-emitting diode with 22° undercut sidewalls," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 19–21, Jan. 2005.

- [65] W. Y. Fu, K. N. Hui, X. H. Wang, K. Wong, P. T. Lai, and H. W. Choi, "Geometrical Shaping of InGaN Light-Emitting Diodes by Laser Micromachining," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 15, pp. 1078–1080, Aug. 2009.
- [66] C. Weisbuch, M. Piccardo, L. Martinelli, J. Iveland, J. Peretti, and J. S. Speck, "The efficiency challenge of nitride light-emitting diodes for lighting," *Phys. Status Solidi A*, vol. 212, no. 5, pp. 899–913, May 2015.
- [67] C. A. Hurni *et al.*, "Bulk GaN flip-chip violet light-emitting diodes with optimized efficiency for high-power operation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 3, p. 031101, Jan. 2015.
- [68] Z. Liu, S. Liu, K. Wang, and X. Luo, "Status and prospects for phosphor-based white LED packaging," *Front. Optoelectron. China*, vol. 2, no. 2, pp. 119–140, Jun. 2009.
- [69] "Packaged LED market in 2013." [Online]. Available: http://www.yole.fr/iso_album/illustration_ledpackagemarket_status_of_the_led_industry_2013_yole_developpement_may_2014.jpg. [Accessed: 28-Aug-2017].
- [70] K. Song, M. Mohseni, and F. Taghipour, "Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review," *Water Res.*, vol. 94, pp. 341–349, May 2016.
- [71] N. Yeh, T. J. Ding, and P. Yeh, "Light-emitting diodes' light qualities and their corresponding scientific applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 55–61, Nov. 2015.
- [72] "Les LEDs promettent de révolutionner l'agriculture urbaine." [Online]. Available: <http://www.agrapresse.fr/les-leds-promettent-de-r-volutionner-l-agriculture-urbaine-art417773-39.html?Itemid=360>.
- [73] B. R. Tull, N. Twu, Y.-J. Hsu, S. Leblebici, I. Kymissis, and V. W. Lee, "19-1: Invited Paper: Micro-LED Microdisplays by Integration of III-V LEDs with Silicon Thin Film Transistors," *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 48, no. 1, pp. 246–248, May 2017.
- [74] F. Templier *et al.*, "A Novel Process for Fabricating High-Resolution and Very Small Pixel-pitch GaN LED Microdisplays," *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 48, no. 1, pp. 268–271, May 2017.
- [75] F. Templier, "GaN-based emissive microdisplays: A very promising technology for compact, ultra-high brightness display systems," *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 24, no. 11, pp. 669–675, 2016.
- [76] M. Meitl *et al.*, "Passive Matrix Displays with Transfer-Printed Microscale Inorganic LEDs," *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 47, no. 1, pp. 743–746, May 2016.
- [77] E. Virey, "MicroLED displays : Hype and reality, hopes and challenges," 2017.
- [78] H. X. Jiang, S. X. Jin, J. Li, J. Shakya, and J. Y. Lin, "III-nitride blue microdisplays," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 9, p. 1303, 2001.
- [79] C.-W. Jeon, K.-S. Kim, and M. d. Dawson, "Fabrication of Two-Dimensional InGaN-Based Micro-LED Arrays," *Phys. Status Solidi A*, vol. 192, no. 2, pp. 325–328, Aug. 2002.
- [80] H. W. Choi, C. W. Jeon, M. D. Dawson, P. R. Edwards, and R. W. Martin, "Efficient GaN-based Micro-LED Arrays," in *Symposium L – GaN and Related Alloys*, 2002, vol. 743.
- [81] I. Ozden, M. Diagne, A. V. Nurmikko, J. Han, and T. Takeuchi, "A matrix addressable 1024 element blue light emitting InGaN QW diode array," in *Physica status solidi. A. Applied research*, 2001, vol. 188, pp. 139–142.
- [82] C. W. Jeon, H. W. Choi, and M. D. Dawson, "Fabrication of matrix-addressable InGaN-based microdisplays of high array density," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 15, no. 11, pp. 1516–1518, Nov. 2003.
- [83] H. . Choi, C. . Jeon, and M. . Dawson, "Fabrication of matrix-addressable micro-LED arrays based on a novel etch technique," *J. Cryst. Growth*, vol. 268, no. 3–4, pp. 527–530, Aug. 2004.
- [84] J. Day, J. Li, D. Y. C. Lie, C. Bradford, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, "III-Nitride full-scale high-resolution microdisplays," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 3, p. 031116, Jul. 2011.
- [85] X. Li *et al.*, "Design and Characterization of Active Matrix LED Microdisplays With Embedded Visible Light Communication Transmitter," *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 14, pp. 3449–3457, Jul. 2016.
- [86] J. Day, J. Li, D. Y. C. Lie, C. Bradford, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, "Full-scale self-emissive blue and green microdisplays based on GaN micro-LED arrays," 2012, vol. 8268, p. 82681X–82681X–8.

- [87] F. Templier *et al.*, "GaN-based Emissive Microdisplays: A Very Promising Technology for Compact, Ultra-high Brightness Display Systems," *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 47, no. 1, pp. 1013–1016, May 2016.
- [88] H. S. El-Ghoroury, C.-L. Chuang, and Z. Y. Alpaslan, "Quantum Photonic Imager (QPI): A Novel Display Technology that Enables more than 3D Applications," *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 46, no. 1, pp. 371–374, Jun. 2015.
- [89] H. W. Choi, C. W. Jeon, M. D. Dawson, P. R. Edwards, R. W. Martin, and S. Tripathy, "Mechanism of enhanced light output efficiency in InGaN-based microlight emitting diodes," *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 10, pp. 5978–5982, May 2003.
- [90] P. Tian *et al.*, "Size-dependent efficiency and efficiency droop of blue InGaN micro-light emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 23, p. 231110, Dec. 2012.
- [91] J. Herrnsdorf *et al.*, "Active-Matrix GaN Micro Light-Emitting Diode Display With Unprecedented Brightness," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 62, no. 6, pp. 1918–1925, Jun. 2015.
- [92] K. H. Li, Y. F. Cheung, C. W. Tang, C. Zhao, K. M. Lau, and H. W. Choi, "Optical crosstalk analysis of micro-pixelated GaN-based light-emitting diodes on sapphire and Si substrates," *Phys. Status Solidi A*, vol. 213, no. 5, pp. 1193–1198, May 2016.

Chapitre II

Optimisation du rendement
électro-optique de LED à travers
l'étude du procédé de fabrication

de l'épitaxie à la LED

II	Optimisation du rendement électro-optique de LED à travers l'étude du procédé de fabrication	49
II.1	INTRODUCTION	51
II.2	EPITAXIES LED	51
II.2.1	<i>Choix de l'épitaxie</i>	51
II.2.2	<i>Etude de l'épitaxie utilisée</i>	52
II.2.2.a	Spectre d'émission de photoluminescence	52
II.2.2.b	Coefficient de recombinaison bimoléculaire	53
II.2.2.c	Homogénéité d'émission	54
II.2.2.d	Taux de dislocations.....	55
II.3	PRESENTATION DU PROCEDE DE MATRIÇAGE ET DES MOYENS DE CARACTERISATION.....	57
II.3.1	<i>Principales étapes du procédé de fabrication</i>	57
II.3.1.a	Généralités sur le procédé utilisé	57
II.3.1.b	Métallisation P et formation de mesas auto-alignés	57
II.3.1.c	Isolation et jonction PN.....	58
II.3.1.d	Niveaux supérieurs	58
II.3.2	<i>Méthode de caractérisation des matrices de micro-LED</i>	60
II.3.3	<i>Caractérisations du process initial : LOT 1</i>	61
II.4	ETUDE DE L'HOMOGENEITE D'EMISSION	65
II.4.1	<i>Observations de l'émission</i>	65
II.4.2	<i>Caractérisations de la zone dégradée</i>	68
II.4.3	<i>Amélioration process : LOT 2</i>	72
II.4.3.a	Détails process	72
II.4.3.b	Performances.....	73
II.5	ETUDE DE LA METALLISATION SUPERIEURE	75
II.5.1	<i>Les différentes fonctions du métal P</i>	75
II.5.2	<i>Etude de l'ohmicité du contact P</i>	75
II.5.3	<i>Etude de la réflectivité du métal P</i>	79
II.5.3.a	Choix du nouveau métal P	79
II.5.3.b	Simulations Optiques	80
II.5.4	<i>Amélioration process : LOT 3</i>	84
II.5.4.a	Changement de métallisation pour de l'argent	84
II.5.4.b	Homogénéité d'émission du LOT 3	85
II.5.4.c	Caractérisations électro-optiques du LOT 3.....	87
II.6	CONCLUSION	90
II.7	REFERENCES	91

II.1 Introduction

Nous avons vu au chapitre 1 que la première étape dans la fabrication de micro-écrans LED consiste à pixelliser une épitaxie pour obtenir un réseau de micro-LED réparties périodiquement dans le plan. Dans ce chapitre, l'impact du procédé de matriçage d'une épitaxie sur les performances des LED sera étudié. Pour cela, nous présenterons dans un premier temps l'épitaxie choisie pour nos études et ses principales caractéristiques. Dans un deuxième temps, le procédé de matriçage développé au CEA LETI de Grenoble sera présenté, ainsi que les différentes améliorations apportées et les conséquences sur les performances électro-optiques des LED. Cette étude a pour but d'améliorer notre compréhension des LED, de comprendre comment le procédé de matriçage peut affecter leurs performances, et *in fine* d'améliorer le rendement des LED réalisées.

II.2 Épitaxies LED

II.2.1 Choix de l'épitaxie

Avant d'étudier l'impact du procédé de matriçage d'une épitaxie sur les performances des LED, il convient de présenter les épitaxies utilisées. Différentes épitaxies commerciales ont été utilisées au cours de cette thèse. Suivant les fournisseurs, les épitaxies peuvent varier et présenter des performances différentes. De plus, nous avons observé qu'un même procédé de fabrication peut présenter des résultats très différents selon l'épitaxie utilisée. En d'autres termes, un procédé de fabrication doit être optimisé pour une épitaxie donnée. C'est pourquoi les études présentées dans ce manuscrit de thèse sont toutes réalisées avec des épitaxies du même fournisseur, sauf mention explicite du contraire. Ce sont des épitaxies permettant une émission dans le bleu, épitaxiées selon le plan de croissance c (0001), sur un substrat saphir plan, non PSS. Des épitaxies de diamètre 2" sont utilisées pour les premiers lots et 4" pour les derniers lots.

Le choix de ce fournisseur d'épitaxies est motivé par plusieurs raisons. Tout d'abord nous avons choisi de ne pas utiliser d'épitaxies avec substrat PSS. Comme nous l'avons vu au chapitre 1, ces structures permettent d'améliorer le rendement des LED, mais elles présentent un défaut majeur qui sera présenté plus en détail par la suite : les structures PSS induisent du cross-talk optique, et nuisent à la qualité de l'image. Pour l'utilisation dans le cadre de micro-écrans, cette technologie n'est donc pas adaptée. D'autre part, les épitaxies choisies présentent de bonnes performances optiques et une bonne reproductibilité des résultats d'un wafer à l'autre.

La structure épitaxiée est présentée schématiquement ci-dessous (figure II-1). La première couche épitaxiée sur le saphir est le GaN non intentionnellement dopé (nid) sur $1\ \mu\text{m}$ puis le N-GaN sur une épaisseur de $4\ \mu\text{m}$. Le dopage, obtenu par incorporation de silicium est de $n = 3 \cdot 10^{18}\ \text{at. cm}^{-3}$. Ensuite, une couche d'InGaN à taux d'indium constant est épitaxiée sur $100\ \text{nm}$. Cette couche, que nous appellerons couche de relaxation (CR), permet d'adapter le paramètre de maille afin que le désaccord de maille entre le GaN et l'InGaN dans la zone active soit moins prononcé. Ceci permet de limiter les effets néfastes de dislocations et de polarisation piézoélectrique présentés au chapitre 1. Ensuite, la région à puits quantiques (MQW) est réalisée. Elle est constituée d'une alternance de cinq

puits en InGaN de 3 nm d'épaisseur entourés de barrières de GaN de 12 nm d'épaisseur. Enfin, le GaN-P, dopé avec du magnésium, est épitaxié sur 150 nm. Le dopage obtenu est $p = 5 \cdot 10^{17} \text{at. cm}^3$.

P-GaN	150nm
MQW 5X (InGaN/GaN)	5X (3nm/12nm)
CR InGaN	100nm
N-GaN	4 μm
nid-GaN	1 μm
Saphir	400 μm

Figure II-1 : représentation schématique d'une épitaxie 2'' utilisée au cours de la thèse

Nous souhaitons à présent caractériser les propriétés de cette épitaxie (longueur d'onde d'émission, rendement quantique interne, coefficient de recombinaison bimoléculaire, homogénéité d'émission et taux de dislocation).

II.2.2 Etude de l'épitaxie utilisée

II.2.2.a *Spectre d'émission de photoluminescence*

La figure II-2 présente un spectre d'intensité de PL obtenus à 10 K sur notre épitaxie. Le laser d'excitation émet à 375 nm. Le GaN est transparent à cette longueur d'onde puisque son gap est à 360 nm.

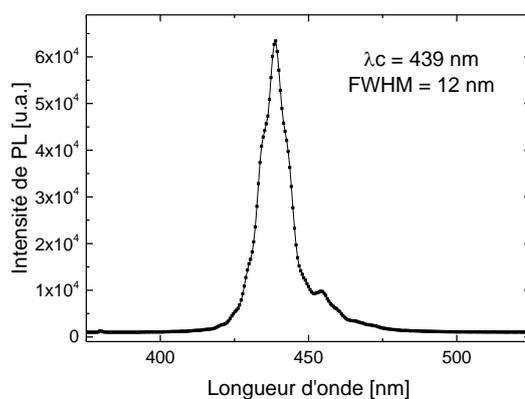


Figure II-2 : spectre de PL à 10 K d'une épitaxie InGaN/GaN utilisée au cours de la thèse

L'épitaxie utilisée présente un pic d'émission à 439 nm. Connaissant le gap du GaN (3.4 eV) et de l'InN (0.7 eV), il est possible de calculer en première approximation la composition d'indium x dans l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ selon la loi de Vegard modifiée [1] avec le paramètre de courbure $b = 1.4 \text{ eV}$ [2].

$$E_{g,\text{InGaN}} = x \cdot E_{g,\text{InN}} + (1 - x) \cdot E_{g,\text{GaN}} - b \cdot x(1 - x) \quad (\text{II.1})$$

La composition en indium de l'alliage InGaN est d'environ 17%.

La réplique à 454 nm est attribuée à une recombinaison accompagnée d'un phonon optique longitudinal. La différence d'énergie d'environ 90 meV est en accord avec les résultats publiés dans la littérature [3][4].

II.2.2.b Coefficient de recombinaison bimoléculaire

Nous avons vu au chapitre 1 que le taux de recombinaison radiative R_{rad} s'exprime sous la forme :

$$R_{rad} = B \cdot n \cdot p \quad (\text{II.2})$$

Où B est le coefficient de recombinaison bimoléculaire qui s'exprime comme suit :

$$B = \frac{1}{\tau \cdot n_{opt}} \quad (\text{II.3})$$

τ est la durée de vie radiative des porteurs et n_{opt} la densité de porteurs injectés optiquement.

La décroissance du signal de PL obtenu à 5 K est mesurée par photoluminescence résolue en temps (TRPL : *Time Resolved PhotoLuminescence*). Connaissant la puissance optique du laser (1.6 mW), sa longueur d'onde d'émission (376 nm) et sa pulsation (100 ps fréquenté à 40 MHz), ainsi que la surface du spot laser (environ $1 \mu\text{m}^2$), et considérant une zone active de 15 nm de profondeur (5 puits de 3 nm), la densité de porteurs injectés est calculée : $n_{opt} \approx 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

La courbe de décroissance du signal de PL est présentée figure II-3. La mesure du temps caractéristique τ est obtenue en appliquant une décroissance exponentielle de la forme :

$$I(t) = I_o \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (\text{II.4})$$

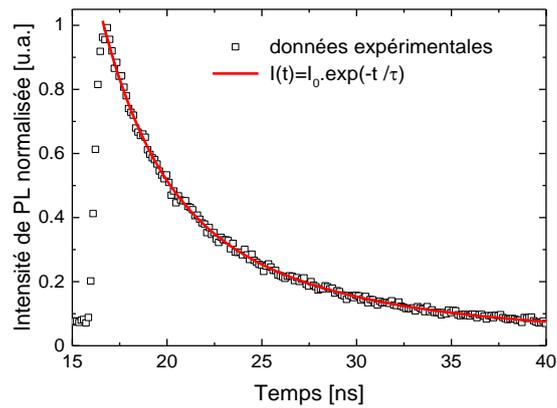


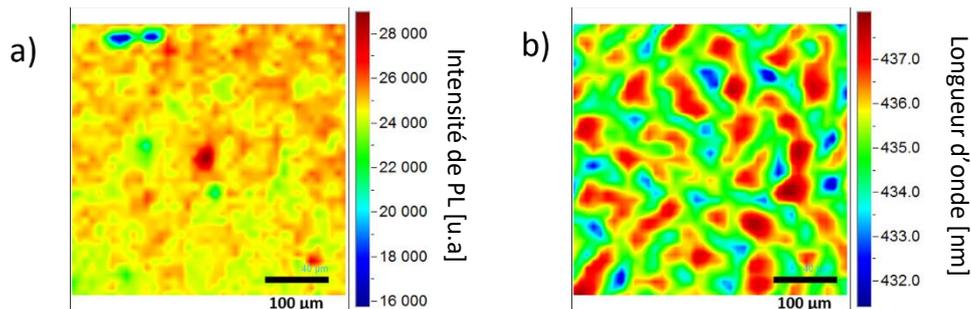
Figure II-3 : décroissance du signal de photoluminescence à 5 K [5]

L'ajustement réalisé donne $\tau = 4.9 \text{ ns}$, et par conséquent, d'après la formule (II.3), le coefficient de recombinaison bimoléculaire est estimé à : $B = 1.10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Cette valeur obtenue est en accord avec les valeurs rapportées dans la littérature, typiquement comprises entre 10^{-10} et $10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [6] [7] [8] [9], et indique une bonne qualité optique de la région à puits quantiques.

II.2.2.c Homogénéité d'émission

L'homogénéité d'émission des puits quantiques est ensuite caractérisée par photoluminescence. Pour cela, une cartographie de PL sur une zone de $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ est réalisée. Les signaux d'intensité de PL et de longueur d'onde, ainsi que les histogrammes associés sont présentés ci-dessous (figure II-4).



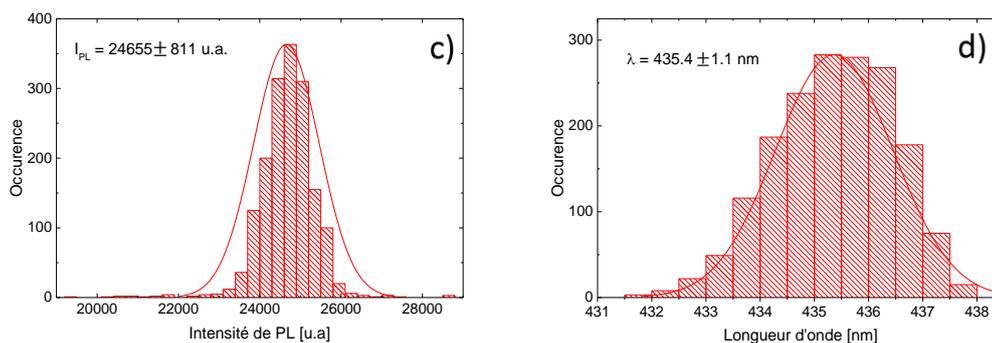


Figure II-4 : cartographie du signal de PL a) en intensité, b) en longueur d'onde et histogrammes associés c,d)

Malgré quelques défauts, l'intensité de PL est relativement homogène. La longueur d'émission est elle aussi homogène. Sa dispersion suit une loi normale et donne : $\lambda = 435 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$. La différence de longueur d'onde observée par rapport à la figure II-2 peut s'expliquer par la caractérisation d'une zone différente du wafer. Le tracé de l'intensité de PL en fonction de la longueur d'onde (figure II-5) permet d'observer qu'il n'y a pas de corrélation apparente entre ces deux paramètres. Ainsi, la variation de longueur d'onde sur l'épitaxie est sans conséquence sur la qualité des puits.

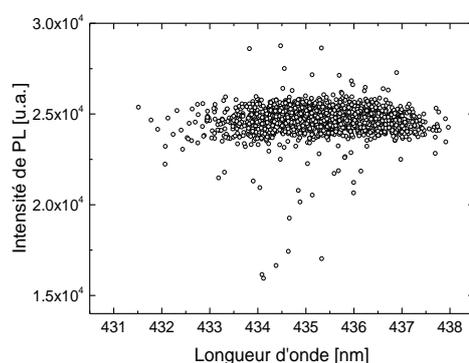


Figure II-5 : corrélation entre intensité du signal de PL et longueur d'onde d'émission

II.2.2.d Taux de dislocations

Le taux de dislocations de l'épitaxie peut être estimé par des mesures de cathodoluminescence (CL). La CL est l'émission de lumière par un solide soumis à un bombardement électronique. C'est une méthode spectroscopique qui permet d'identifier des défauts ponctuels et des impuretés responsables des propriétés de luminescence d'un matériau.

Une zone de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ de la région N-GaN est scannée et l'émission du GaN, à 360 nm, est présentée figure II-6. Une dislocation est un centre de recombinaison non-radiative et apparaît donc comme un point noir sur l'image de cathodoluminescence.

Précisons qu'une telle mesure sur du P-GaN ne nous a pas permis de visualiser les dislocations. Deux hypothèses sont formulées pour expliquer cette observation. Une relaxation des contraintes au niveau de la couche de relaxation riche en indium (figure II-1) peut permettre de supprimer les dislocations [10]. D'autre part, il a été montré que la gravure du GaN permet de dévoiler les dislocations [11].

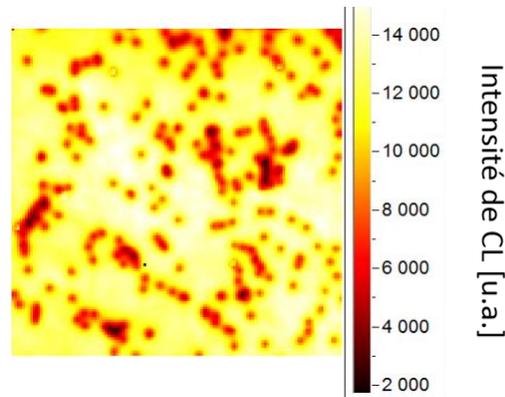


Figure II-6 : cartographie de l'intensité du signal de cathodoluminescence à 360 nm

Environ 200 dislocations sont comptées sur une surface de $100 \mu\text{m}^2$, soit une densité de dislocations de l'ordre de 2.10^8 cm^{-2} . Ce résultat est en accord avec les valeurs typiques obtenues dans la littérature [12][13] proches de l'état de l'art. D'après la littérature, le taux de dislocation joue un rôle important sur le rendement des LED [14] [15] [16], à travers notamment une diminution de la longueur de diffusion des porteurs [17].

En conclusion, les épitaxies utilisées au cours de cette thèse présentent de bonnes qualités optiques, une émission à 440 nm, une faible densité de dislocations et une bonne homogénéité d'émission. La prochaine étape consiste désormais à matricer cette épitaxie afin d'obtenir un réseau de LED dans lequel chaque diode constituera un pixel de l'image.

Dans la suite de ce chapitre, le procédé de fabrication développé au CEA LETI sera présenté, ainsi que les principales améliorations apportées et les conséquences sur les caractéristiques électro-optiques des LED.

II.3 Présentation du procédé de matricage et des moyens de caractérisation

II.3.1 Principales étapes du procédé de fabrication

II.3.1.a *Généralités sur le procédé utilisé*

Le procédé que nous allons présenter ici consiste en un résumé des principales étapes permettant de réaliser un réseau de micro-LED (μ LED). Les détails technologiques pertinents pour la suite de ce manuscrit seront présentés. Toutes les étapes technologiques ne sont pas décrites, et certaines simplifications sont effectuées pour en favoriser la compréhension.

Le procédé de fabrication a pour objectif de réaliser un réseau de μ LED permettant son hybridation sur un circuit CMOS afin d'obtenir un écran à matrice active. Nous retrouvons les deux objets essentiels nécessaires à la fabrication d'un écran présentés au chapitre 1 : la couche électro-optique et le circuit d'adressage. Dans le cadre de cette thèse, la couche électro-optique, constituée d'un réseau de LED, sera étudiée. Deux types de LED sont réalisés à l'aide du même procédé : des matrices de μ LED à un pas de 10 μm , et des diodes unitaires, non-matricées, de différentes tailles variant de 500X500 μm^2 à 5X5 μm^2 .

Les matrices de μ LED servent à la fabrication de micro-écrans. Les diodes unitaires sont dédiées à l'étude des effets de taille. Dans les deux cas, le procédé de fabrication est le même. C'est un procédé auto-aligné avec trois niveaux de lithographie que nous appellerons MESA (formation des pixels), CTD (pour ConTact Diode) et MET (pour METallisation), qui seront présentés au paragraphe suivant.

Précisons ici que l'objectif de cette thèse n'est pas d'optimiser les briques technologiques des différentes étapes du procédé de fabrication, mais d'étudier le lien entre les caractéristiques des LED et les étapes de fabrication. Ainsi ce chapitre n'a pas pour vocation de présenter toutes les études et améliorations du procédé de fabrication apportées au cours de la thèse. Pour cela le lecteur pourra se référer aux publications [18] et [19].

Les différents lots qui seront présentés dans ce manuscrit de thèse ont été fabriqués par l'équipe en charge du procédé de fabrication et ne constituent donc pas mon travail de thèse. Seuls seront présentés ici les changements de procédé qui ont fait suite à mes observations, études ou analyses, et qui, participant à la compréhension du fonctionnement des LED, permettent *in fine* l'amélioration du procédé de fabrication.

II.3.1.b *Métallisation P et formation de mesas auto-alignés*

La première étape consiste à déposer un métal de contact P par évaporation. Ensuite, ce métal P est gravé par IBE (*Ion Beam Etching*) et le GaN par gravure sèche chlorée en RIE (*Reactive Ion Etching*), l'ensemble à l'aide du premier niveau de lithographie MESA. Précisons ici que le métal P, opaque, fait office de masque dur pour les gravures et occupe toute la surface du pixel (figure II-7). Par conséquent, la lumière est émise par le saphir et la métallisation P joue donc plusieurs rôles. Elle doit assurer un contact ohmique, et une forte réflectivité pour augmenter l'extraction lumineuse par le saphir. Enfin, elle joue le rôle de masque dur, spécificité de la technologie du LETI dite auto-alignée. Elle doit pouvoir être déposée puis gravée sans dégrader le matériau pendant le reste du procédé de

fabrication. Nous y consacrerons une étude dans la suite de ce chapitre. Des pixels sont ainsi formés, à un pas de $10\ \mu\text{m}$, le GaN étant gravé à $1\ \mu\text{m}$ de profondeur environ pour atteindre la région dopée N.

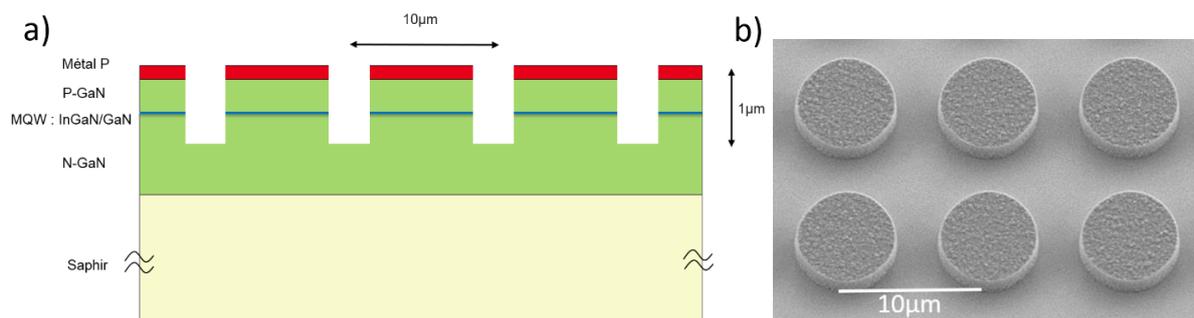


Figure II-7 : création des pixels : a) schéma en coupe et b) observation MEB

II.3.1.c Isolation et jonction PN

Un dépôt conforme isolant est ensuite déposé. Une gravure anisotrope permet de ne conserver l'isolant qu'autour des pixels. Ensuite le métal N est déposé puis planarisé par polissage mécano-chimique (CMP). La jonction PN est formée pour chacune des diodes (figure II-8). Dans la suite du manuscrit nous appellerons 'espaceur' l'isolant entourant chaque pixel et assurant l'isolation électrique entre les contacts N et P.

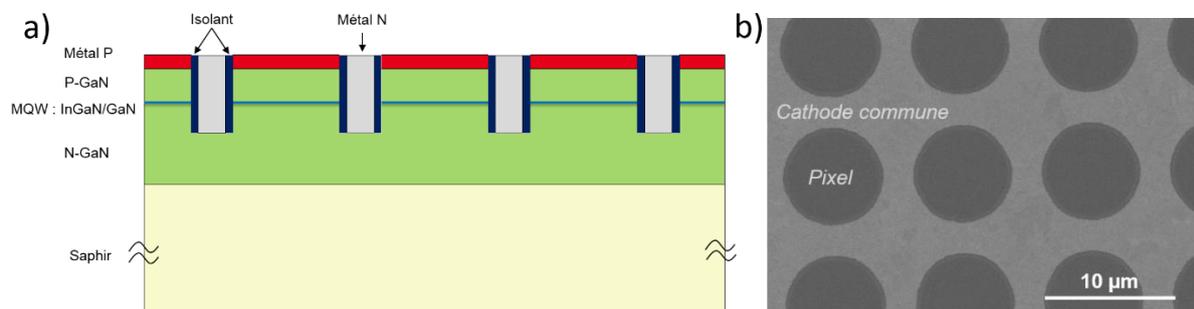


Figure II-8 : réalisation de matrice de LED : a) schéma en coupe et b) observation MEB

Un plan de masse N, sous forme de grille enterrée, est ainsi formé, entourant chaque pixel. C'est une cathode commune à tous les pixels.

II.3.1.d Niveaux supérieurs

Afin de réaliser un écran, il est nécessaire de connecter la couche électro-optique (ici le réseau de micro-LED) au circuit d'adressage (circuit CMOS dans le cas des micro-écrans). Pour cela, des étapes technologiques supplémentaires sont nécessaires sur notre réseau de LED afin de réaliser des plots d'hybridation qui serviront à assurer la connexion avec le circuit CMOS. En effet, des micro-tubes sont réalisés sur le CMOS et seront insérés dans les plots d'hybridation. Deux niveaux de masque sont nécessaires, l'un pour définir la taille des plots d'hybridation (niveau MET) et l'autre pour connecter

le plot d'hybridation au contact P de la diode (niveau CTD). Un schéma explicatif de la structure finale est présenté figure II-9, ainsi qu'une observation MEB mettant en évidence les niveaux supérieurs.

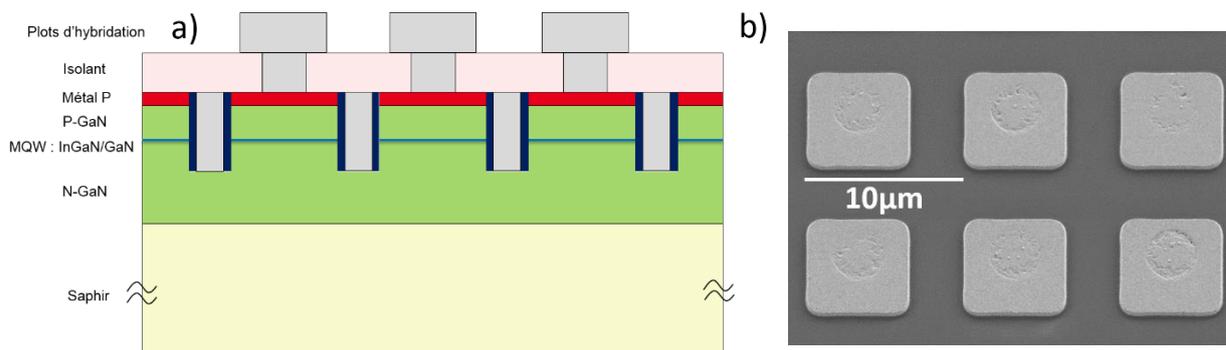


Figure II-9 : structure finale du réseau de micro-LED réalisé : a) schéma en coupe et b) observation MEB

La structure finale de la matrice de μ LED vue en coupe est présentée ci-dessous (figure II-10).

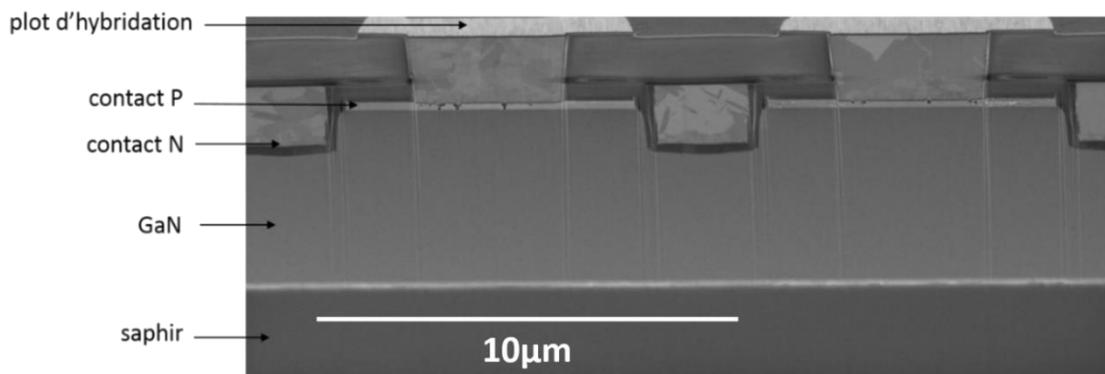


Figure II-10 : observation MEB en coupe d'un réseau de micro-LED en fin de fabrication

Précisons enfin que les plots de contact N sont reportés en bord de matrice, séparés du réseau de LED par des pixels non connectés (absence de gravure CTD réalisant la jonction entre le contact P et le plot d'hybridation), appelés pixels fictifs figure II-11.

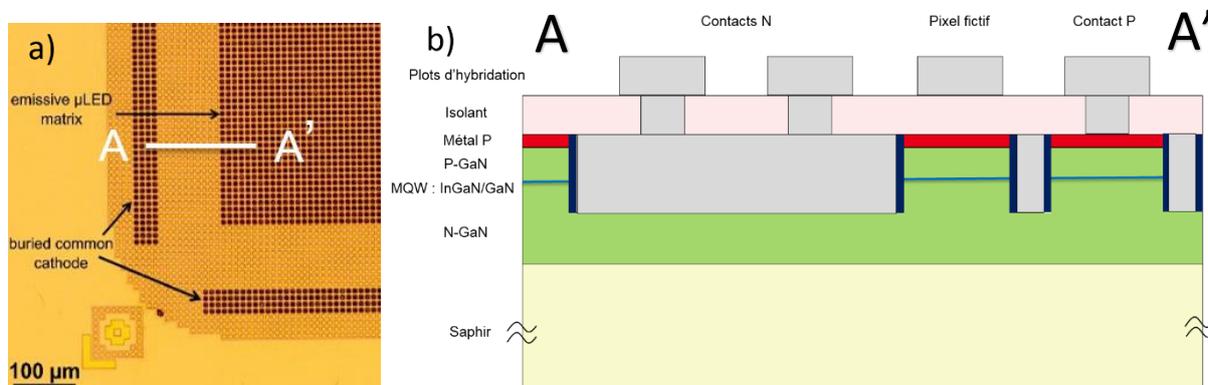


Figure II-11 : a) photographie des prises de contact N et P et b) représentation schématique en coupe selon l'axe A-A'

Un réseau de 873X500 μ LED, pixellisées au pas de 10 μ m, est ainsi réalisé. Chaque μ LED constitue un pixel de l'image. Les diodes de tests unitaires sont réalisées avec le même procédé. Ainsi, les principales caractéristiques présentées ici sont communes aux réseaux de μ LED et aux diodes unitaires (métal P occupant toute la surface du pixel, contact N enterré sous forme de cathode commune, espaceur entourant les LED assurant l'isolation électrique de la jonction, présence de plots d'hybridation, etc.).

II.3.2 Méthode de caractérisation des matrices de micro-LED

Les caractéristiques courant-tension-luminance (I-V-L) sont les principales mesures pour l'étude des LED. Dans le cas de notre procédé de fabrication, deux points importants sont à considérer. Tout d'abord, les dimensions des LED peuvent atteindre des dimensions de 5X5 μ m² seulement. Pour caractériser de telles diodes, des micro-pointes commandées par des micro-contrôleurs sont nécessaires. D'autre part, la lumière est émise par le saphir et doit donc être collectée sur la face opposée des contacts électriques.

Le banc utilisé (figure II-12) est équipé de micro-contrôleurs piézo-électriques permettant un déplacement très précis des pointes de mesure. Une photodiode permet de collecter le signal émis à travers le saphir. Le SMU (*Source and Measure Unit*) est composé de deux voies. La première voie polarise la LED en tension et mesure le courant. La seconde polarise la photodiode en inverse, et mesure le courant la traversant (I_{ph}). La réponse de la photodiode R , exprimée en A/W, permet d'extraire la puissance optique (P_{opt}) collectée en Watt :

$$P_{opt} = I_{ph}/R \quad (II.5)$$

Le rendement EQE est mesuré à partir de l'équation :

$$EQE = \frac{P_{opt} \cdot q}{h \cdot \nu \cdot I} \quad (II.6)$$

Le flux lumineux Φ_{lum} (en lm) dépend de la longueur d'onde d'émission (λ), et de la sensibilité de l'œil humain à cette longueur d'onde $V(\lambda)$.

$$\Phi_{lum} = 683 \cdot \frac{lm}{W} \cdot \int_{\lambda} V(\lambda) \cdot P_{opt}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (II.7)$$

La luminance L (en cd/m²) est calculée à partir de la mesure du flux lumineux Φ_{lum} en considérant une émission isotrope dans un demi-espace, soit un angle solide d'émission de 2π sr et une surface émissive S .

$$L = \frac{\Phi_{lum}}{S \cdot 2\pi} \quad (II.8)$$

Enfin, le banc est équipé d'un microscope confocal, relié à un spectromètre permettant des mesures spectrales très résolues spatialement. Un laser à 407 nm permet également de réaliser des cartographies de micro-photoluminescence (μ PL).

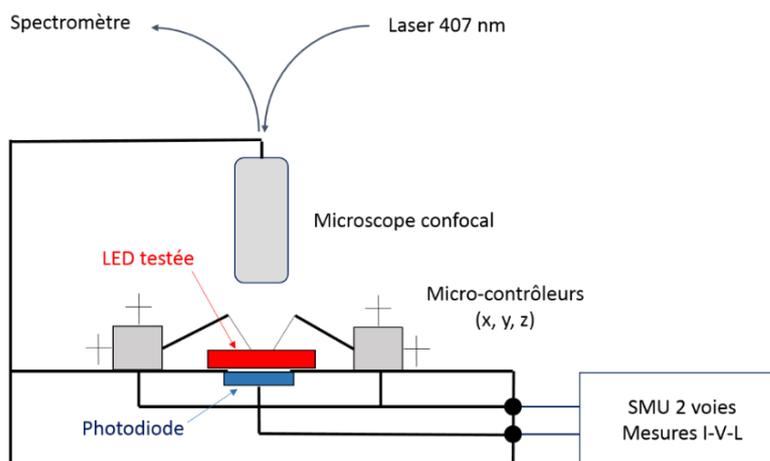


Figure II-12 : schéma explicatif du banc utilisé pour les mesures IVL et de micro-photoluminescence

II.3.3 Caractérisations du process initial : LOT 1

Nous étudions en premier lieu les performances électro-optiques des LED obtenues avec le procédé décrit au paragraphe 1.3.1. Ce premier lot d'étude portera le nom de LOT 1. C'est le premier lot d'étude fonctionnel obtenu après environ 6 mois de thèse. Les caractéristiques électro-optiques présentées ci-dessous constituent donc les premiers résultats que nous chercherons à optimiser dans la suite de ce chapitre.

Les caractéristiques I-V des LED obtenues sont présentées figure II-13. Les résultats sont comparés avec la caractéristique d'une diode 'quasi-idéale' obtenue par simulation ($n_{id} = 1$, $R_s \rightarrow 0$ et $R_p \rightarrow \infty$). Précisons que nous caractérisons ici, ainsi que dans la suite de ce chapitre, des LED unitaires, non-matricées, de dimension $20 \times 20 \mu\text{m}^2$.

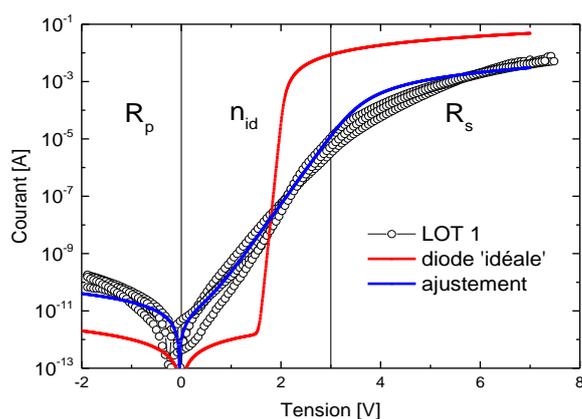


Figure II-13 : caractéristiques courant-tension de LED du LOT 1 et simulation d'une diode 'idéale' ayant pour paramètres $R_s = 100 \Omega$, $R_p = 10^{12} \Omega$, $n_{id} = 1$ et $V_{se} = 2 \text{ V}$

Les courbes I-V expérimentales montrent une différence importante avec la courbe 'idéale' présentée. Entre -2 V et 1 V, le courant est plus élevé, ce qui est généralement représenté par un courant de fuite dans une résistance parallèle (cf. chapitre 1). Autour de la tension de seuil électrique

($V_{se} = 2 V$) la pente de la courbe est faible, ce qui se traduit par un coefficient d'idéalité largement supérieur à 1. Enfin, au-delà de 3 V, une saturation du courant est observée à partir de $10^{-5} A$. Cet effet de saturation du courant à forte tension est généralement associé à la présence d'une résistance série qui limite le courant injecté dans la diode. La diode 'ajustée' est obtenue par simulation, avec les paramètres présentés dans le tableau ci-dessous.

	$R_p (\Omega)$	n_{id}	$R_s (\Omega)$
Diode 'idéale' présentée	10^{12}	1	10^2
Diode 'ajustée'	5.10^{10}	7	10^3

Tableau II-1 : paramètres caractéristiques des diodes du LOT 1 et de la diode 'idéale' présenté figure II-13

En résumé, les diodes obtenues sont caractérisées par un coefficient d'idéalité élevé, qui dégrade fortement leur caractéristique électrique autour de la tension de seuil, et une forte résistance série qui limite le courant à forte tension. La résistance parallèle élevée ($R_p \approx 5.10^{10} \Omega$) traduit un léger courant de fuite à faible tension.

Les caractéristiques optiques des LED sont étudiées ci-dessous. La puissance optique en fonction de la tension (figure II-14.a) et la luminance en fonction de la densité de courant (figure II-14.b) sont présentées ci-dessous.

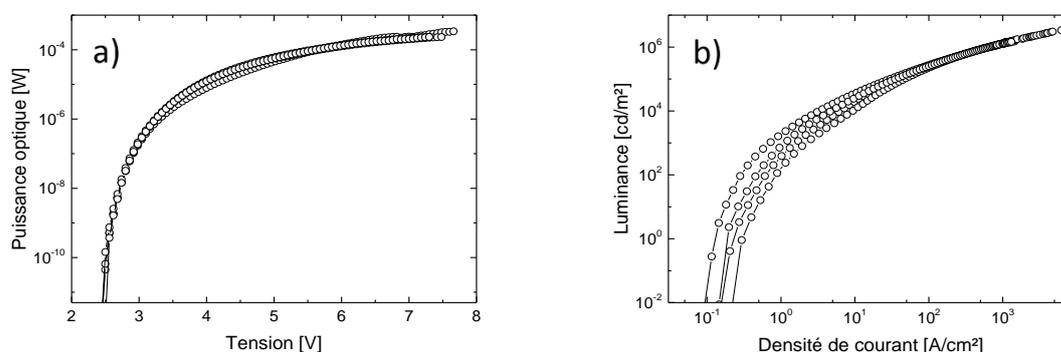


Figure II-14 : a) puissance optique en fonction de la tension et b) luminance en fonction de la densité de courant de LED du LOT 1

La tension de seuil optique (V_{so}) que nous définissons par la tension pour laquelle les premiers photons sont détectés, est de l'ordre de 2,5 V. La puissance optique augmente très fortement jusqu'à 3 V puis sature. Cette observation est attribuée à la forte résistance série observée sur la courbe I-V qui limite l'injection des porteurs et par conséquent la puissance optique. La lumière apparaît pour des densités de courant de l'ordre de $10^{-1} A/cm^2$. Nous appellerons dans la suite de ce manuscrit densité de courant de seuil optique (J_{so}) la densité de courant pour laquelle les premiers photons sont détectés.

Les courbes de rendement quantique externe EQE sont présentées figure II-15, en fonction de la densité de courant et de la tension.

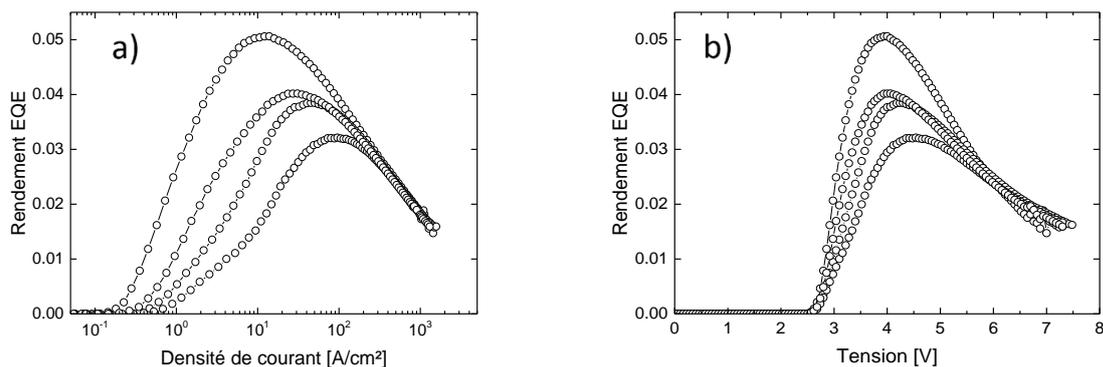


Figure II-15 : rendement EQE de LED du LOT 1 en fonction a) de la densité de courant et b) de la tension

Le rendement EQE maximal, compris entre 3% et 5%, est atteint à une densité de courant comprise entre 10 A/cm^2 et 100 A/cm^2 . Nous appellerons dans la suite de ce manuscrit J_{max} la densité de courant pour laquelle le rendement EQE est maximal. Au-delà de cette densité de courant, le rendement chute. C'est le phénomène de droop abordé au chapitre 1. Pour des applications haute-luminance, nécessitant des niveaux de densité de courant élevés, nous voyons ici apparaître l'importance de l'étude du droop. D'autre part, il est intéressant de remarquer que les courbes montrent une forte dispersion à faible densité de courant, tandis qu'à forte densité de courant, le rendement est identique pour toutes les diodes. Nous formulons ici l'hypothèse que la dispersion à faible densité de courant est liée au procédé de fabrication qui présente une dispersion d'une diode à l'autre, tandis que le droop dépend principalement de l'épitaxie, et est ainsi similaire pour toutes les diodes. Le tracé du rendement EQE en fonction de la tension montre que le maximum du rendement est atteint entre 3.5 V et 4 V.

Les valeurs de rendement obtenues sont éloignées des valeurs typiques des LED bleues utilisées dans l'éclairage qui présentent un rendement EQE maximum de l'ordre de 50% à une densité de courant de l'ordre de 1 A/cm^2 à 10 A/cm^2 . A titre d'exemple, le rendement d'une LED commerciale à base de GaN émettant dans le bleu (450 nm) est présenté figure II-16. Nous reviendrons dans la suite de ce manuscrit sur les principales raisons expliquant cette différence de rendement entre les LED commerciales et celles obtenues avec notre procédé de fabrication.

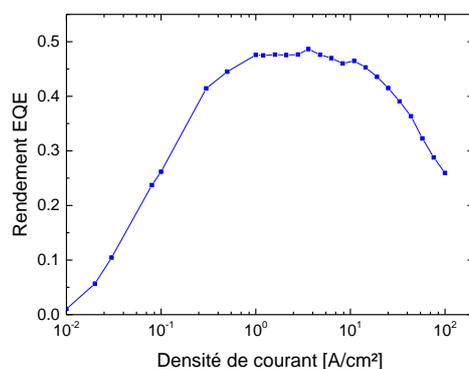


Figure II-16 : rendement EQE d'une LED commerciale bleue InGaN/GaN

Enfin, le spectre d'électroluminescence d'une LED du LOT 1 est présenté ci-dessous. Le maximum du pic est obtenu à 443 nm, avec largeur à mi-hauteur de 21 nm. Ces résultats sont comparables à ceux réalisés en photoluminescence à 10 K présentés figure II-2.

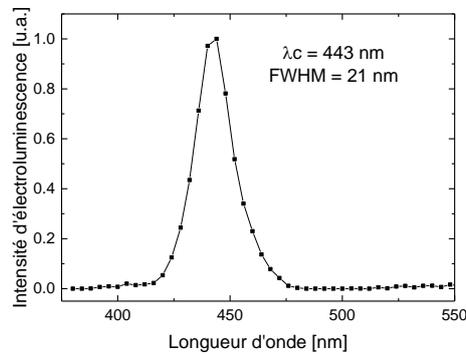


Figure II-17 : spectre d'émission d'électroluminescence d'une LED du LOT 1 à 290 K

En résumé de cette première étude, les diodes du LOT 1 présentent des caractéristiques électro-optiques décevantes. En particulier, le rendement obtenu est faible et fortement limité par le droop. Dans l'optique d'obtenir des images haute luminance, pour lesquelles des densités de courant élevées sont nécessaires, il apparaît que la problématique du droop est un axe d'étude important.

D'autre part, un coefficient d'idéalité élevé et une résistance série importante semblent limiter les performances électriques des LED. Nous cherchons maintenant à améliorer les performances électro-optiques des LED en étudiant et optimisant le procédé de fabrication. Deux études seront réalisées en ce sens dans la suite de ce chapitre. La première concerne l'étude de l'homogénéité d'émission, et la seconde l'étude de la métallisation utilisée pour le contact P.

II.4 Etude de l'homogénéité d'émission

II.4.1 Observations de l'émission

Afin d'aller plus loin dans l'étude des diodes, et l'amélioration du procédé de fabrication, nous étudions l'émission des LED du LOT 1 à différentes densités de courant, et en particulier l'homogénéité d'émission à la surface du pixel pour différentes tailles de diode.

Pour cela nous traçons la courbe du rendement EQE en fonction de la densité de courant et présentons des photographies optiques de l'émission à quatre densités de courants caractéristiques : au seuil de l'émission de lumière (1), dans la zone de montée du rendement (2), au niveau du rendement maximum (3) et dans la zone du droop (4). Les résultats obtenus pour quatre tailles de diode (500×500 , 100×100 , 50×50 et $20 \times 20 \mu\text{m}^2$) sont présentés figure II-19.

Précisons ici que ces photographies optiques, prises sous microscope à l'aide d'une caméra CCD ont été obtenues en faisant varier le temps d'intégration pour obtenir une image nette aux différentes densités de courant, et d'éviter une saturation de l'image. Par conséquent, les intensités observées sont relatives, et les zones sombres ne sont pas non-émisives, mais moins émissives. Enfin, le halo obtenu autour des diodes est dû à l'optique de collection utilisée pour guider la lumière dans le microscope.

Les photographies optiques présentées figure II-19 montrent qu'à faible densité de courant (zone 1), toute la surface du pixel est émissive. A plus forte densité de courant (zone 2), des zones moins émissives apparaissent, et l'inhomogénéité s'amplifie à très forte densité de courant (zones 3 et 4). Suivant la taille de la LED, l'homogénéité d'émission diffère. Pour les grandes diodes ($100 \mu\text{m}$ et plus), il existe deux zones lumineuses : la zone centrale et les bords du pixel. En revanche, pour les petites LED ($50 \mu\text{m}$ et moins), seuls les bords de pixels sont plus lumineux que le centre de la LED.

Pour comprendre l'origine de la zone dégradée moins émissive, il faut revenir à l'étape de procédé de fabrication qui consiste à graver l'isolant pour permettre la reprise de contact sur le métal P (niveau de masque CTD, figure II-18). La zone MESA non gravée par le niveau CTD reste intacte et est lumineuse pour toutes les tailles de LED et pour toutes les densités de courant.

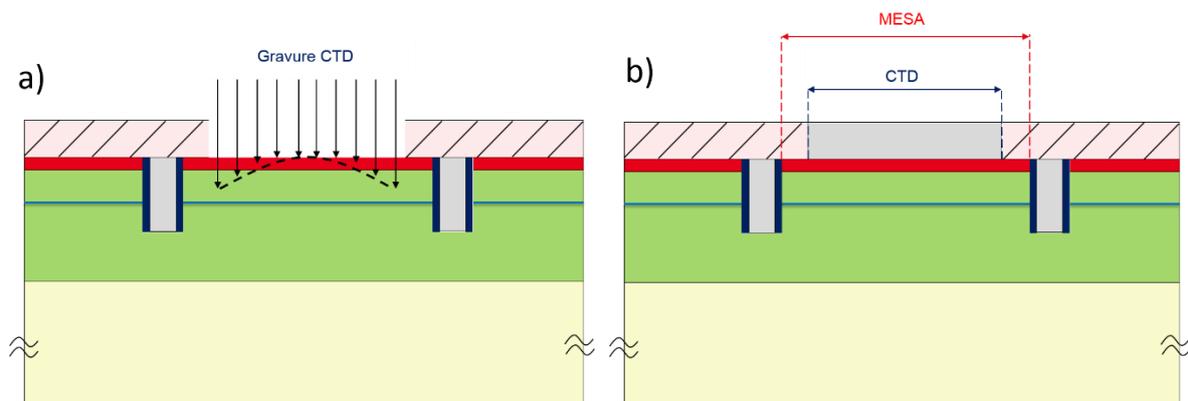


Figure II-18 : a) gravure de l'isolant et b) structure de la LED après remplissage du niveau CTD

II. Optimisation du rendement électro-optique de LED à travers l'étude du procédé de fabrication

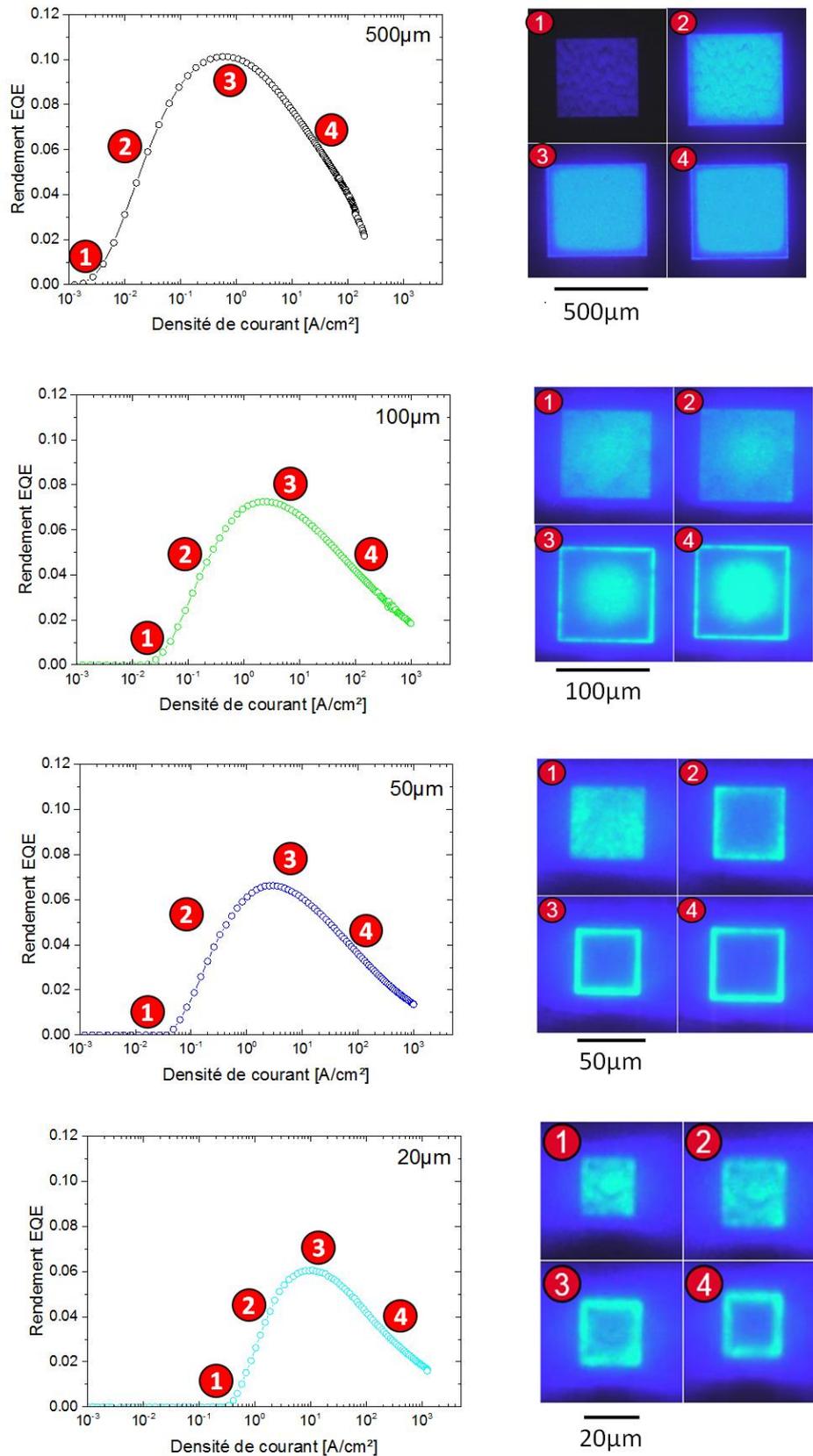


Figure II-19 : courbes EQE et photographies optiques de l'émission pour différentes tailles de LED [20]. A forte densité de courant, de fortes inhomogénéités apparaissent

La zone centrale dégradée correspond aux dimensions du niveau de lithographie CTD. Deux cas de figure se présentent alors suivant la taille de la LED. Commençons par le cas des petites LED, inférieures à 50 μm de côté, présentés figure II-20. La totalité de la zone CTD est dégradée par la gravure de l'isolant et apparaît moins émissive à forte densité de courant.

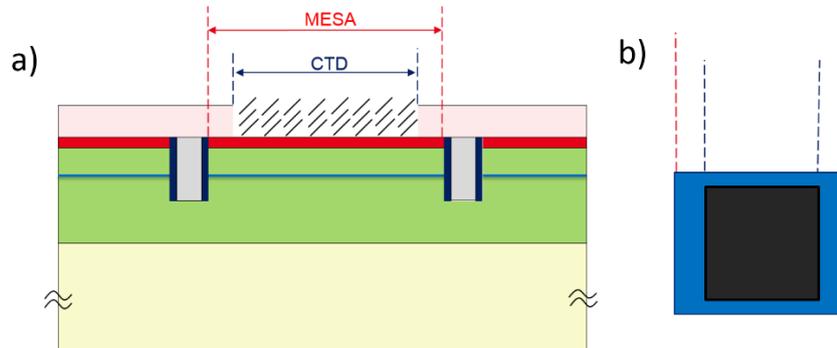


Figure II-20 : a) schéma explicatif de la gravure d'une petite LED et b) conséquence sur l'émission de la LED

Le second cas est celui des grandes LED, supérieures à 100 μm . La zone CTD se décompose alors en une zone centrale plus lumineuse, et des bords moins lumineux. La zone centrale pour les grandes LED peut s'expliquer par un phénomène dit de *trenching* : les bords sont plus attaqués par la gravure (figure II-18). Le centre de la LED, moins sur-gravé, n'est alors pas dégradé. D'après les photographies présentées figure II-19, la zone dégradée est estimée à environ 25 μm , ce qui explique l'extinction totale pour les LED de 50 μm et moins. Un schéma explicatif est proposé figure II-21.

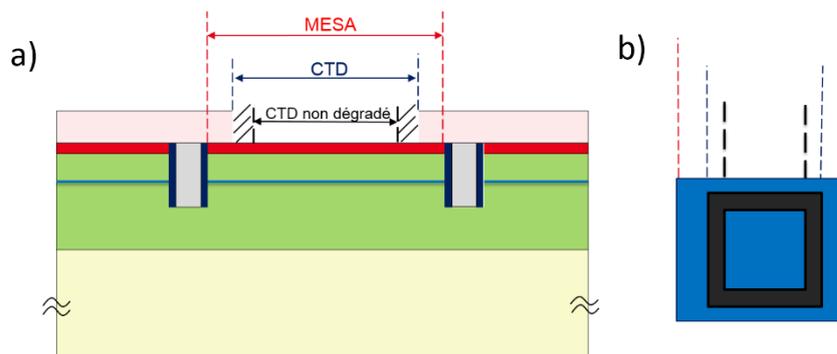


Figure II-21 : a) schéma explicatif du phénomène de trenching et b) conséquence sur l'émission d'une grande LED

En résumé, une inhomogénéité d'émission est observée à densité de courant élevée. Les dimensions des différentes zones, plus ou moins lumineuses, correspondent aux dimensions du niveau de masque CTD. La zone faiblement lumineuse observée est attribuée à la gravure qui dégrade le matériau en bord de motif, sur une distance d'environ 25 μm .

Dans le cas des petites LED, la zone CTD dans son ensemble est moins lumineuse. Dans le cas des grandes LED, le centre de la zone CTD n'est pas dégradé au-delà de cette distance et redevient plus lumineuse.

II.4.2 Caractérisations de la zone dégradée

Afin de caractériser ce défaut observé, les différents matériaux déposés au cours de la fabrication sont retirés afin de pouvoir étudier le GaN (figure II-22).

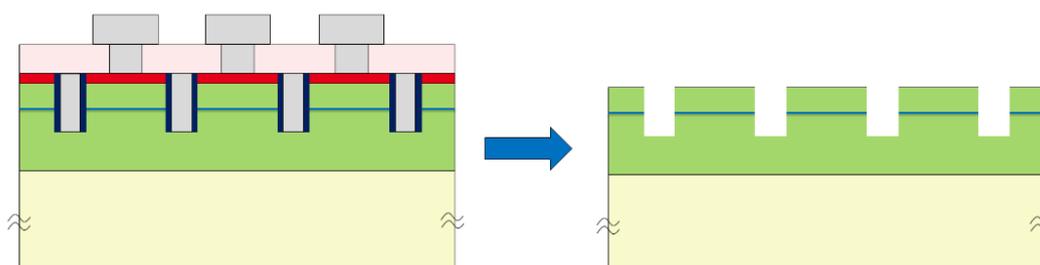


Figure II-22 : retrait des métaux et oxydes pour procéder aux caractérisations électro-optiques du GaN

Tout d'abord, la luminescence des puits quantiques est étudiée en micro-photoluminescence (μ PL). Un laser à 407 nm est utilisé pour exciter la zone active à multiples puits quantiques, le GaN, dont le gap est à 360 nm, n'absorbant pas le faisceau. Une cartographie de l'intensité du signal de PL à 440 nm est réalisée, à l'aide du banc de μ PL présenté figure II-12.

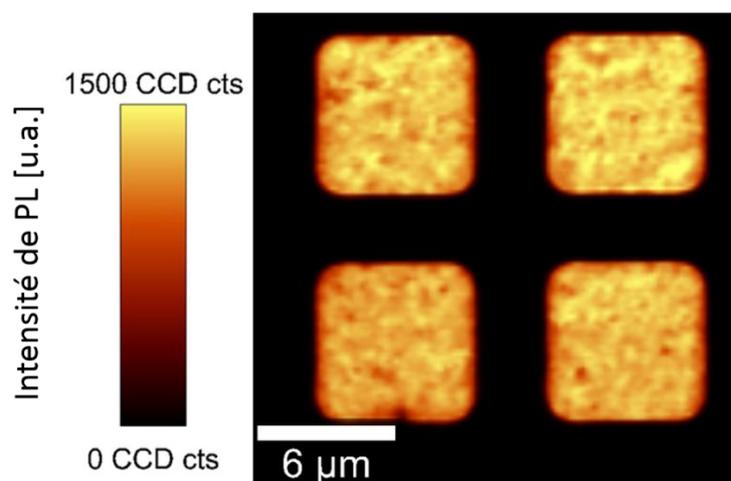


Figure II-23 : cartographie de l'intensité de μ PL à 440 nm de micro-LED matricées à un pas de 10 μ m

La cartographie d'intensité de PL sur des μ LED au pas de 10 μ m (figure II-23) montre que les LED ne semblent pas dégradées par le procédé de fabrication. En particulier, aucune zone centrale moins émissive n'est observée. Cette observation tend à indiquer que la qualité optique de la région active constituée de multiples puits quantiques InGaN/GaN n'est pas dégradée. La caractérisation de cet échantillon est complétée par des mesures de cathodoluminescence (CL). Une cartographie d'intensité du signal de CL à 440 nm d'une micro-LED du LOT1 est présentée figure II-24.

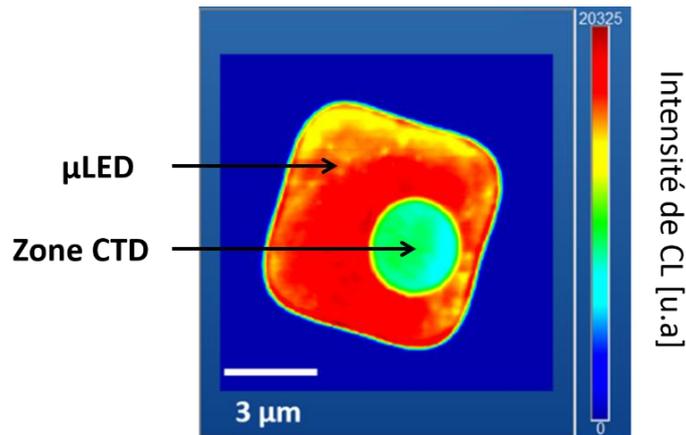


Figure II-24 : cartographie du signal de cathodoluminescence à 440 nm d'un micro-LED de 7 μm . Une zone de 3 μm de diamètre correspondant à la gravure du niveau CTD est observable

Les résultats de CL montrent une zone centrale moins émissive, dont les dimensions correspondent exactement aux dimensions du niveau de masque CTD. Ce résultat est en accord avec nos premières observations et hypothèses attribuant la zone centrale moins émissive à un défaut de process lié à la gravure du niveau CTD. D'autre part, les résultats conjoints de photoluminescence et cathodoluminescence indiquent que c'est possiblement l'injection électrique des porteurs qui est dégradée dans cette zone au niveau du P-GaN. Ainsi, tous les électrons injectés en cathodoluminescence n'atteignent pas la région à puits quantiques MQW, ce qui explique la présence d'une zone moins émissive.

Afin de valider cette hypothèse, des mesures AFM (*Atomic Force Microscopy*) sur la surface du P-GaN sont réalisées. La rugosité obtenue à la surface du GaN (figure II-25.a), et la résistance mesurée lorsque la pointe AFM est polarisée à 10 V (figure II-25.b) sont présentées ci-dessous.

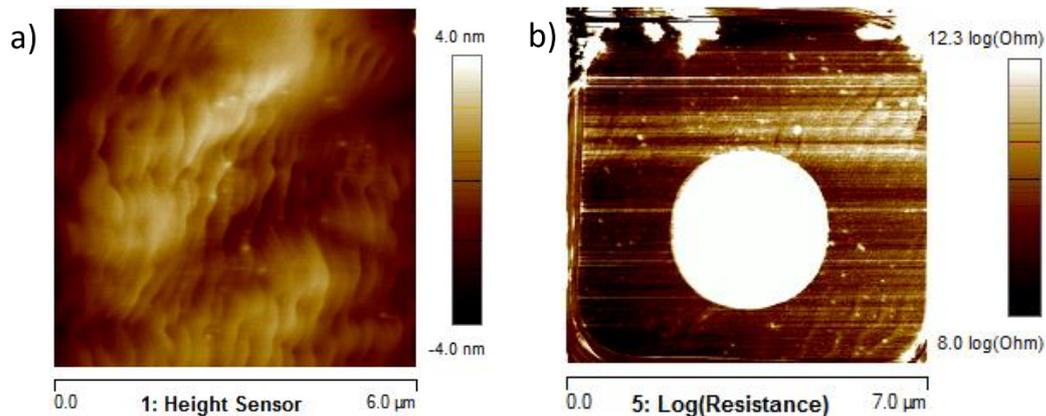


Figure II-25 : a) rugosité de surface et b) résistance d'une micro-LED mesurées par AFM

Les résultats indiquent que d'un point de vue topographique la surface de la LED n'est pas dégradée, puisque la rugosité mesurée est très faible, et aucune zone centrale dégradée n'est observée. En revanche, la mesure de résistance par AFM montre une zone centrale circulaire très résistive. Le P-GaN est donc très fortement résistif dans la zone CTD, ce qui est en accord avec l'observation effectuée en cathodoluminescence, et valide l'hypothèse d'une dégradation de l'injection des porteurs à l'origine de l'inhomogénéité d'émission observée figure II-19.

Ces mesures AFM sont complétées par des mesures du travail de sortie (KFM : *Kelvin Force Microscopy*) et de variation de capacité dC/dV (SCM : *Scanning Capacitance Microscopy*) dont les résultats sont présentés figures II-26 et II-27.

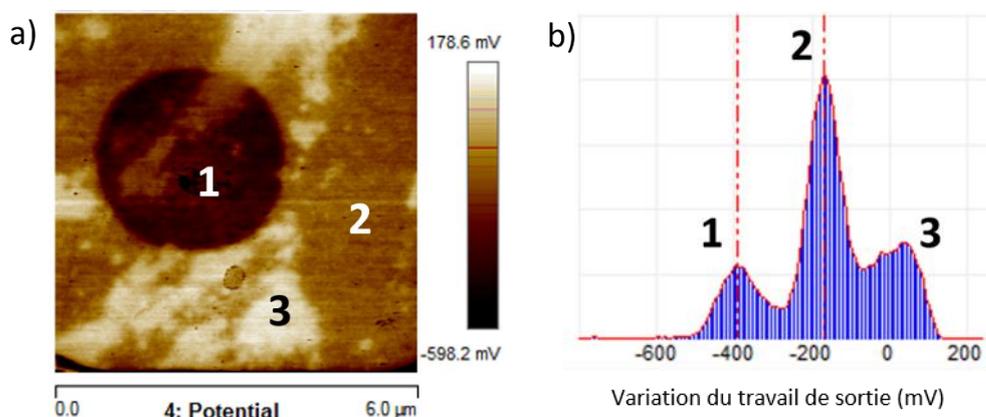


Figure II-26 : a) mesure de KFM sur micro-LED et b) histogramme obtenu

Les résultats mettent en évidence la zone centrale (zone 1), avec des propriétés différentes du reste de la LED (zone 2). Le travail de sortie au niveau de la zone CTD est supérieur à celui du reste de la micro-LED, d'environ 0.22 V. Cette différence de travail de sortie peut s'expliquer par une modification de courbure des bandes à la surface du P-GaN et donc une altération de la barrière entre le métal et le GaN-P. Précisons que la zone numérotée 3 correspond à un défaut engrené au cours de la caractérisation de l'échantillon et n'est donc pas significative.

De même, le tracé de dC/dV par SCM révèle la présence d'une zone CTD avec une variation de la capacité différente de celle du reste du P-GaN. Cette variation peut traduire un changement du dopage dans cette zone.

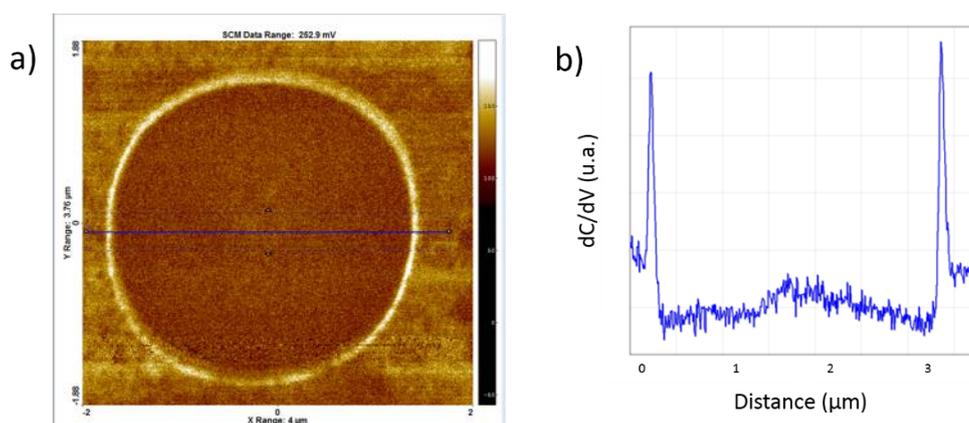


Figure II-27 : a) cartographie de dC/dV d'une micro-LED et b) profil obtenu

D'après les résultats obtenus, il semble que la dégradation de la zone CTD observée en électroluminescence correspond à une dégradation du matériau P-GaN au cours du procédé de fabrication. La bonne qualité optique de la zone CTD observée en PL, couplée à des mesures électriques qui révèlent une forte variation sur cette même zone indiquent une dégradation des performances électriques du P-GaN. Enfin, l'homogénéité de la rugosité de surface tend à montrer que ce n'est pas une dégradation mécanique du GaN mais physico-chimique.

Nous souhaitons dorénavant savoir si cette dégradation du P-GaN est limitée en surface ou étendue en profondeur. Pour cela, un échantillon est préparé afin de le caractériser en cross-section. Nous procédons à une préparation d'échantillon par coupe FIB (*Focused Ion Beam*), dont les principales étapes sont présentées figure II-28. La première étape consiste à déposer du TEOS (tetraethylorthosilicate). Ce composé présente la propriété de former du SiO₂ par simple hydrolyse en libérant de l'éthanol. Ensuite une coupe FIB est réalisée (figure II-28.b). L'échantillon est enfin prélevé puis déposé sur un support en aluminium pour assurer la conduction électrique.

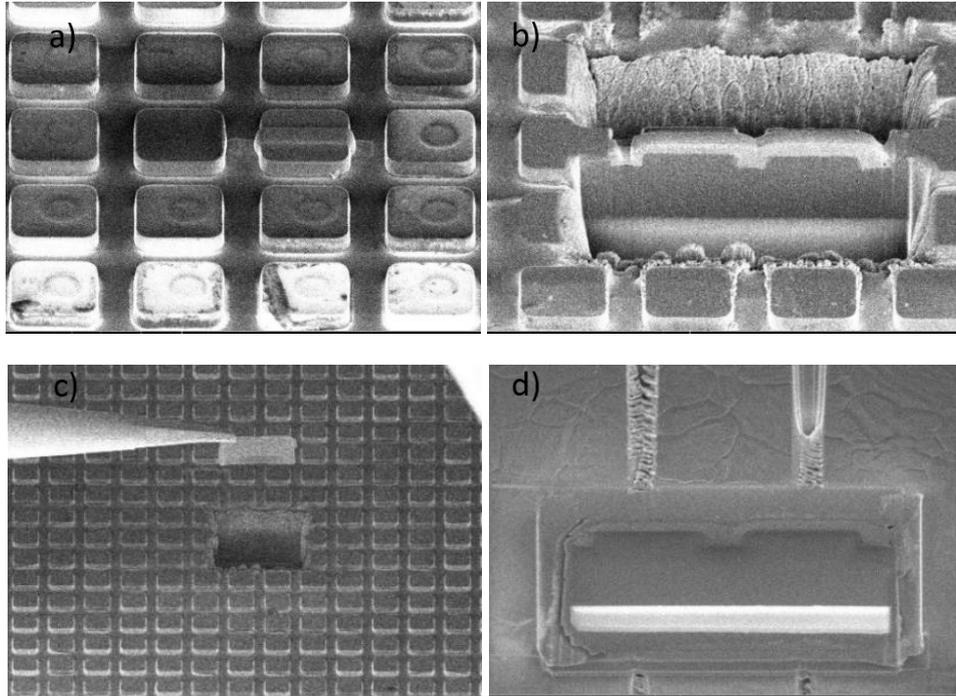


Figure II-28 : préparation par coupe FIB d'un échantillon. a) L'échantillon est recouvert des TEOS, puis b) une coupe FIB est réalisée. c) l'échantillon est prélevé puis d) déposé sur un support conducteur

Nous procédons aux mêmes études que précédemment en AFM, avec des mesures de résistances, de travail de sortie et de capacité. Les résultats sont présentés figures II-29 et II-30.

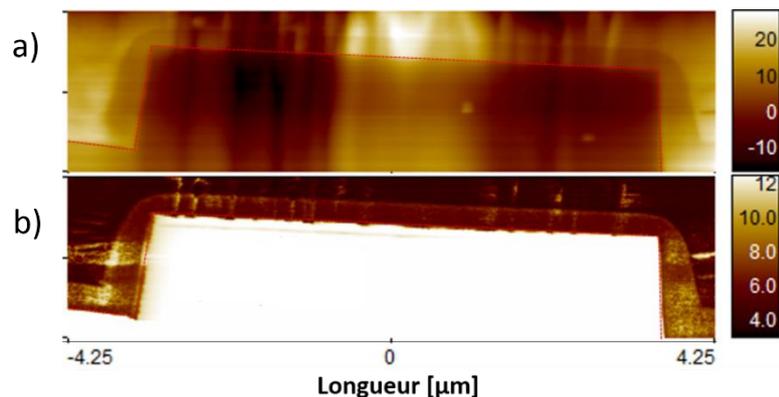


Figure II-29 : a) mesure de rugosité et b) de résistance par AFM en cross-section d'une LED du LOT 1

Aucune variation de la résistance n'a pu être observée (figure II-29.b). De même, aucune variation de la capacité ou du travail de sortie n'a pu être détectée (figure II-30).

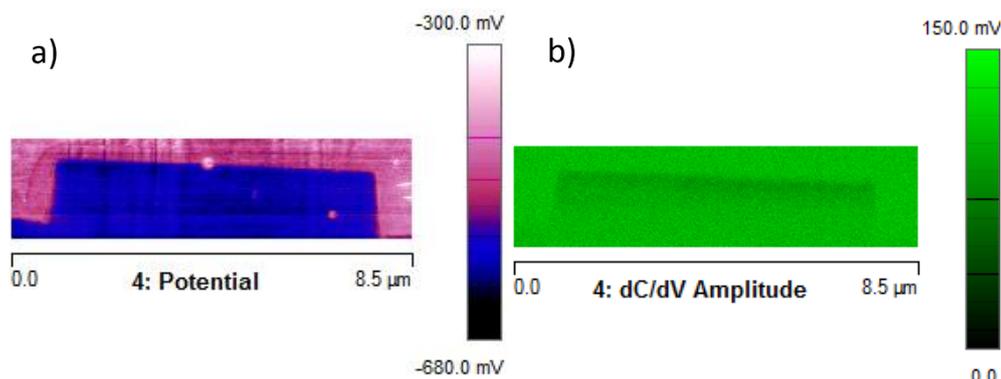


Figure II-30 : a) mesure de travail de sortie et b) de capacité en tranche d'une LED du LOT 1

Des mesures complémentaires en SIMS et spectroscopie Auger n'ont pas permis de mettre en évidence une éventuelle diffusion d'espèce dans le GaN. En effet, une diffusion des espèces déposées pendant le procédé de fabrication (Ni, O et Si) pourrait expliquer une dégradation des performances du P-GaN, notamment l'oxygène et le silicium qui agissent comme des dopants de type N. Les origines précises qui conduisent à ce défaut restent incertaines.

La littérature nous rapporte cependant des exemples de dégradation du P-GaN. La publication de Massoubre *et al.* [21] aboutit en effet à des résultats similaires. Ils observent qu'une gravure chlorée ICP (*Inductively Coupled Plasma*) modifie le P-GaN et dégrade fortement l'injection électrique. Ils attribuent cet effet à deux contributions. D'une part la désactivation des accepteurs de magnésium par l'hydrogène, qui résulte en une chute de la mobilité des trous et donc de la conductivité du P-GaN. D'autre part une augmentation de la barrière de potentiel métal/semi-conducteur due à l'implantation de fluor à la surface du P-GaN. Cette dernière hypothèse est d'ailleurs en accord avec nos observations d'une variation du travail de sortie au niveau de la zone CTD.

En conclusion de cette étude, il apparaît que le défaut observé est un défaut électrique d'injection des porteurs lié à une dégradation du P-GaN. Cette dégradation n'est pas mécanique, car la morphologie du GaN n'est pas affectée, et semble être limitée en surface. Nous faisons l'hypothèse que cette dégradation est due à une gravure de l'isolant trop longue qui, malgré la protection par la présence du métal P, dégrade la conductivité du P-GaN. Par la suite, l'impact d'un changement de procédé de gravure CTD sur les performances électro-optiques de LED sera étudié.

II.4.3 Amélioration process : LOT 2

II.4.3.a *Détails process*

Le LOT 2 vise à supprimer la zone fortement résistive qui dégrade l'homogénéité d'émission à la surface de la LED. Un temps de gravure plus court du masque dur du niveau CTD est réalisé. En effet, le temps de gravure initialement utilisé était volontairement rallongé après ouverture du via CTD afin de s'assurer que tout l'oxyde déposé allait être gravé. S'il reste une couche d'oxyde en fin de gravure, la diode n'est plus connectée électriquement. Il est donc important de garantir une gravure complète, tout en optimisant le temps de gravure pour ne pas endommager la diode. Les autres paramètres sont

gardés constants, notamment l'épitaixie utilisée qui est la même que pour le LOT 1, les espèces déposées et leur épaisseur.

II.4.3.b Performances

L'homogénéité d'émission obtenue à forte densité de courant (environ 100 A/cm²) est tout d'abord étudiée, pour différentes tailles de diodes, en comparant les résultats avec ceux du LOT 1. Les résultats sont présentés figure II-31.

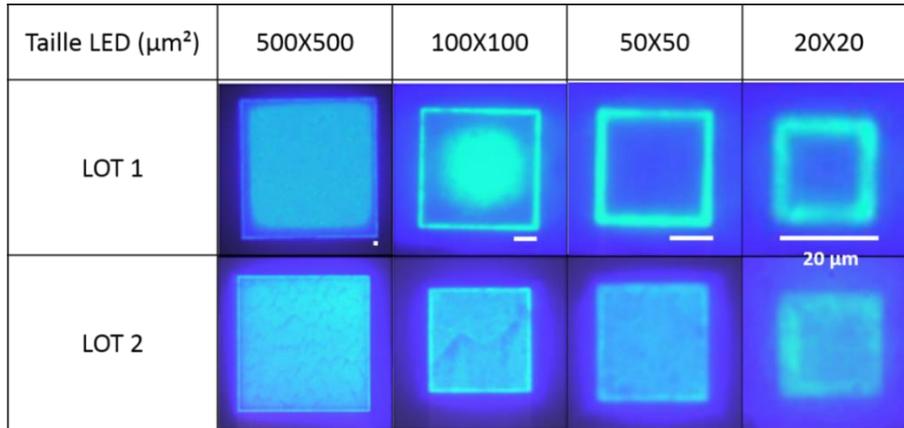


Figure II-31 : homogénéité d'émission à forte densité de courant (100 A/cm²). Le trait blanc représente 20 μm

L'homogénéité d'émission est fortement améliorée pour les LED du LOT 2. Des mesures de résistances en AFM et de cathodoluminescence sont réalisées pour confirmer cette tendance (figures II-32 et II-33).

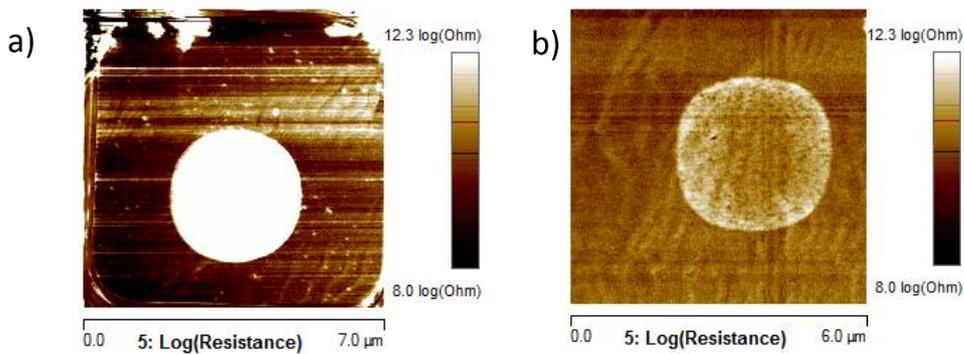


Figure II-32 : mesure de résistance par AFM a) du LOT 1 et b) du LOT 2

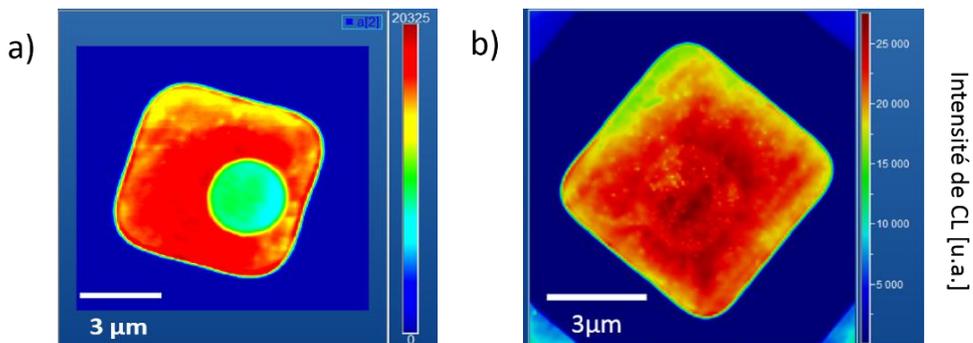


Figure II-33 : intensité de cathodoluminescence de micro-LED a) du LOT 1 et b) du LOT 2

Les mesures de résistance à la surface de la LED montrent une nette amélioration. L'effet de zone CTD est quasiment éliminé. Nous remarquons cependant une résistance légèrement supérieure en bord de la zone centrale (figure II-32). Cette observation est de nouveau attribuée à une gravure légèrement plus forte sur les bords de la zone CTD (phénomène de trenching présenté auparavant). Les mesures de cathodoluminescence montrent des résultats similaires. La zone centrale est discernable, mais la baisse d'intensité de CL est très fortement réduite par rapport au LOT 1.

L'effet de la zone centrale moins émissive est donc fortement réduit, mais ne semble pas totalement supprimé. Nous cherchons maintenant à étudier l'impact de ce changement de process sur les caractéristiques courant-tension-luminance (I-V-L). Les résultats obtenus ici sont comparés avec les LED du LOT 1 de même dimension ($20 \times 20 \mu\text{m}^2$). La courbe du courant en fonction de la tension (figure II-34.a) et celle du rendement EQE en fonction de la densité de courant (figure II-34.b) sont présentées ci-dessous.

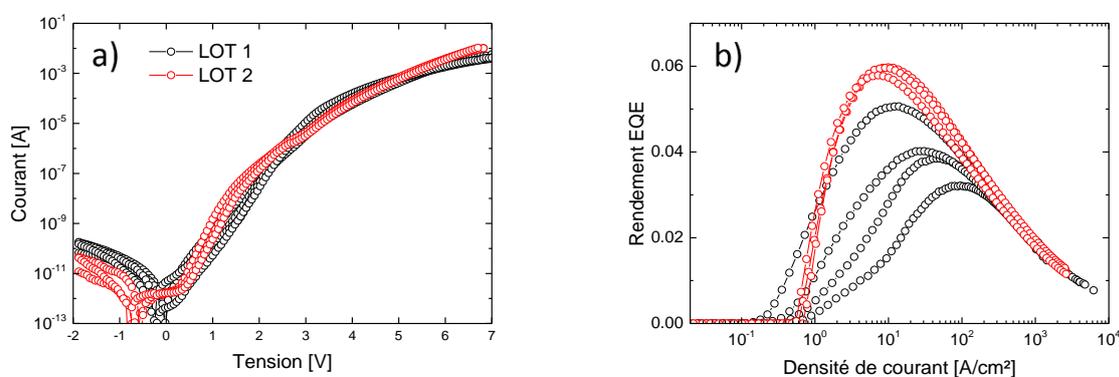


Figure II-34 : caractéristiques a) courant-tension et b) rendement EQE de LED des LOT 1 et LOT 2

Electriquement, les caractéristiques des LOT 1 et LOT 2 sont proches. Une légère baisse du courant en inverse est observée, tandis qu'en direct, aucune variation majeure du courant n'est observée. Le rendement EQE maximum est légèrement amélioré, et la densité de courant J_{max} est légèrement plus faible (1 A/cm^2). Il est intéressant de noter que les courbes obtenues sur le rendement sont moins dispersées à faible densité de courant avec le nouveau lot, ce qui peut traduire un meilleur contrôle de notre procédé de fabrication sur le fonctionnement des LED. De plus la pente de montée du rendement, autour de 1 A/cm^2 , est beaucoup plus raide sur le nouveau lot. D'autre part, le rendement à forte densité de courant (au-delà de 100 A/cm^2) est identique pour les deux lots.

Ces observations peuvent indiquer un procédé de fabrication plus performant et plus homogène d'une diode à l'autre sur le LOT 2, et semblent confirmer que la région à faible densité de courant est principalement affectée par le process utilisé, tandis que la région à forte densité de courant est limitée par l'épitaxie.

En résumé de cette étude sur l'homogénéité d'émission, l'amélioration du procédé de fabrication permet une émission plus homogène à forte densité de courant. Les mesures de résistance en AFM et de cathodoluminescence montrent que la zone centrale CTD est beaucoup moins dégradée que pour le LOT 1. En revanche, les courbes I-V-L ne présentent pas d'amélioration significative et le gain sur le rendement est faible. En particulier, il n'y a pas d'amélioration à forte densité de courant, pour laquelle l'inhomogénéité d'émission apparaissait sur les diodes du LOT 1 (figure II-19).

II.5 Etude de la métallisation supérieure

II.5.1 Les différentes fonctions du métal P

La métallisation P est un point critique de notre technologie. En effet, le métal (ou les métaux dans le cas d'une métallisation constituée d'une superposition de métaux) du contact P joue plusieurs rôles. Durant le procédé de fabrication il joue tout d'abord le rôle de masque dur. La totalité de la surface de la LED est recouverte du métal P. Il doit donc pouvoir être déposé puis gravé sans dégrader le matériau pendant le reste du procédé de fabrication. C'est une particularité spécifique au procédé de fabrication auto-aligné. Deux autres fonctions génériques à toutes les LED indépendamment du process utilisé sont l'ohmicité et la réflectivité. Le contact P doit être le plus ohmique possible, c'est à dire permettre la meilleure injection de courant, sans induire de résistance de contact supplémentaire. D'autre part, la lumière étant émise par le saphir, le métal P a un rôle de réflecteur très important. Il doit ainsi réfléchir la lumière vers le saphir afin d'augmenter le rendement d'extraction lumineuse (LEE) et ainsi le rendement quantique externe (EQE) de la LED.

Le métal utilisé pour les LOT 1 et LOT 2 est le nickel. Choisi historiquement pour son travail de sortie élevé et son utilisation relativement simple dans un procédé de fabrication à base de chimie chlorée, il présente cependant le défaut d'être un mauvais réflecteur et un contact ohmique insuffisant sur le P-GaN. Nous verrons dans ce chapitre les études menées afin d'aboutir au choix d'une nouvelle métallisation et l'impact sur les performances de nos dispositifs.

Dans ce chapitre, les aspects d'ohmicité et de réflectivité seront étudiés. La compatibilité du métal avec le reste du procédé de fabrication, quoique problématique importante de la technologie, sort du cadre de ces travaux de thèse et ne sera pas traitée ici.

II.5.2 Etude de l'ohmicité du contact P

Dans un métal, l'énergie qu'il faut fournir pour extraire un électron du niveau de Fermi (E_F) et l'amener dans le vide (niveau de vide NV) est appelé travail de sortie du métal, noté ϕ_m et exprimé en eV. Dans un semiconducteur, le travail de sortie, noté ϕ_{sc} est défini de la même manière. Dans le cas d'un semiconducteur, le travail de sortie n'est pas constant (figure II-35). En effet le niveau de Fermi varie principalement en fonction du dopage. On caractérise alors le semiconducteur par l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé au bas de la bande de conduction pour l'amener dans le vide, c'est l'affinité électronique, notée χ (eV).

Au niveau de l'interface métal-semiconducteur, la barrière de potentiel que doit franchir l'électron pour passer du métal dans le semiconducteur est donné par :

$$Eb = \phi_m - \chi \quad (II.9)$$

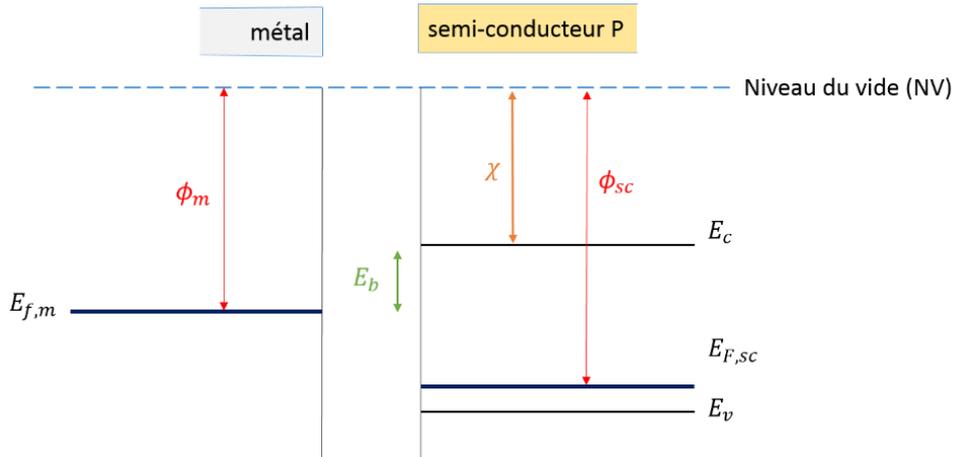


Figure II-35 : diagramme énergétique d'un métal et d'un semi-conducteur P avant jonction

Une jonction métal-semiconducteur est caractérisée par une barrière de potentiel qui se forme à l'interface entre les deux matériaux, induite par l'alignement des niveaux de Fermi (figure II-36).

Dans le modèle de Schottky-Mott, la structure des bandes au voisinage de l'interface est conditionnée par la différence éventuelle des travaux de sortie du métal et du semiconducteur, les électrons passant d'un matériau à un autre si le travail de sortie du premier est inférieur à celui du second. Le GaN est un semiconducteur à grand gap (3.43 eV à 300 K) et d'affinité électronique 4.1 eV [22]. Le travail de sortie du GaN dopé P est alors très élevé et il n'existe pas de métaux dont le travail de sortie soit supérieur à celui du GaN. Des métaux à travail de sortie élevé ont été étudié pour la formation de contact ohmique, en majorité Pt, Ni, Pd et Au, avec des travaux de sortie de 5.65, 5.15, 5.12 et 5.1 eV respectivement [23].

Puisque le travail de sortie du métal est inférieur à celui du GaN-P ($\phi_m < \phi_{sc}$), il apparaît un déficit d'électrons à la surface du métal. Dans le semiconducteur, les électrons qui viennent du métal se recombinent avec les trous, créant une zone de déplétion. Le contact est redresseur, et la hauteur de barrière d'interface que voient les trous pour passer du semiconducteur au métal est alors :

$$E_b = E_g + \chi - \phi_m \quad (II.10)$$

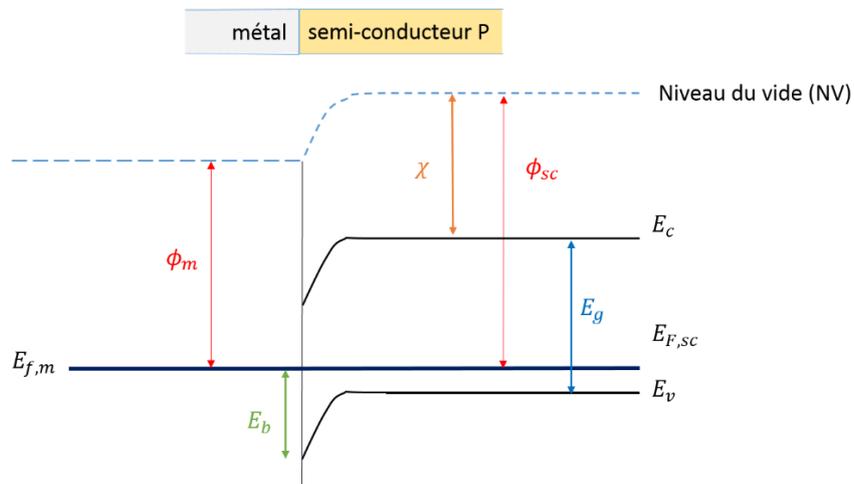


Figure II-36 : diagramme énergétique d'une jonction métal - semiconducteur P

En pratique, la présence d'états d'interface joue un rôle important, et le modèle de Bardeen est plus adapté pour l'étude de notre contact. En effet, au niveau d'une jonction, le réseau passe sur une distance de quelques angströms de la périodicité d'un matériau à celle de l'autre. Il en résulte des états électroniques différents de ceux de chacun des matériaux, ce sont des états d'interface.

La hauteur de la barrière Schottky est alors définie par :

$$Eb_p = \phi_0 \quad (\text{II.11})$$

ϕ_0 représente la distance du niveau de fermi au sommet de la bande de valence, à la surface du semiconducteur avant la mise en équilibre de la structure. Les hauteurs de barrières deviennent alors indépendantes du travail de sortie du métal et ne sont conditionnés que par la population initiale des états d'interface à travers le paramètre ϕ_0 . L'échange de porteurs se fait entre le métal et les états d'interface. Pour réaliser un bon contact ohmique, donc satisfaire à la condition $Eb < 0$, il faut alors réaliser $\phi_0 < 0$ pour un semiconducteur de type P. Il faut donc que les états d'interface soient entièrement saturés par les porteurs majoritaires, c'est à dire entièrement vides dans un semiconducteur de type P. C'est pourquoi dans la pratique, pour réaliser un contact ohmique sur un semiconducteur on dépose le métal sur une région préalablement surdopée P++ (figure II-37).

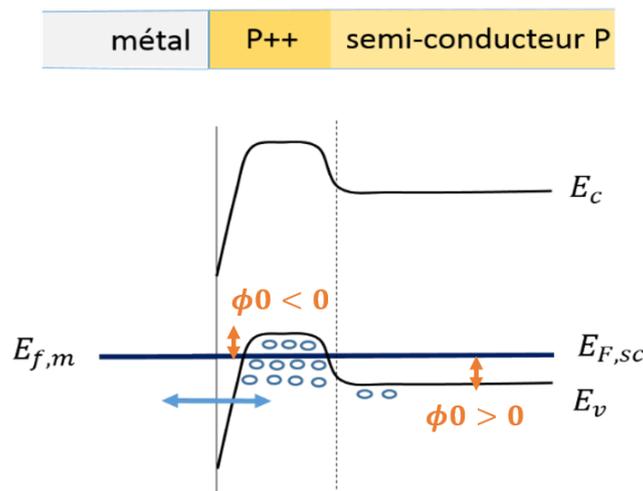


Figure II-37 : effet du surdopage sur le contact ohmique dans le cas d'un semiconducteur de type P

Dans ce cas, le mode de conduction à travers la barrière métal-semiconducteur se fait par effet tunnel. Il permet le passage de porteurs à travers la barrière, contrairement au passage par effet thermo-ionique. La caractéristique courant-tension est linéaire. C'est ce phénomène que l'on cherche à obtenir pour avoir un contact ohmique. C'est pourquoi le GaN-P est très souvent surdopé P++ en surface sur une profondeur typique de 25 nm.

Le profil de la concentration en magnésium (obtenu par mesure SIMS) de deux épitaxies InGaN/GaN avec et sans couche dopée P++ est présenté figure II-38. L'épithaxie utilisée pour les LOT 1 et LOT 2 est l'épithaxie sans surdopage P++ (courbe rouge).

Les mesures TLM (*Transmission Line Method*) effectuées avec un contact en nickel sur ces deux épithaxies sont présentées figure II-39. Ce sont des caractéristiques courant-tension effectuées en faisant varier la distance entre les contacts. Ces mesures permettent de définir le type de contact

(ohmique ou redresseur) et d'extraire les paramètres caractéristiques dans le cas d'un contact ohmique (résistance carré et résistance spécifique de contact (RSC)).

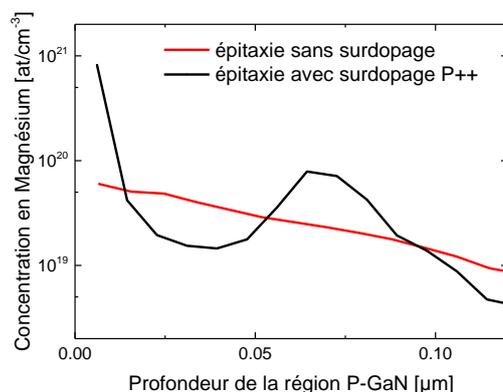


Figure II-38 : concentration en magnésium dans la région P-GaN pour deux épitaxies obtenues par mesures SIMS

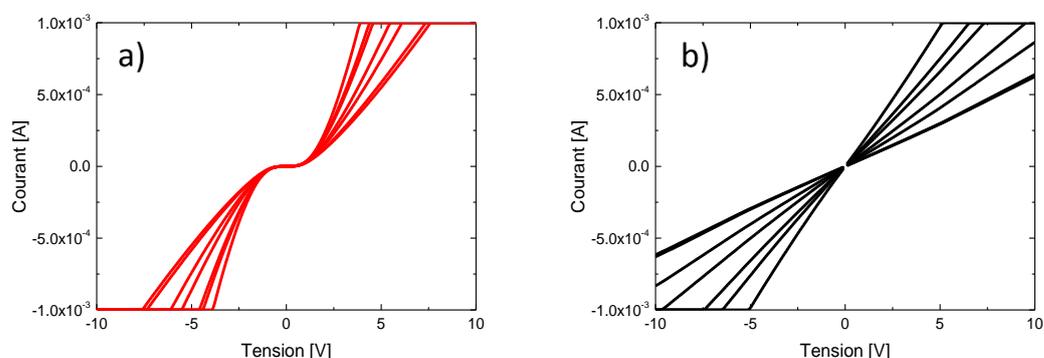


Figure II-39 : mesures TLM d'épitaxies a) sans et b) avec surdopage P++ avec un contact en nickel

Les résultats montrent un contact redresseur sur l'épitaxie sans surdopage et un contact ohmique avec surdopage P++. La résistance spécifique de contact obtenue pour cette épitaxie est de $2,6 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Logiquement, nous devrions utiliser la seconde épitaxie surdopée P++ pour la suite de nos études afin d'avoir un meilleur contact ohmique. Cependant, ces épitaxies comportent des défauts à l'impact rédhibitoire sur le fonctionnement de nos dispositifs que nous ne pouvons exposer ici. Par conséquent, il est nécessaire d'améliorer le contact ohmique dans le cas de l'épitaxie sans surdopage.

Parmi les différents contacts sur P-GaN étudiés dans la littérature, l'empilement Ni/Au est le plus largement étudié ces 15 dernières années, notamment depuis les travaux en 1999 de Ho *et al.* [24]. Ces travaux ont permis de montrer qu'un recuit des contacts Ni/Au dans une atmosphère contenant de l'oxygène pendant 10 minutes permettait d'obtenir un contact ohmique avec une résistance spécifique de contact de l'ordre de $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Cette faible résistance de contact a été alors attribuée à l'oxydation du Ni en NiO et à la forte conductivité de l'or. Ce contact à base de Ni/Au est ainsi largement utilisé pour le contact P sur GaN [25] [27] [27].

II.5.3 Etude de la réflectivité du métal P

II.5.3.a Choix du nouveau métal P

Comme nous l'avons mentionné auparavant, l'aspect réflecteur du métal P est un point important à considérer. La réflectivité du nickel, d'environ 35% à 440 nm (figure II-40), est insuffisante. Les mesures sont réalisées à travers la face arrière (le saphir), afin d'être au plus près des conditions réelles du fonctionnement de la LED, ce qui explique la présence d'oscillations.

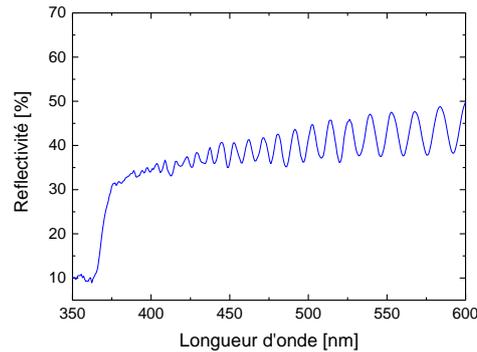


Figure II-40 : mesure de la réflectivité du nickel en fonction de la longueur d'onde

D'autres métallisations ont été étudiées, essentiellement à base d'argent et d'or, deux métaux très réflecteurs. Les réflectivités théoriques du nickel, de l'argent et de l'or sont présentées figure II-41.

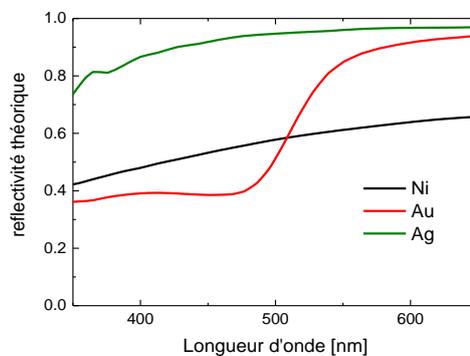


Figure II-41 : réflectivités théoriques de métaux pour le contact sur P-GaN en fonction de la longueur d'onde

L'or ne devient hautement réflecteur qu'à partir de 500 nm environ. Dans le cadre des LED bleues émettant à 440 nm environ, nous choisisons d'utiliser des métallisations à base d'argent, très réflecteur sur tout le spectre du visible. De nombreuses métallisations à base de d'argent ont ainsi été étudiées dans la littérature. Elles sont généralement associées à une couche d'accroche en nickel, suffisamment fine pour ne pas dégrader la réflectivité. En effet, l'argent ne peut pas être déposé directement sur le GaN car il délamine.

Une métallisation à base d'argent, associée à une couche d'accroche suffisamment fine pour ne pas dégrader la réflectivité du contact permet de réaliser des contacts ohmiques, avec des résistances spécifiques de de contact de l'ordre de $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$, et des réflectivités proches de 90%. Le tableau ci-dessous présente les contacts obtenus dans la littérature pour des métallisations à base d'argent.

Métal (Epaisseur en nm)	Recuit (T – atm - durée)	RSC ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Réflectivité (%)	Année et référence
Ni/Au/ITO/Ag	500 °C - O ₂	$3,2 \cdot 10^{-5}$	78	2004 [28]
Ni/Ag/Au (1/150/50)	500°C - O ₂ - 10min	$3.4 \cdot 10^{-3}$	92	2007 [29]
Ni/Ag (5/120)	500°C - O ₂ - 1 min	$5 \cdot 10^{-5}$	71,9	2008 [30]
Ni/Ag/Ti/Au (1/150/150/50)	500°C - O ₂ - 5 min	$2,7 \cdot 10^{-3}$	93	2009 [31]
Ni/Ag/Ti/Au (2/200/20/200)	380 °C - air - 1min	$8,1 \cdot 10^{-3}$	85	2011 [32]

Tableau II-2 : exemples de contact sur P-GaN parus dans la littérature

II.5.3.b Simulations Optiques

Il est possible de simuler l'extraction lumineuse de nos LED en fonction de la réflectivité du nouveau métal P. Pour cela, la méthode du tracé de rayons est utilisée. Elle consiste à étudier la propagation de lumière sous forme de rayons qui suivent les lois de la réflexion et de la réfraction. C'est une méthode basée sur l'optique géométrique, qui néglige certains aspects d'optique ondulatoire, notamment la diffraction des ondes. Le principe de simulation par tracé de rayons consiste à créer un système composé d'une source, d'un ensemble d'objets et d'un détecteur. Les rayons issus de la source sont tracés jusqu'au point d'incidence sur la première surface rencontrée. Le plan d'incidence au point d'incidence est calculé et la loi de Snell-Descartes (présentée au chapitre 1) est appliquée. Cette itération est répétée à travers toutes les surfaces définies du système, pour tous les rayons tracés.

Considérant l'indice de réfraction du GaN ($n_{\text{GaN}} = 2.45$) et du saphir ($n_{\text{saphir}} = 1.78$), il est ainsi possible de déterminer la part de lumière extraite par face. Nous avons vu au chapitre 1 que la part de lumière extraite peut s'exprimer sous la forme :

$$\frac{P_{\text{extraite}}}{P_{\text{totale}}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \varphi_c) \quad (\text{II.12})$$

Où φ_c est l'angle critique, fonction de l'indice optique des matériaux.

Du fait de l'indice de réfraction élevé du GaN, une grande partie de la lumière est confinée dans le matériau (environ 80%), et environ 4.35% de la lumière est extraite par face. Le reste de la lumière est guidé dans le saphir (figure II-42).

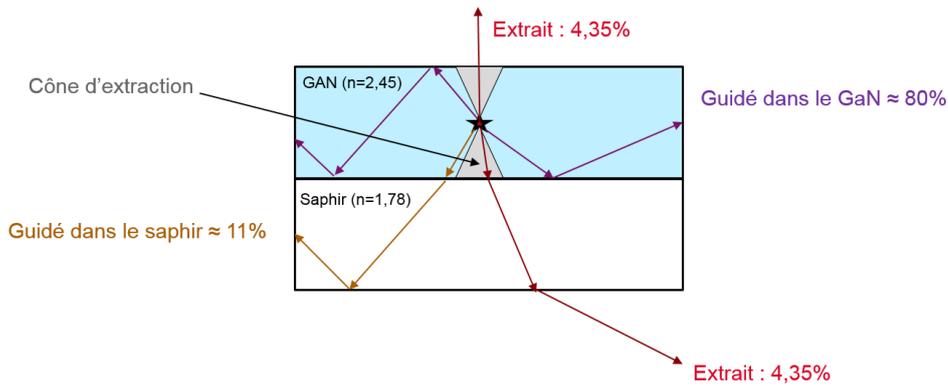


Figure II-42 : extraction lumineuse dans une LED GaN sur saphir

La simulation doit prendre en compte différents aspects du procédé de fabrication : réflectivité des métaux utilisés, profondeur de gravure, angle de gravure et dimensions de la LED. La structure étudiée est présentée ci-dessous. La source utilisée pour cette étude est une source émettant de manière uniforme dans toutes les directions de l'espace. Elle est située à 150 nm du haut de la LED et présente sur toute la surface, c'est-à-dire représentative de la position des puits d'InGaN dans notre épitaxie.

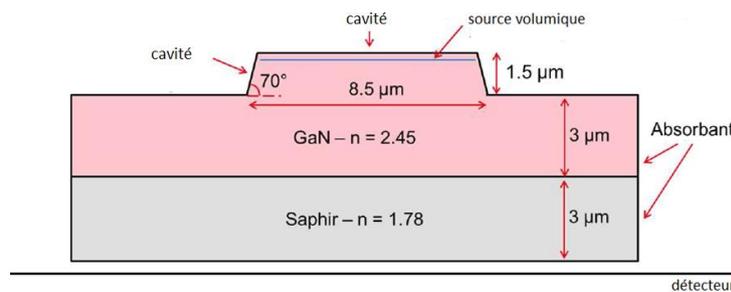


Figure II-43 : structure d'une LED simulée en tracé de rayons

Nous considérons les bords de la structure absorbants, c'est-à-dire que les rayons qui atteignent ces surfaces sont piégés par réflexion totale interne. L'angle de gravure de la cavité est estimé à 70° par observation MEB. L'épaisseur réelle du saphir est de quelques centaines de micromètres. Pour ne pas alourdir inutilement les temps de calcul, elle est schématisée ici par une couche de $3\ \mu\text{m}$ d'épaisseur. En effet, le saphir comme le GaN sont considérés sans pertes, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'absorption du signal durant sa propagation dans le matériau [33].

L'extraction lumineuse de la structure présentée figure II-43 est simulée (figure II-44). Les paramètres considérés sont résumés dans le tableau II-3. L'extraction lumineuse obtenue est d'environ 8%.

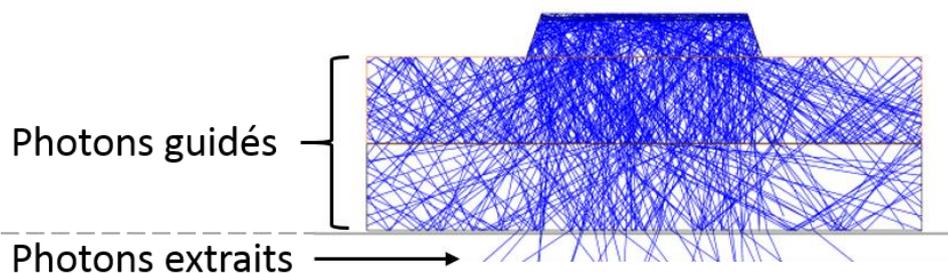


Figure II-44 : simulation de l'extraction lumineuse par la méthode du tracé de rayons. La majorité des photons sont guidés dans le GaN ou le saphir

Cette valeur d'extraction est en accord avec les mesures expérimentales qui montrent un rendement EQE de l'ordre de 5-6% (figure II-34.b). D'après la formule (I.46), le rendement quantique interne peut alors être estimé à 75%.

Une étude paramétrique des différents éléments qui peuvent influencer au premier ordre sur l'extraction lumineuse est ensuite réalisée. Pour cela, l'impact de la réflectivité des métaux utilisés pour les contacts P et N, et de la géométrie de la LED (diamètre, profondeur gravée, angle de gravure) est étudié. Les paramètres de référence utilisés pour nos simulations sont présentés ci-dessous (tableau II-3).

Angle de Gravure (°)	Profondeur gravure (µm)	Réflectivité du métal P (%)	Réflectivité du métal N (%)	Dimension de La LED (µm)
70	1.5	35	80	8.5

Tableau II-3 : paramètres de référence utilisés pour la simulation d'extraction lumineuse

Tout d'abord l'influence de la réflectivité de la cavité, c'est-à-dire des métaux utilisés sur les flancs de la cavité (contact N) et sur le haut de la cavité (contact P), est étudiée. Les résultats sont présentés figure II-45.

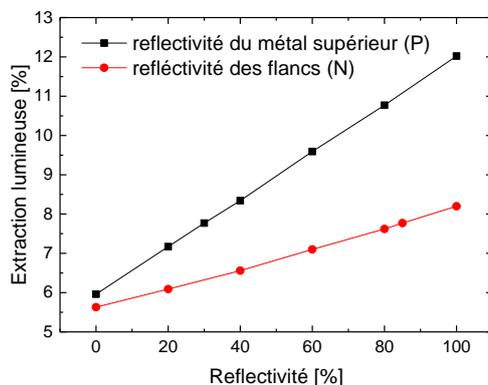


Figure II-45 : extraction lumineuse simulée en fonction de la réflectivité des métaux N et P [34]

Pour l'angle de gravure considéré (70%), la réflectivité du métal P influe plus fortement sur l'extraction lumineuse que celle du contact N. Le passage d'un métal P réflecteur de 35% (nickel) à 85% (argent) entraîne une augmentation de l'extraction lumineuse d'environ 35%.

L'influence de l'angle de gravure sur l'extraction lumineuse est rapportée figure II-46.

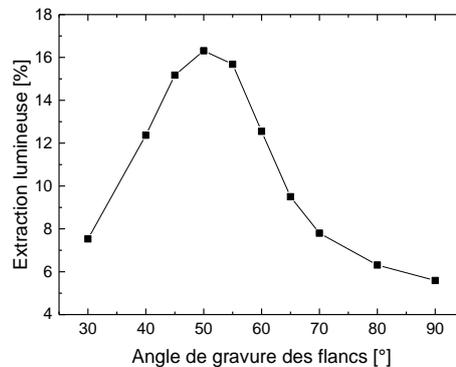


Figure II-46 : extraction lumineuse simulée en fonction de l'angle de la cavité [34]

Les simulations montrent que l'extraction est maximale pour un angle de 50°. En revanche, lorsque les flancs de gravure sont verticaux (90°), ils ne participent plus à l'augmentation de l'extraction lumineuse. L'angle de gravure est le principal paramètre permettant d'améliorer l'extraction lumineuse des micro-LED.

Cette solution ne sera cependant pas retenue pour nos études. Nous chercherons au contraire à obtenir une gravure verticale car, bien que limitant l'extraction, elle présente plusieurs avantages importants. Au niveau du procédé de fabrication, cela assure une bonne isolation électrique entre les contacts P et N. Si le diélectrique déposé n'est pas vertical, il risque d'être gravé et de mettre la LED en court-circuit. C'est donc principalement une contrainte de process qui oblige à une gravure verticale. De plus, une gravure non-verticale entraîne une perte de surface émissive importante. A titre d'exemple, une gravure à 50° sur 1 μm de profondeur d'une micro-LED de 7 μm de diamètre réduit la surface émissive d'environ 40% par rapport à une gravure verticale. Enfin, lorsque la gravure est proche de 90°, l'extraction lumineuse est quasi-indépendante de la taille de la LED. Cela permettra dans la suite du manuscrit d'étudier les effets de la taille des diodes sur le rendement quantique interne, indépendamment des effets d'extraction lumineuse. Nous y reviendrons dans le chapitre 3 dédié à l'étude de la taille des LED sur leurs performances électro-optiques.

Enfin, le rôle de la profondeur de gravure et de la taille des LED sur l'extraction lumineuse est étudié figure II-47.

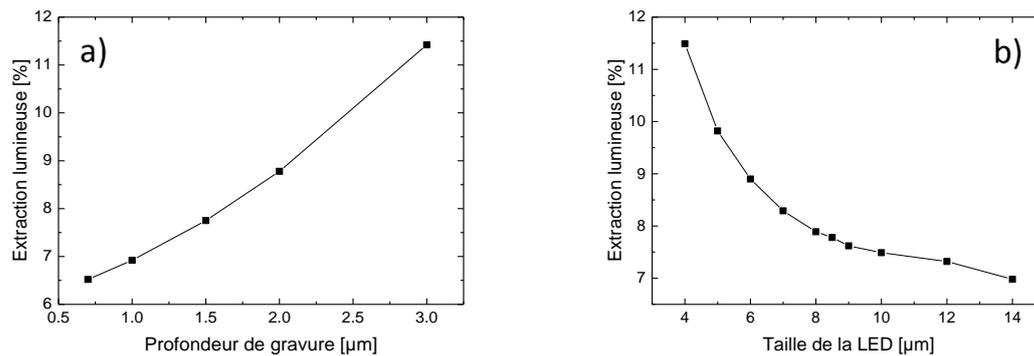


Figure II-47 : extraction lumineuse simulée en fonction de la a) profondeur de gravure et b) taille de la LED [34]

Les résultats montrent une légère augmentation de l'extraction avec une augmentation de la profondeur de gravure et une diminution de la taille des LED. Ces résultats indiquent globalement un effet bénéfique de la cavité sur l'extraction lumineuse. Les micro-LED semblent présenter une extraction lumineuse supérieure aux LED de grandes dimensions. Des résultats similaires sont rapportés dans la littérature scientifique [35] [36].

En résumé de ces travaux de simulation, le rôle de la cavité sur l'extraction lumineuse d'une μ LED est primordial. La réflectivité des métaux utilisés et l'angle de gravure des flancs sont les deux principaux paramètres à optimiser. L'extraction lumineuse de nos μ LED obtenue par simulation est d'environ 8%. C'est donc le principal frein au rendement global des diodes.

Nous chercherons par la suite à modifier le procédé de fabrication afin d'améliorer la réflectivité du contact P et ainsi améliorer le rendement EQE des LED réalisées.

II.5.4 Amélioration process : LOT 3

II.5.4.a *Changement de métallisation pour de l'argent*

Pour ce nouveau lot, le principal changement à caractériser est l'utilisation d'une nouvelle métallisation à base d'argent qui remplace le nickel, peu réflecteur et non-ohmique. De plus, le métal est plus épais, et le procédé de gravure du niveau CTD a été optimisé, pour ne pas altérer le P-GaN au cours du procédé de fabrication.

Les mesures TLM et de réflectivité réalisées sur le nouveau contact à base d'argent sont présentées ci-dessous (figure II-48).

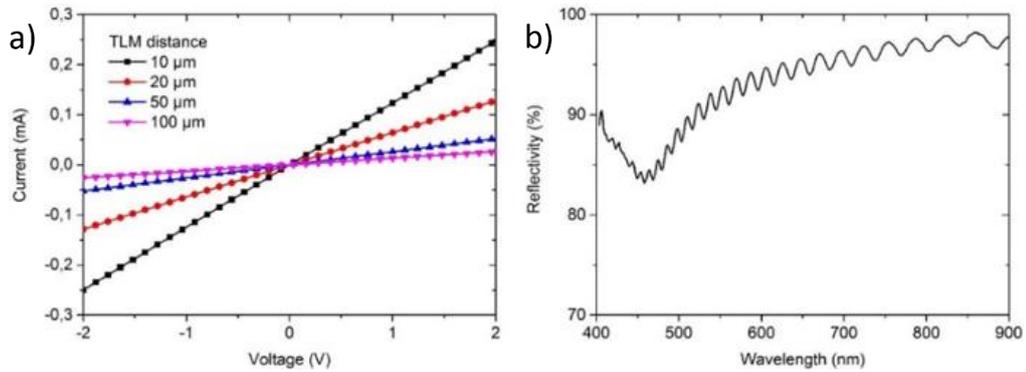


Figure II-48 : a) mesures TLM et de b) réflectivité du nouveau contact à base d'argent [18]

Le contact obtenu est ohmique, et la réflectivité obtenue très bonne, d'environ 85% à 440 nm. Les simulations optiques de tracé de rayons effectuées annoncent un gain sur l'extraction lumineuse d'environ 35% entre les deux métallisations (figure II-45). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous et comparés aux lots précédents.

LOT	Métallisation	Ohmicité	Réflectivité mesurée (à 440nm)	Extraction lumineuse simulée
1 et 2	Nickel	Redresseur	35%	≈ 8%
3	Argent	Ohmique RSC : $5 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$	85%	≈ 11%

Tableau II-4 : résumé des métallisations utilisées pour les différents lots, et performances électro-optiques associées

Précisons enfin que de nombreux changements ont été apportés entre le LOT 2 et le LOT 3, notamment des nouveaux espaceurs (matériau différent et plus épais) pour assurer l'isolation de la jonction PN et le passage sur une épitaxie de diamètre 4", du même fournisseur, avec les mêmes épaisseurs et niveaux de dopages annoncés. La seule différence notable dans l'épitaxie est l'apparition d'une EBL (*Electron Blocking Layer*) dont nous avons vu l'utilité au chapitre 1.

II.5.4.b Homogénéité d'émission du LOT 3

En premier lieu, l'homogénéité d'émission obtenue avec le nouveau contact est étudiée. Une photographie optique d'une LED de $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ (à une densité de courant de 10 A/cm^2) est présentée figure II-49.

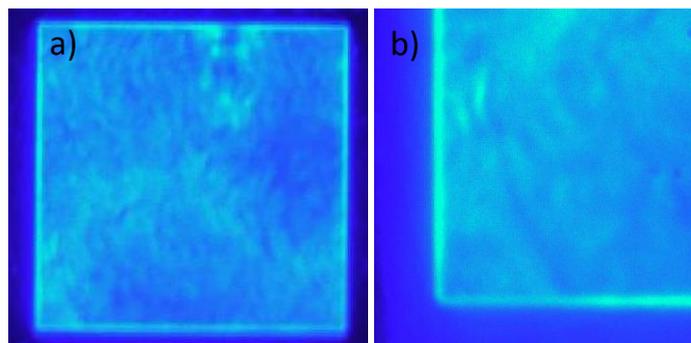


Figure II-49 : a) homogénéité d'émission d'une LED (100 µm de côté) du LOT 3 et b) zoom sur les bords de la LED

Une bonne homogénéité à la surface de la LED est obtenue, malgré des irrégularités attribuées à la rugosité de surface du P-GaN liées à la croissance épitaxiale du GaN sur saphir. Des observations similaires sont rapportées dans la littérature [37]. D'autre part, aucune zone centrale moins émissive n'est observée sur ce lot. Cette première observation permet de valider l'utilisation d'une nouvelle métallisation P à base d'argent assurant l'homogénéité d'injection et par conséquent d'émission à la surface du pixel, y compris à forte densité de courant.

Une observation supplémentaire quant à l'émission obtenue peut cependant être faite. L'image zoomée sur le bord de la LED montre que l'émission est plus intense sur les bords de la diode. Le premier constat est que les dimensions correspondent à l'épaisseur d'isolant déposé, assurant l'isolation entre les contacts P et N (figure II-8).

Une cartographie d'électroluminescence de cette LED est ensuite réalisée, utilisant le banc présenté précédemment (figure II-12). La cartographie d'intensité et de longueur d'onde d'une LED du LOT 3 en électroluminescence est présentée ci-dessous.

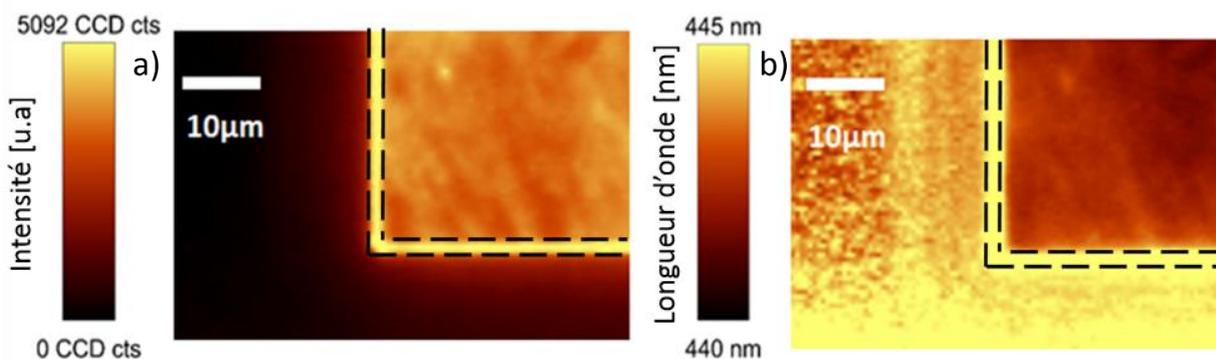


Figure II-50 : cartographie a) d'intensité d'électroluminescence et b) de longueur d'onde. Les pointillés correspondent aux dimensions des espaceurs entourant la LED

La cartographie en intensité (figure II-50.a) confirme une émission environ deux fois plus intense en périphérie du pixel qu'au centre. La cartographie en longueur d'onde (figure II-50.b) montre une séparation nette entre la zone fortement émissive et le centre de la LED. Ce résultat tend à confirmer l'hypothèse que la zone fortement lumineuse correspond à l'espaceur entourant la LED. Une augmentation de l'extraction lumineuse favorisée par l'isolant entourant la diode semble donc se produire, par un guidage dans l'oxyde. Des résultats similaires sont rapportés dans la littérature [38].

Enfin, nous pouvons noter que la zone plus intense en bords de pixel est caractérisée par une longueur d'onde plus élevée. La figure II-51 présente les spectres obtenus au centre de la LED et dans la zone intensément lumineuse en périphérie de pixel. L'ajustement par un pic gaussien donne $\lambda_c = 443 \text{ nm}$ au niveau de la LED, et $\lambda_c = 449 \text{ nm}$ au niveau de l'isolant. Cette légère augmentation de la longueur d'onde en périphérie du pixel est faible par rapport à la largeur à mi-hauteur des pics ($FWHM = 26 \text{ nm}$) et semble peu significative.

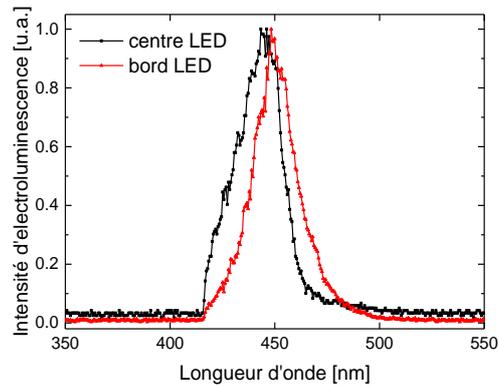


Figure II-51 : spectre d'électroluminescence obtenu dans la LED et au niveau de l'espaceur

II.5.4.c Caractérisations électro-optiques du LOT 3

Les changements apportés par ce nouveau lot sur les performances électro-optiques des LED sont maintenant étudiés. Les résultats sont comparés avec ceux du LOT 2. La figure II-52 présente les caractéristiques courant-tension obtenues.

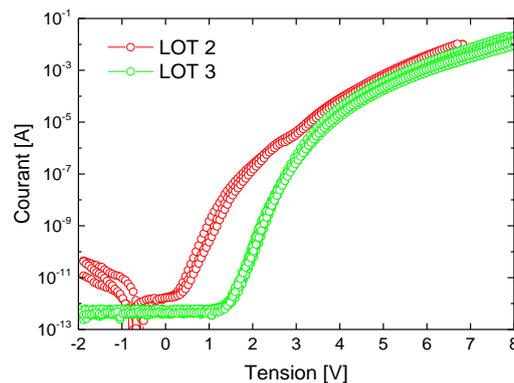


Figure II-52 : caractéristiques courant-tension de LED des lots 2 et 3

Les résultats montrent une forte baisse du courant entre -2 V et 1 V, que nous avons attribué à un courant de fuite dans une résistance parallèle. Les améliorations apportées sur les espaceurs assurant l'isolation de la jonction PN peuvent expliquer cette observation, via une meilleure passivation de la

jonction. De plus, la tension de seuil électrique passe de 0.5 V à 1.5 V et le coefficient d'idéalité est amélioré ($n_{id} \approx 4$). En revanche à forte tension (au-delà de 3 V), aucune amélioration n'est constatée.

Le tracé de la puissance optique en fonction de la tension est présenté ci-dessous (figure II-53).

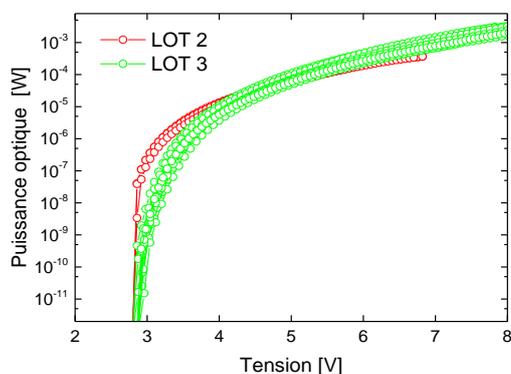


Figure II-53 : puissance optique en fonction de la tension des LED des lots 2 et 3

La tension de seuil optique, d'environ 2.8 V, est inchangée. Le LOT 3 présente une puissance optique légèrement plus faible entre 3 V et 4 V, et légèrement plus forte au-delà. Cette variation ne paraît cependant pas significative. La puissance optique est donc peu modifiée par les changements apportés sur le nouveau lot.

Enfin, la courbe du rendement EQE en fonction de la densité de courant est présentée figure II-54.

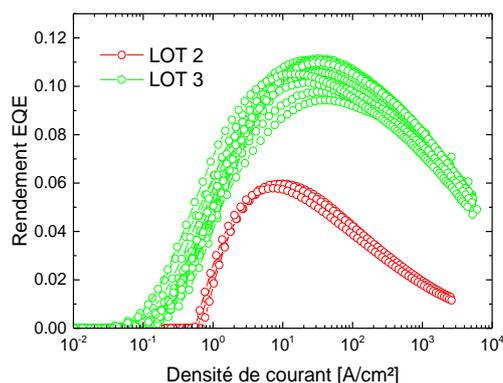


Figure II-54 : rendement EQE des LED des lots 2 et 3

Un gain important est obtenu sur le rendement maximum, passant de 6 à 11%. La densité de courant pour laquelle le rendement apparaît (J_{so}) est dix fois plus faible, ce que nous attribuons à la suppression des courants de fuite (figure II-52). C'est donc une amélioration importante apportée puisqu'elle signifie qu'il faut fournir dix fois moins de courant pour commencer à émettre de la lumière.

Le gain obtenu à forte densité de courant est plus important. Ainsi la densité de courant J_{max} passe de 8 A/cm² pour le LOT 2 à 50 A/cm² pour le LOT 3. En d'autres termes, le droop est fortement réduit et le gain sur le rendement à forte densité de courant est très important. A titre d'exemple, il passe d'environ 2% à 8% pour une densité de courant de 1000 A/cm².

Nous remarquons que le gain obtenu est légèrement supérieur aux prévisions obtenues par tracé de rayons. Plusieurs explications sont possibles. Le changement d'épitaxie est la première cause avancée. L'apparition d'une EBL, dont le but premier est d'éviter la fuite des électrons à fortes densités de courant, peut expliquer l'amélioration du droop. D'autre part, les autres améliorations process, notamment l'ohmicité du contact, peuvent participer à une amélioration du rendement.

En conclusion de cette étude portant sur le changement de métallisation du contact P, il apparaît que les gains obtenus sur le rendement sont importants. D'après les simulations optiques de tracé de rayons, l'extraction lumineuse semble en être le principal moteur. La réduction des courants à faible tension, en inverse et en direct, peut être attribuée à l'amélioration des contacts et de la passivation de la jonction par l'espaceur entourant la diode.

II.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons démontré le lien important entre le procédé de fabrication et les performances électro-optiques des LED. L'épitaxie utilisée a tout d'abord été présentée, ainsi que ses principales performances optiques et le procédé de fabrication développé au CEA LETI. Celui-ci a pour but de réaliser un réseau dense de micro-LED qui sera ensuite connecté à un circuit CMOS afin de réaliser un micro-écran LED à matrice active dans lequel chaque diode constitue un pixel de l'écran.

Deux études permettant d'améliorer les performances des diodes ont été présentées. La première fit suite à l'observation de l'émission des diodes à forte densité de courant. Une zone moins émissive fut observée et attribuée à une étape de gravure non-optimisée. Les études menées sur le matériau ont permis de conclure à une dégradation des propriétés électriques à la surface du P-GaN, dégradation supprimée en changeant le procédé d'ouverture des vias. La seconde étude porta sur l'amélioration du contact P. Celui-ci joue le rôle de masque dur, de contact ohmique et de réflecteur. Une nouvelle métallisation à base d'argent a été développée. Un gain important sur l'ohmicité et la réflectivité du contact a été obtenu. D'autre part, les caractéristiques électriques furent améliorées, en particulier à faible tension avec une suppression des courants de fuite.

Ces études ont permis d'améliorer l'homogénéité d'émission et le rendement EQE, passant de 4% à 11% pour les LED testées (figure II-55).

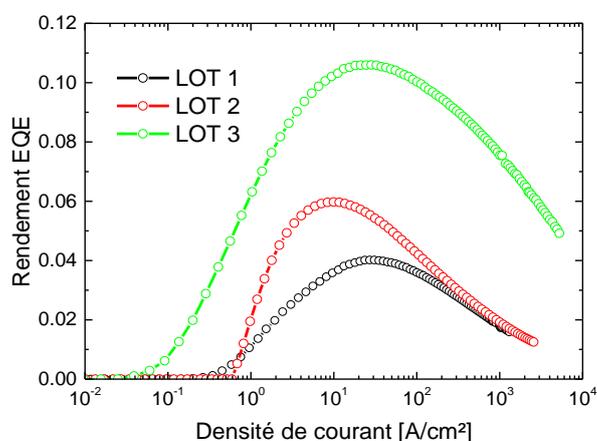


Figure II-55 : rendement EQE des LED de 20X20 µm² des différents lots présentés

Les diodes du LOT 3 présentent de bonnes performances électro-optiques. Les simulations optiques de tracé de rayon indiquent que l'extraction lumineuse limite au premier ordre le rendement de nos LED. C'est une limite qu'il conviendra d'améliorer en tenant compte les contraintes liées aux spécificités des écrans, notamment la qualité de l'image. Ces améliorations sur le procédé de fabrication permettent dorénavant d'étudier les spécificités des micro-LED pour micro-écrans, c'est-à-dire des diodes de taille micrométrique, très nombreuses, proches les unes des autres, et permettant la formation d'images.

II.7 Références

- [1] G. Orsal *et al.*, “Bandgap energy bowing parameter of strained and relaxed InGaN layers,” *Opt. Mater. Express*, vol. 4, no. 5, p. 1030, May 2014.
- [2] J. Wu *et al.*, “Small band gap bowing in In_{1-x}GaxN alloys,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 25, pp. 4741–4743, Jun. 2002.
- [3] D. M. Graham *et al.*, “Optical and microstructural studies of InGaN/GaN single-quantum-well structures,” *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 10, p. 103508, Apr. 2005.
- [4] J. A. Davidson, P. Dawson, T. Wang, T. Sugahara, J. W. Orton, and S. Sakai, “Photoluminescence studies of InGaN/GaN multi-quantum wells,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 6, p. 497, 2000.
- [5] F. Olivier, A. Daami, C. Licitra, and F. Templier, “Shockley-Read-Hall and Auger non-radiative recombination in GaN based LEDs: A size effect study,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, no. 2, p. 022104, Jul. 2017.
- [6] X. Meng *et al.*, “Study on efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 1, p. 013501, Jan. 2016.
- [7] S. Karpov, “ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs: a review,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 47, no. 6, pp. 1293–1303, Jun. 2015.
- [8] A. David and M. J. Grundmann, “Droop in InGaN light-emitting diodes: A differential carrier lifetime analysis,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 10, p. 103504, 2010.
- [9] F. Nippert *et al.*, “Determination of recombination coefficients in InGaN quantum-well light-emitting diodes by small-signal time-resolved photoluminescence,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 5S, p. 05FJ01, Feb. 2016.
- [10] C. Bazioti *et al.*, “Defects, strain relaxation, and compositional grading in high indium content InGaN epilayers grown by molecular beam epitaxy,” *J. Appl. Phys.*, vol. 118, no. 15, p. 155301, Oct. 2015.
- [11] H. W. Choi, C. Liu, M. G. Cheong, J. Zhang, and S. J. Chua, “Exposure of defects in GaN by plasma etching,” *Appl. Phys. A*, vol. 80, no. 2, pp. 405–407, Feb. 2005.
- [12] P. Tian *et al.*, “Characteristics of GaN-based light emitting diodes with different thicknesses of buffer layer grown by HVPE and MOCVD,” *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 7, p. 075101, 2017.
- [13] J. Yu *et al.*, “Influence of dislocation density on internal quantum efficiency of GaN-based semiconductors,” *AIP Adv.*, vol. 7, no. 3, p. 035321, Mar. 2017.
- [14] Q. Dai *et al.*, “Internal quantum efficiency and nonradiative recombination coefficient of GaInN/GaN multiple quantum wells with different dislocation densities,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 11, p. 111109, Mar. 2009.
- [15] M. F. Schubert *et al.*, “Effect of dislocation density on efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 23, p. 231114, Dec. 2007.
- [16] “A study of the role of dislocation density, indium composition on the radiative efficiency in InGaN/GaN polar and nonpolar light-emitting diodes using drift-diffusion coupled with a Monte Carlo method: Journal of Applied Physics: Vol 108, No 12.” [Online]. Available: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3524544>.
- [17] K. Kumakura, T. Makimoto, N. Kobayashi, T. Hashizume, T. Fukui, and H. Hasegawa, “Minority carrier diffusion length in GaN: Dislocation density and doping concentration dependence,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 5, p. 052105, Jan. 2005.
- [18] L. Dupré *et al.*, “Processing and characterization of high resolution GaN/InGaN LED arrays at 10 micron pitch for micro display applications”, *Proceedings of SPIE*, vol. 10104, pp. 1010422–1010422–8, 2017.
- [19] F. Templier *et al.*, “GaN-based Emissive Microdisplays: A Very Promising Technology for Compact, Ultra-high Brightness Display Systems,” *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 47, no. 1, pp. 1013–1016, May 2016.

- [20] F. Olivier, S. Tirano, L. Dupré, B. Aventurier, C. LARGERON, and F. Templier, "Influence of size-reduction on the performances of GaN-based micro-LEDs for display application," *J. Lumin.*, vol. 191, pp. 112–116, Nov. 2017.
- [21] D. Massoubre *et al.*, "Micro-structured light emission from planar InGaN light-emitting diodes," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 1, p. 015005, 2014.
- [22] J. O. Song, J.-S. Ha, and T.-Y. Seong, "Ohmic-Contact Technology for GaN-Based Light-Emitting Diodes: Role of P-Type Contact," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 1, pp. 42–59, Jan. 2010.
- [23] Q. Z. Liu and S. S. Lau, "A review of the metal–GaN contact technology," *Solid-State Electron.*, vol. 42, no. 5, pp. 677–691, May 1998.
- [24] J.-K. Ho, C.-S. Jong, C. C. Chiu, C.-N. Huang, C.-Y. Chen, and K.-K. Shih, "Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, no. 9, pp. 1275–1277, Mar. 1999.
- [25] C.-W. Jeon, K.-S. Kim, and M. d. Dawson, "Fabrication of Two-Dimensional InGaN-Based Micro-LED Arrays," *Phys. Status Solidi A*, vol. 192, no. 2, pp. 325–328, Aug. 2002.
- [26] H. W. Choi, C. W. Jeon, and M. D. Dawson, "High-resolution 128 x 96 nitride microdisplay," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 25, no. 5, pp. 277–279, May 2004.
- [27] K. Akita, T. Kyono, Y. Yoshizumi, H. Kitabayashi, and K. Katayama, "Improvements of external quantum efficiency of InGaN-based blue light-emitting diodes at high current density using GaN substrates," *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 3, p. 033104, Feb. 2007.
- [28] S. Y. Kim and J.-L. Lee, "Highly Reflective and Low-Resistant Ni/Au/ITO/Ag Ohmic Contact on p-Type GaN," *Electrochem. Solid-State Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. G102–G104, May 2004.
- [29] L.-B. Chang, C.-C. Shiue, and M.-J. Jeng, "Formation process of high reflective Ni/Ag/Au Ohmic contact for GaN flip-chip light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 16, p. 163515, Apr. 2007.
- [30] H. W. Jang, J. H. Son, and J.-L. Lee, "Formation of High-Quality Ag-Based Ohmic Contacts to p-Type GaN," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 155, no. 8, pp. H563–H568, Aug. 2008.
- [31] L.-B. Chang, C.-C. Shiue, and M.-J. Jeng, "High reflective p-GaN/Ni/Ag/Ti/Au Ohmic contacts for flip-chip light-emitting diode (FCLED) applications," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, no. 12, pp. 6155–6158, Apr. 2009.
- [32] H. J. Song *et al.*, "Effect of Pt and Ti on Ni/Ag/(Pt or Ti)/Au p-ohmic contacts of GaN based flip-chip LEDs," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 257, no. 18, pp. 8102–8105, Jul. 2011.
- [33] A. L. Alexandrovski, M. M. Fejer, and R. K. Route, "Effect of annealing on the light absorption in sapphire," *AIP Conf. Proc.*, vol. 523, no. 1, pp. 395–396, Jun. 2000.
- [34] F. Olivier, "Extraction lumineuse de micro-LED GaN disposées en matrice 2D pour micro-écrans," presented at the Journées nationales du réseau doctoral en micro-électronique, Toulouse, 2016.
- [35] H. W. Choi, C. W. Jeon, M. D. Dawson, P. R. Edwards, R. W. Martin, and S. Tripathy, "Mechanism of enhanced light output efficiency in InGaN-based microlight emitting diodes," *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 10, pp. 5978–5982, May 2003.
- [36] D. Han *et al.*, "Enhanced light extraction efficiency of a InGaN/GaN micro-square array light-emitting diode chip," *Opt. Mater. Express*, vol. 7, no. 9, pp. 3261–3269, Sep. 2017.
- [37] I. Otto *et al.*, "Micro-pixel light emitting diodes: Impact of the chip process on microscopic electro- and photoluminescence," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 15, p. 151108, Apr. 2015.
- [38] C.-M. Yang, D.-S. Kim, Y. S. Park, J.-H. Lee, Y. S. Lee, and J.-H. Lee, "Enhancement in Light Extraction Efficiency of GaN-Based Light-Emitting Diodes Using Double Dielectric Surface Passivation," *Opt. Photonics J.*, vol. 02, no. 03, pp. 185–192, 2012.

Chapitre III

Influence de la taille des LED sur
leurs performances électro-optiques

de la LED au pixel

III	Influence de la taille des LED sur leurs performances électro-optiques	93
III.1	INTRODUCTION	95
III.2	EFFETS DE LA TAILLE DES LED SUR LEUR PERFORMANCE.....	95
III.2.1	<i>Etude bibliographique</i>	<i>95</i>
III.2.2	<i>Caractérisations électro-optiques.....</i>	<i>99</i>
III.2.2.a	Etude électrique.....	99
III.2.2.b	Etude optique	103
III.2.2.c	Etude du rendement	105
III.2.3	<i>Etude de l'inhomogénéité d'émission sur le droop.....</i>	<i>107</i>
III.2.4	<i>Synthèse</i>	<i>109</i>
III.3	MODELISATION ET SIMULATION.....	110
III.3.1	<i>Le modèle ABC.....</i>	<i>110</i>
III.3.2	<i>Extraction des paramètres A, B et C</i>	<i>110</i>
III.3.3	<i>Etude en fonction de la taille.....</i>	<i>113</i>
III.3.4	<i>Utilisation du nouveau modèle ABC</i>	<i>114</i>
III.3.4.a	Comparaison aux mesures expérimentales	114
III.3.4.b	Vers des diodes submicroniques.....	115
III.4	ETUDE DES BORDS DE PIXEL.....	117
III.4.1	<i>Etude bibliographique</i>	<i>117</i>
III.4.2	<i>Luminescence en bord de pixel</i>	<i>118</i>
III.4.3	<i>Estimation de la largeur dégradée par l'étude du rendement</i>	<i>121</i>
III.4.4	<i>Etudes complémentaires en cathodoluminescence.....</i>	<i>122</i>
III.4.5	<i>Caractérisation IVL de diodes de même surface, au périmètre différent</i>	<i>124</i>
III.5	ETUDE DES LED VERTES	127
III.5.1	<i>Introduction.....</i>	<i>127</i>
III.5.2	<i>Caractérisations I-V-L</i>	<i>127</i>
III.5.3	<i>Etude des bords</i>	<i>130</i>
III.5.4	<i>Homogénéité d'émission</i>	<i>131</i>
III.6	CONCLUSION	135
III.7	REFERENCES	137

III.1 Introduction

La réalisation de micro-écrans LED haute définition impose la fabrication de pixels de taille micrométrique. Pour cela, une épitaxie est matriciée afin que chaque micro-LED constitue un pixel de l'image. Les principales étapes du procédé de fabrication et leur impact sur les performances des LED ont été présentées au chapitre 2.

Dans ce chapitre 3, une étude spécifique des effets de la taille des LED sur leurs performances sera réalisée. Nous débuterons ce chapitre par une étude bibliographique des principaux résultats parus dans la littérature, puis les études expérimentales menées sur les effets de taille seront présentées. Dans un deuxième temps, les résultats obtenus seront modélisés à l'aide du modèle ABC, communément utilisé dans la littérature pour l'étude des LED GaN. L'impact de la taille des LED sur chacun des paramètres A , B et C sera étudié et un nouveau modèle ajusté, tenant compte de la taille des LED, sera proposé. Ensuite, une étude des bords de pixels sera réalisée afin d'étudier les mécanismes en jeu et étudierons quels paramètres influent sur les recombinaisons de surface. Enfin, ce chapitre sera conclu par une étude des LED vertes. Les différences avec les LED bleues, et les conséquences pour la réalisation de micro-écran haute luminance seront notamment discutées.

III.2 Effets de la taille des LED sur leur performance

III.2.1 Etude bibliographique

Jin *et al.* [1] sont parmi les premiers à étudier des micro-LED (μ LED) et à les comparer à des LED de taille macrométrique. Ils montrent que remplacer une diode conventionnelle de large surface par un réseau de μ LED (12 μ m de diamètre au pas de 50 μ m) interconnectés de même surface totale permet une augmentation de 60% du rendement quantique externe. Cette augmentation est attribuée à une meilleure extraction lumineuse et possiblement un « effet micrométrique ». De plus, ils observent que la densité de courant dans une LED est inférieure à celle d'une micro-LED d'un facteur 5. Ils attribuent ce phénomène à une meilleure répartition du courant dans les micro-LED.

En 2001, Dai *et al.* [2] étudient les transitions optiques dans une μ LED (10 μ m de diamètre) par photoluminescence. Ils observent un décalage vers les plus hautes énergies par rapport à l'épitaxie initiale. Ils attribuent ce phénomène à une baisse de la polarisation piézo-électrique via une relaxation des contraintes dans les micro-LED (figure III-1).

Choi *et al.* [3] montrent en 2003 que les μ LED présentent une meilleure émission lumineuse que les LED de taille macrométrique. Ils l'expliquent par la présence de modes de cavité résonants extraits via les bords de la LED et par diffusion de la lumière depuis les flancs gravés. En revanche, Jeon *et al.* [4] montrent la même année que les μ LED présentent une tension de seuil plus élevée (figure III-2).

III. Influence de la taille des LED sur leurs performances électro-optiques

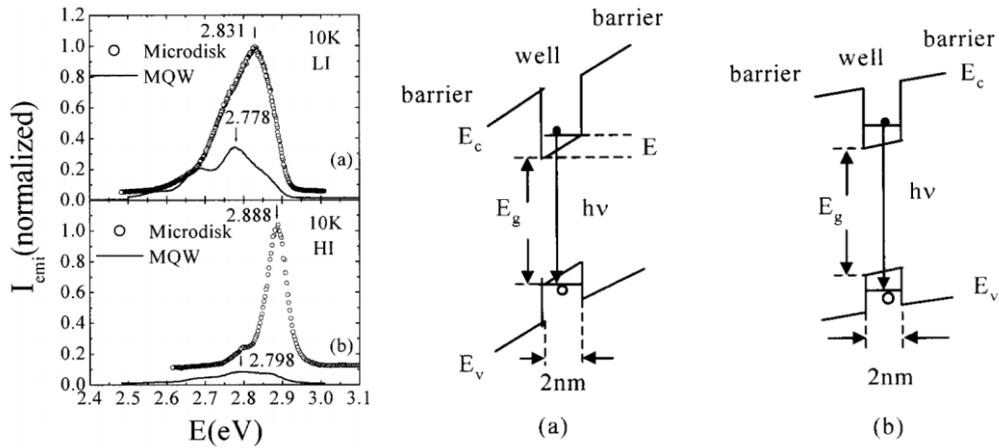


Figure III-1 : comparaison des transitions optiques dans le volume et dans une micro-LED [2]. A gauche : spectres de PL à 10 K a) à faible et b) à forte intensité d'excitation laser. A droite : représentation schématique des bandes d'énergie a) dans une LED b) dans une micro-LED avec réduction du champ piézoélectrique

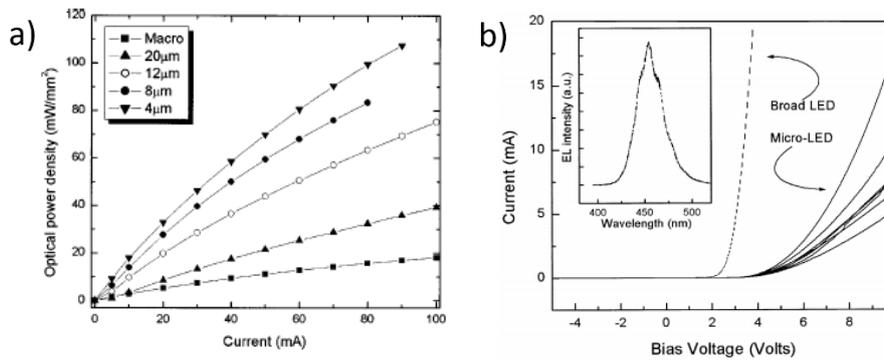


Figure III-2 : a) densité de puissance optique pour différentes tailles de LED [3] et b) comparaison de la tension de seuil entre des LED et micro-LED [4]

En 2010, Gong *et al.* [5] font eux aussi l'observation que les petites diodes présentent des propriétés optiques intéressantes. A faible densité de courant, les petites diodes émettent légèrement plus de lumière, ce qu'ils attribuent à une meilleure extraction lumineuse. Ils montrent d'autre part que les petites diodes peuvent supporter des densités de courant plus élevées que les grosses diodes, ce qu'ils expliquent par une température de jonction plus faible pour les petites diodes (figure III-3), grâce à une meilleure évacuation de la chaleur.

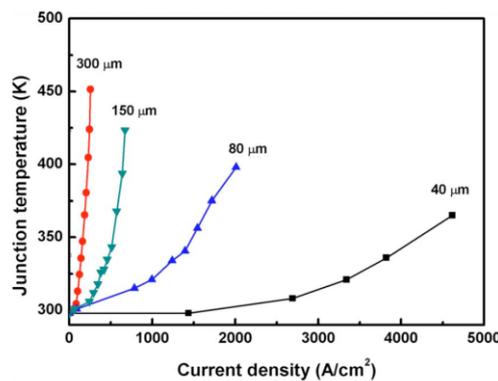


Figure III-3 : température de jonction mesurée dans les LED de différentes tailles [5]

Deux ans plus tard, Tian *et al.* [6] étudient l'influence de la taille des LED sur le rendement, en particulier sur le *droop*. Ils montrent qu'à faible densité de courant, le rendement des μ LED est réduit, ce qu'ils attribuent à des recombinaisons non-radiatives de type SRH induites par les défauts sur les flancs. A forte densité de courant en revanche, le rendement des μ LED est meilleur (figure III-4). Ils attribuent cet effet à une meilleure répartition du courant.

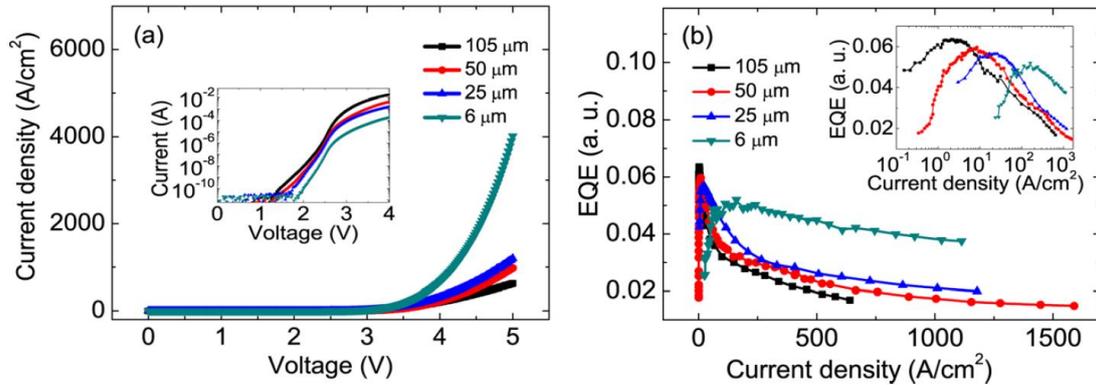


Figure III-4 : caractéristiques a) J-V et b) EQE de μ LED de différentes tailles, de 105 μ m à 6 μ m [6]

La même année Tao *et al.* [7] montrent des résultats similaires. D'après eux, le *droop* est réduit quand la taille des LED décroît. De plus, ils observent que le maximum de rendement est obtenu à des densités de courant plus fortes pour les μ LED.

Jiao *et al.* [8] étudient le spectre d'électroluminescence à différentes densités de courant pour des LED de 300 μ m et 10 μ m (figure III-5). A faible injection, un décalage du spectre d'émission vers le bleu est observé pour les deux tailles de diodes, ce qu'ils attribuent à l'écrantage du champ par les porteurs et un remplissage des bandes d'énergie dans les puits quantiques. En revanche, à forte densité de courant, un décalage vers le rouge ainsi qu'un élargissement du pic est observé pour la diode de 300 μ m. Cet effet n'est pas observé pour les μ LED de 10 μ m malgré des densités de courant très élevées, ce qui est attribué à une relaxation des contraintes dans le matériau.

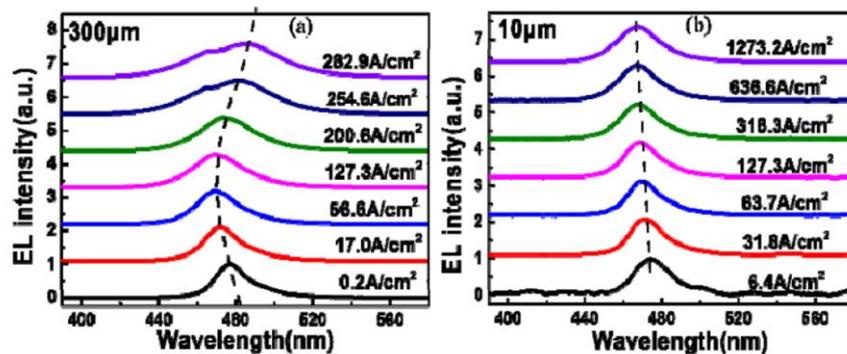


Figure III-5 : électroluminescence de a) LED (300 μ m) et b) μ LED (10 μ m) [8]

En 2016 Tian *et al.* [9] étudient le vieillissement des μ LED. Ils observent que les plus petites LED présentent un vieillissement moins important grâce à une température de jonction plus faible (figure III-6).

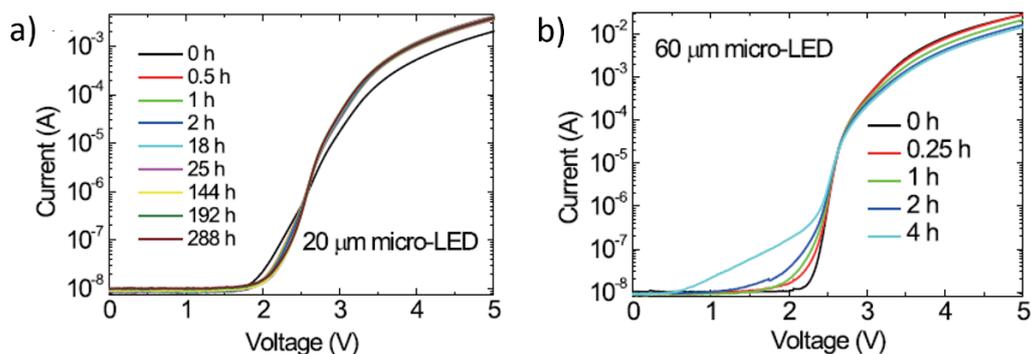


Figure III-6 : vieillissement de LED de a) 20 µm et b) 60 µm [9]

Enfin en 2017, Hwang *et al.* [10] publient leurs recherches sur les µLED. Un droop plus faible sur les diodes de taille micrométrique est attribué à une meilleure distribution du courant. Ils obtiennent des micro-LED de 10 µm de côté avec un rendement EQE maximum de 40%, un record à ce jour. Pour parvenir à ce résultat, ils fabriquent des LED unitaires, c'est-à-dire non-matricées, avec une épitaxie optimisée. Celle-ci comprend notamment un super-réseau constitué de 30 périodes InGaN/GaN de 3 nm d'épaisseur en amont de la zone à puits quantique et un substrat PSS. De plus, un miroir omnidirectionnel (ODR - 95.5% de réflectivité) est déposé sur le N-GaN et sur les flancs des LED (figure III-7).

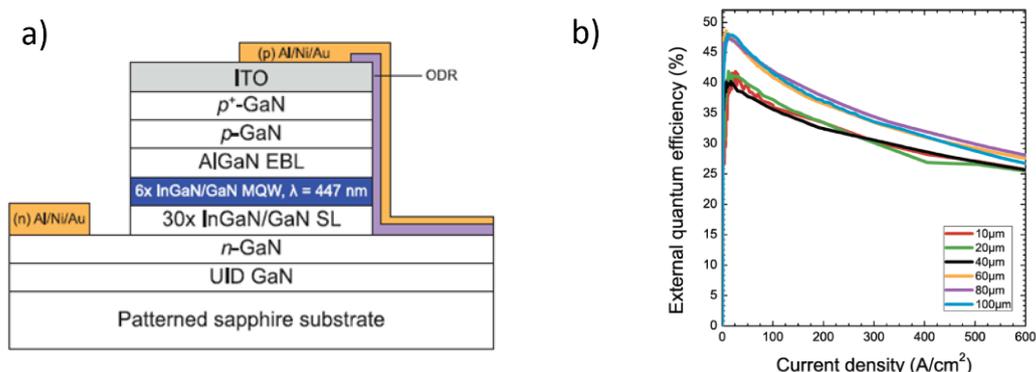


Figure III-7 : a) schéma de l'épithaxie et du design de LED utilisé et b) rendement en fonction de la taille de LED [10]

En résumé cet état de l'art, les micro-LED semblent présenter selon la littérature des rendements plus faibles à faible densité de courant et plus élevés à fortes densités de courant. Le faible rendement à faible densité de courant est généralement attribué à une augmentation du nombre de défauts non-radiatifs. Le meilleur rendement à forte densité de courant est quant à lui attribué à différents facteurs, notamment une meilleure dissipation thermique liée à une meilleure distribution du courant, ou encore à une meilleure extraction lumineuse des µLED.

Les publications étudiant les effets de la taille des LED sur leurs performances sont cependant relativement peu nombreuses. De plus, ces études sont difficilement comparables, à cause d'épithaxies et de procédés de fabrication différents, de résultats partiels ou de méthodes de caractérisation différentes. Dans ce chapitre, une étude plus systémique des effets de la taille des diodes sur leurs performances est proposée. Elle doit permettre d'aboutir à des résultats généraux, les plus indépendants possibles des moyens de fabrication et caractérisation utilisés.

III.2.2 Caractérisations électro-optiques

III.2.2.a Etude électrique

Des mesures courant-tension-luminance (I-V-L) de LED de différentes tailles, de $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ à $5 \times 5 \mu\text{m}^2$, sont réalisées. Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus avec le LOT 3, c'est à dire le lot présentant les meilleures performances électro-optiques. Les caractéristiques courant-tension (I-V) et densité de courant-tension (J-V) moyennes pour chaque taille de diodes (environ 15 LED sont testées par taille) sont présentées figure III-8.

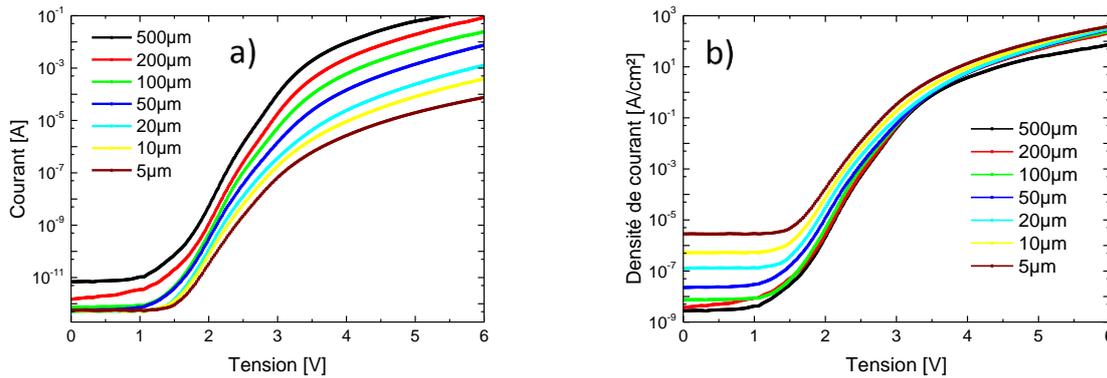


Figure III-8 : caractéristique électrique a) courant-tension et b) densité de courant-tension de LED de différentes tailles

Le courant à faible tension est limité par la résolution de l'appareil de mesure ($5 \cdot 10^{-13}$ A) pour les diodes de dimensions inférieures à $100 \mu\text{m}$. Il est donc difficile de conclure sur les courants de fuites des μLED . Les courbes J-V montrent que la densité de courant est légèrement supérieure pour les petites LED. En particulier, entre 2 V et 3 V la densité de courant est plus élevée dans les petites LED. Au-delà, les courbes tendent vers une même valeur de densité de courant, à l'exception des diodes de $500 \mu\text{m}$. Ce résultat indique un procédé de fabrication maîtrisé n'entraînant pas de défaut au premier ordre pour les μLED . De manière générale, les caractéristiques électriques obtenues sont bonnes, et la densité de courant traversant les diodes est quasi-indépendante de la taille des diodes.

Nous procédons à l'extraction des paramètres caractéristiques des courbes I-V : la tension de seuil électrique V_{se} , la résistance série R_s , et le coefficient d'idéalité n_{id} . La résistance parallèle R_p n'est pas extraite, car la valeur du courant obtenue est limitée par la sensibilité de l'appareil de mesure.

Nous choisissons comme définition de la tension de seuil électrique (V_{se}) la tension pour laquelle la première dérivée de $\ln(I)$ est maximum, c'est-à-dire le point d'inflexion de la courbe, soit :

$$V_{se} = V_{\max\left(\frac{d\ln(I)}{dV}\right)} \quad (\text{III.1})$$

Le coefficient d'idéalité n_{id} est extrait considérant l'équation de Shockley :

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{n_{id} kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.2})$$

Il est obtenu en résolvant l'équation suivante :

$$n_{id} = \min \left(\frac{q}{k \cdot T} \cdot \frac{dV}{d \ln(I)} \right) \quad (III.3)$$

L'abscisse de ce point (n_{id}) correspond à la tension de seuil électrique V_{se} . L'extraction du coefficient d'idéalité et de la tension de seuil électrique pour une diode de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ est présentée figure III-9.

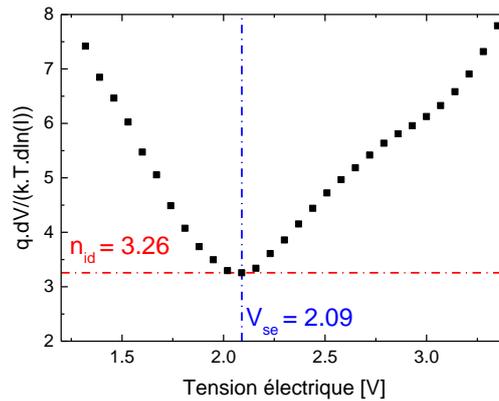


Figure III-9 : extraction du coefficient d'idéalité et de la tension de seuil électrique

Enfin, la résistance série R_s peut être obtenue, pour les diodes avec une forte résistance parallèle ($R_p \rightarrow \infty$), à partir de l'équation :

$$I = I_s \cdot \exp \left(\frac{q(V - I \cdot R_s)}{n_{id} kT} \right) \quad (III.4)$$

L'ordonnée à l'origine de $\frac{dV}{dI}$ en fonction de $\frac{1}{I}$ donne alors R_s d'après l'équation suivante :

$$\frac{dV}{dI} = R_s + \frac{n_{id} kT}{q} \cdot \frac{1}{I} \quad (III.5)$$

Le tracé de $\frac{dV}{dI}$ en fonction de $\frac{1}{I}$ est présenté figure III-10. L'ajustement linéaire obtenu permet de valider l'utilisation de cette méthode d'extraction de la résistance série R_s .

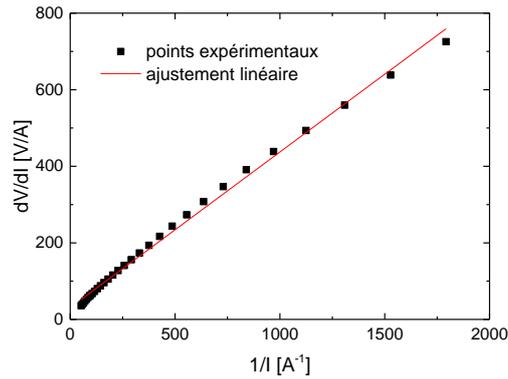


Figure III-10 : tracé de dV/dI en fonction de $1/I$. L'ordonnée à l'origine de l'ajustement linéaire correspond à la résistance série R_s

Les valeurs de tension de seuil électrique et de résistance série ainsi obtenues sont présentées ci-dessous figure III-11 pour les différentes tailles de diode étudiées.

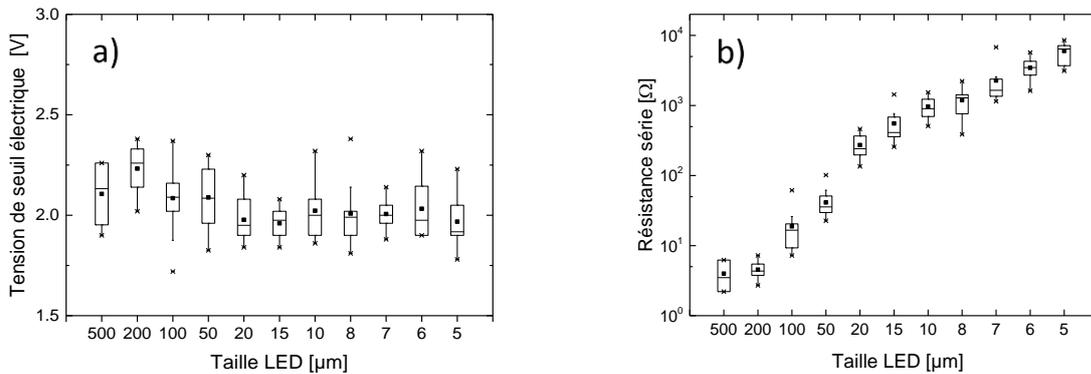


Figure III-11 : extraction a) de la tension de seuil électrique et b) de la résistance série

La tension de seuil électrique est invariante avec la taille de la LED (environ 2 V). En revanche, la résistance série augmente fortement avec la diminution de la taille des LED, passant d'environ 5 Ω à 5.10³ Ω.

La résistance série moyenne est tracée figure III-12 pour chaque taille de diode, en fonction de $1/S$, S étant la surface de la diode. Le bon ajustement linéaire indique que la résistance surfacique est identique pour toutes les tailles de diode. A forte tension, la densité de courant est quasi-identique quelle que soit la taille de la diode. Ce résultat indique de nouveau un procédé de fabrication maîtrisé n'entraînant pas de défauts pour les micro-LED. La pente de la courbe renseigne sur la résistance de contact : $R_c = 1,4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. C'est une valeur proche de celles parues dans la littérature pour des contacts à base d'argent sur le P-GaN [11] [12].

III. Influence de la taille des LED sur leurs performances électro-optiques

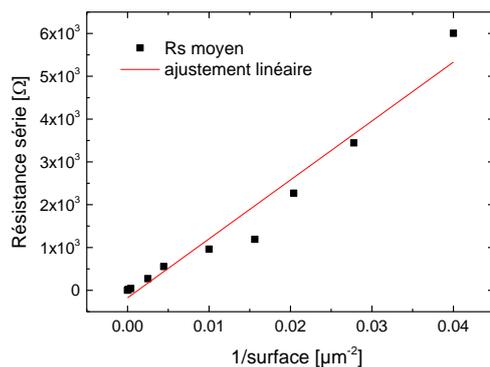


Figure III-12 : résistance série en fonction de 1/surface. L'ajustement linéaire indique que la résistance surfacique est identique pour toutes les tailles de diode

Le coefficient d'idéalité obtenu pour chaque taille de diode est présenté figure III-13. Malgré une dispersion élevée, une légère augmentation de n_{id} est observable avec la diminution de la taille du pixel (de 3 pour des grandes LED à 4 pour les plus petites). Le tracé du coefficient d'idéalité moyen en fonction du rapport périmètre/surface montre une tendance à la hausse de n_{id} lorsque ce rapport augmente, sans conclusion probante sur un véritable effet périmétrique. Les valeurs obtenues sont légèrement inférieures aux valeurs publiées dans la littérature, généralement comprises entre 4 et 7 [13] [14] [15].

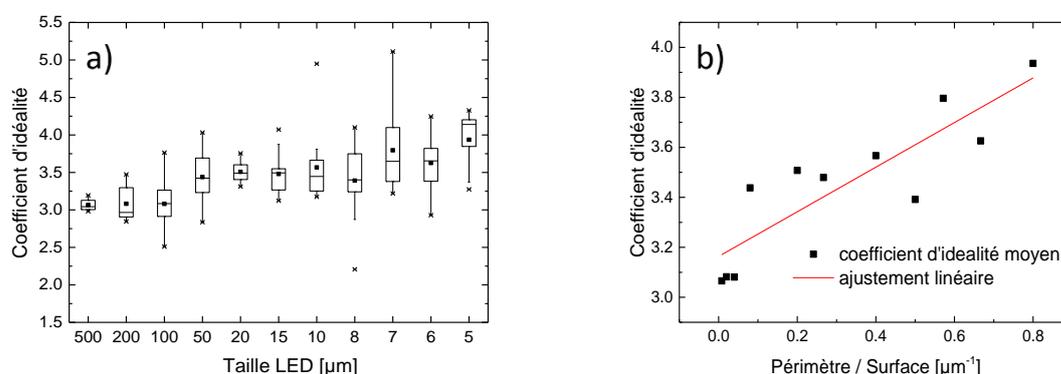


Figure III-13 : a) extraction du coefficient d'idéalité. Une légère augmentation du coefficient est observée avec la baisse des dimensions de la LED. b) tracé du coefficient d'idéalité en fonction du rapport périmètre / surface

Enfin, la dispersion obtenue sur les paramètres extraits (R_s , n_{id} et V_{se}) est relativement faible et ne varie pas avec la taille de la diode. Ceci peut traduire la maîtrise de notre procédé de fabrication, pour toutes les tailles de diode réalisées.

III.2.2.b Etude optique

Les caractéristiques électro-optiques des LED sont maintenant étudiées. Pour cela, la figure III-14 présente la puissance optique en fonction de la tension (P-V) et la densité de courant en fonction de la tension (J-V) autour de 3 V.

La tension de seuil optique (V_{SO}) est identifiée par un cercle plein sur la courbe III-14.a et cette valeur est reportée sur la courbe de densité de courant en fonction de la tension (figure III-14.b) afin d'obtenir la densité de courant de seuil optique (J_{SO}) associée. Nous définissons ainsi le seuil optique comme la tension et la densité de courant pour lesquelles les premiers photons sont détectés.

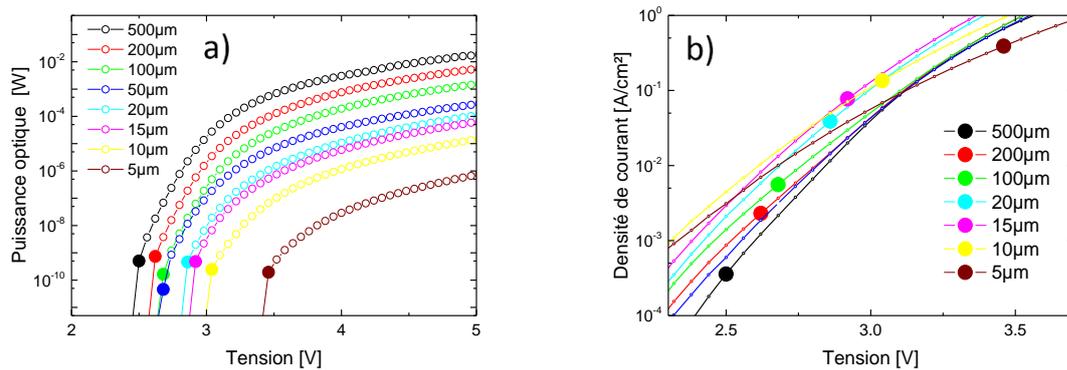


Figure III-14 : a) puissance optique en fonction de la tension et b) densité de courant en fonction de la tension autour du seuil optique

Il apparaît que le seuil optique, en tension et en densité de courant, varie fortement avec la taille de la LED. Plus la taille de la LED diminue, plus sa tension de seuil optique et sa densité de courant de seuil optique augmente (figure III-15). Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que la dispersion sur la tension de seuil optique augmente lorsque la taille de la LED diminue. Ce résultat peut indiquer un moins bon contrôle des performances optiques des μLED .

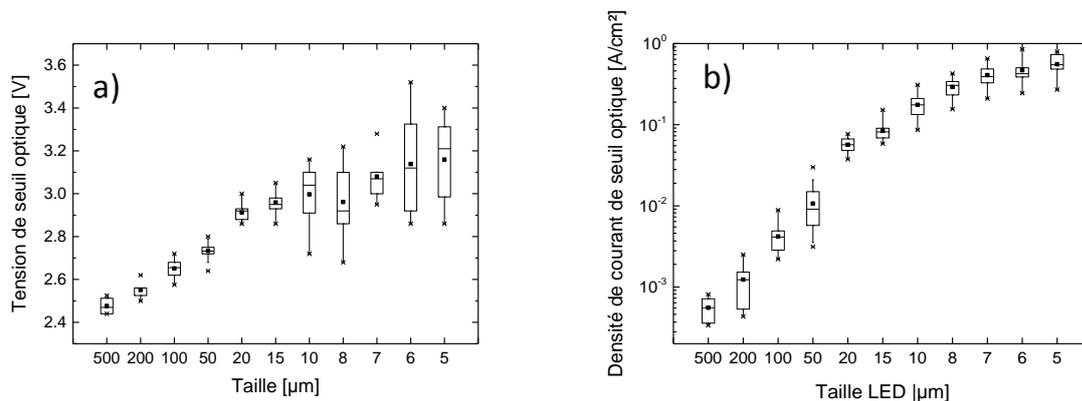


Figure III-15 : extraction a) de la tension de seuil optique et b) de la densité de courant de seuil

La variation de la tension de seuil optique V_{SO} est de 0.7 V (de 2.5 V à 3.2V). La densité de courant au seuil optique J_{SO} varie quant à elle sur trois décades. C'est un effet majeur de la taille des diodes que nous cherchons à comprendre. En particulier nous voulons savoir si la variation sur la tension de seuil optique entraîne la variation sur la densité de courant de seuil, ou inversement.

Dans le cas de semi-conducteurs fortement dopés, la tension de seuil dépend approximativement du gap du matériau.

$$V_{se} \approx \frac{E_g}{q} \quad (III.6)$$

La tension de seuil ne dépend donc pas, a priori, de la taille de la LED. L'extraction de la tension de seuil électrique va dans ce sens (figure III-11.a). D'autre part, la densité de courant nécessaire pour saturer les défauts dépend de la concentration de défauts présents dans le matériau. Ainsi, si la concentration de défauts augmente, la densité de courant de seuil optique augmente. Nous pouvons donc formuler l'hypothèse, qui sera mise à l'épreuve dans la suite de ce chapitre, qu'une petite LED présente plus de défauts non-radiatifs de type SRH. Cette augmentation des défauts entraîne une augmentation de la densité de courant nécessaire pour saturer les défauts et commencer à émettre des photons.

Ceci entraîne un décalage de la densité de courant seuil J_{so} qui par conséquent explique une tension de seuil optique V_{so} plus élevée. Les parties III.2 et III.3 auront pour objectif d'évaluer cette hypothèse et d'expliquer les phénomènes en jeu. Nous y reviendrons donc plus tard dans la suite de ce chapitre, et poursuivons ici l'étude des caractéristiques I-V-L en fonction de la taille.

Afin de poursuivre l'étude optique de LED de différentes tailles, la luminance en fonction de la densité de courant est présentée figure III-16. Les courbes tendent vers une même limite, c'est-à-dire qu'à densité de courant donnée, les micro-LED ne permettent pas d'atteindre des niveaux de luminance plus élevés. Cette limite à forte densité de courant est attribuée à la qualité de l'épitaxie, et en particulier au droop qui limite le rendement des LED à forte densité de courant. Nous avons déjà évoqué au chapitre 2 l'hypothèse que le droop est indépendant du procédé de fabrication, mais dépend principalement de l'épitaxie utilisée. Nous faisons ici l'hypothèse que la taille des diodes n'influe pas non plus sur le droop.

Bien que la luminance des diodes tende vers une limite commune à toutes les tailles, les micro-LED peuvent fonctionner à des densités de courant plus élevées. A titre d'exemple, une LED de $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ subit une dégradation irréversible à quelques 10^1 A/cm^2 , tandis qu'une micro-LED permet d'obtenir des densités de courant supérieures à 10^4 A/cm^2 . Cette meilleure capacité des micro-LED à fonctionner à forte densité de courant montre une meilleure robustesse et peut signifier un meilleur budget thermique des micro-LED. Cette observation est en accord avec certaines publications montrant une température de jonction plus faible dans les micro-LED [5] et une meilleure dissipation thermique dans les matrices de micro-LED [16]. C'est donc la capacité des micro-LED à supporter des densités de courants élevées qui explique qu'elles permettent d'obtenir des luminances élevées. La densité de courant maximale obtenue, et la luminance associée sont présentées figure III-16.b pour différentes tailles de diode.

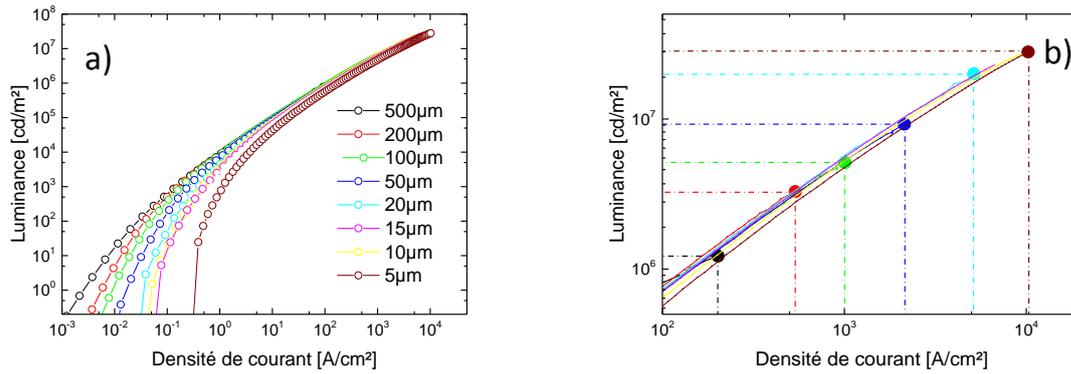


Figure III-16 : a) luminance en fonction de la densité de courant et b) niveau maximum de luminance atteint pour différentes tailles de LED

La luminance maximum atteinte est supérieure à 10^7 cd/m² pour les μ LED de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$. Pour obtenir des niveaux de luminance de l'ordre de 10^5 cd/m², il faut travailler à des densités de courant de l'ordre de 10 A/cm^2 à 100 A/cm^2 , soit un courant de l'ordre de $4 \mu\text{A}$ à $40 \mu\text{A}$ pour des μ LED de $7 \mu\text{m}$ de diamètre.

En résumé de cette étude optique, le seuil optique varie fortement avec la taille des LED et les courbes de luminance tendent vers une même limite. Les micro-LED sont moins performantes à faible densité de courant, mais permettent d'atteindre des densités de courant – et des luminances – plus élevées. Les micro-LED ne sont donc pas plus efficaces, mais elles permettent de prolonger la courbe de luminance et ainsi atteindre des niveaux de luminances élevés.

III.2.2.c Etude du rendement

Le rendement EQE en fonction de la densité de courant et de la tension est présenté figure III-17.

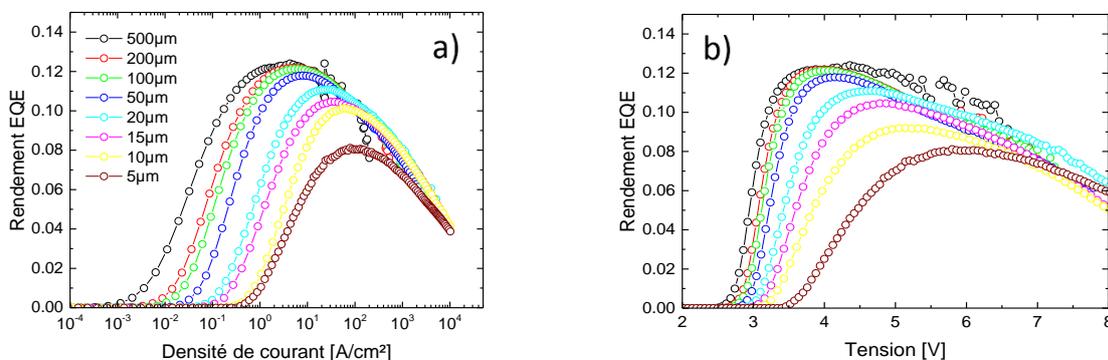


Figure III-17 : rendement EQE a) en fonction de la densité de courant et b) en fonction de la tension pour différentes tailles de LED

A faible densité de courant, nous avons déjà observé que la densité de courant de seuil optique augmente lorsque la taille de la LED diminue, ce qui se confirme sur la courbe du rendement. Il est intéressant de noter qu'ensuite le rendement augmente de manière similaire pour toutes les LED. A forte densité de courant, le droop limite le rendement de toutes les LED, quelle que soit leur taille, ce que nous avons attribué à une limite intrinsèque liée à l'épitaxie. Le rendement d'une LED dépend donc fortement de la taille des diodes à faible densité de courant, tandis qu'il est quasiment indépendant à forte densité de courant.

En conséquence de ceux deux phénomènes (décalage du seuil à faible densité de courant et droop commun à forte densité de courant), les petites LED présentent un rendement maximum plus faible, et ce maximum de rendement est atteint à une densité de courant plus élevée.

Nous rappelons que le rendement EQE maximal atteint pour les grosses LED ($500 \times 500 \mu\text{m}^2$) est inférieur au rendement typique des diodes commerciales (typiquement 50%) (cf. chapitre 2). Cette différence est principalement attribuée à l'absence de structures visant à améliorer l'extraction par rapport aux LED commerciales (substrat PSS et dôme en époxy).

Le tracé du rendement EQE en fonction de la tension appliquée montre que la tension pour laquelle le rendement est maximal passe de 3.5 V à 6 V. C'est un effet néfaste important des micro-LED en vue de leur intégration sur un circuit CMOS en termes de consommation notamment.

D'autre part, nous avons vu que pour des applications de micro-écrans haute-luminance, des densités de courant de l'ordre de 10 A/cm^2 à 100 A/cm^2 sont nécessaires. Les courbes de rendement montrent que pour les micro-LED, ces niveaux de courant correspondent environ au rendement maximal. Il s'agit d'un avantage des micro-LED pour des écrans haute-luminance. En revanche, le rendement des μLED est très fortement réduit à faible injection.

Les rendements EQE maximum et densités de courant (J_{max}) associées sont présentés figure III-18, pour toutes les diodes testées (en moyenne 15 diodes sont mesurées par taille). Un plateau est observé pour les grandes diodes (de $500 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$), puis à partir de $50 \mu\text{m}$ le rendement maximum baisse fortement avec la miniaturisation du pixel. Cette baisse du rendement est associée à une forte augmentation de la densité de courant associée J_{max} . D'autre part, la dispersion obtenue est limitée (à $\pm 1\%$ environ), ce qui indique une bonne maîtrise de notre procédé de fabrication et confirme la validité des résultats présentés auparavant (figure III-17).

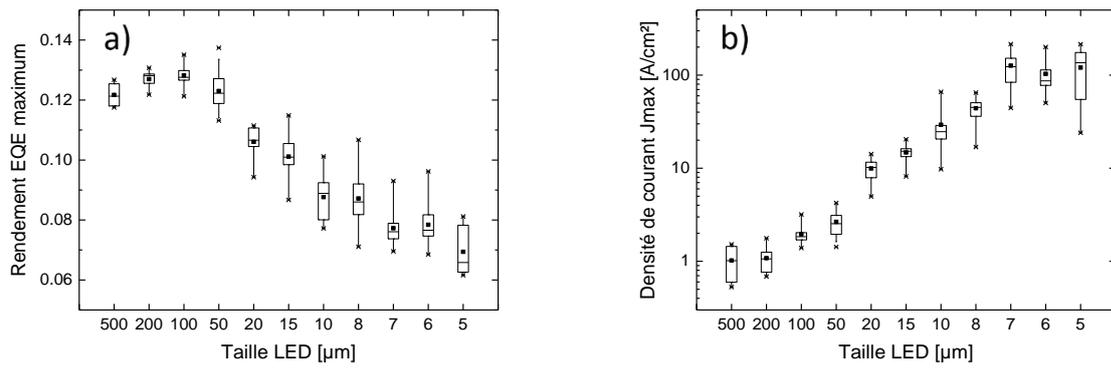


Figure III-18 : extraction a) du rendement EQE maximum et b) de la densité de courant à laquelle le rendement est maximal J_{max}

Précisons que les phénomènes présentés ici (décalage du seuil optique, chute du rendement maximum, augmentation de la densité de courant au maximum du rendement et droop commun) ont été observés sur tous les lots étudiés au cours de la thèse. Il ne s'agit donc pas d'un cas particulier observé sur le LOT 3, mais d'un phénomène intrinsèque à toutes les LED de notre technologie. Ce sont des résultats fondamentaux dans l'étude des micro-LED qui seront analysés en détail dans la suite de ce chapitre.

III.2.3 Etude de l'inhomogénéité d'émission sur le droop

Nous avons présenté dans l'étude précédente le rendement de LED du LOT 3, présentant une émission homogène sur toute la surface du pixel. Dans ce paragraphe, une spécificité obtenue sur l'allure du rendement des LED du LOT 1 sera analysée. Ces LED présentent une forte inhomogénéité d'émission à forte densité de courant, à cause d'une zone centrale dégradée (chapitre 2) et nous souhaitons étudier les conséquences de ce défaut sur le rendement des diodes.

Tout d'abord, le rendement EQE obtenu en fonction de la taille de LED, de $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ à $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ est présenté pour le LOT 3 (figure III-19.a) et le LOT 1 (figure III-19.b).

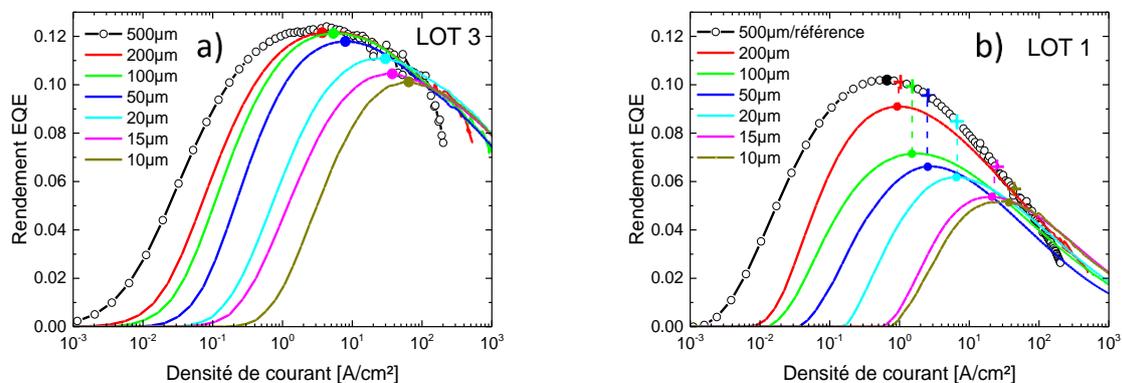


Figure III-19 : rendement EQE du a) LOT 3 et b) LOT 1. Le droop apparaît prématurément pour les LED du LOT 1

L'allure des courbes de rendement du LOT 1 est similaire au LOT 3, en ce qui concerne le fort décalage de la densité de courant de seuil optique et la baisse du rendement maximum avec la miniaturisation de la LED. Le maximum du rendement de la LED 500X500 μm^2 (en noir) du LOT 1 est obtenu à environ 0.5 A/cm² contre 5 A/cm² pour le LOT 3. Ce gain d'une décade sur la densité de courant J_{max} avait été abordé au chapitre 2. Cet effet avait principalement été attribué à la présence d'une EBL pour l'épitaxie du LOT 3. Cette EBL a pour rôle principal d'empêcher la fuite de porteurs (*electron overflow*) au-delà des puits quantiques à forte densité de courant et ainsi réduire le droop.

Nous attirons l'attention du lecteur sur l'apparition du droop pour les différentes tailles de diode. Pour cela, nous considérons la LED de 500X500 μm^2 comme référence et le rendement maximum pour chaque taille de diode est signalé par un cercle plein ●.

Les LED du LOT 3 (figure III-19.a) présentent une limite commune à forte densité de courant. Ainsi, le rendement des diodes de plus petite taille (200 μm et moins) apparait à une densité de courant plus forte, puis augmente jusqu'à atteindre la courbe de référence en noir (500X500 μm^2). Ensuite, un droop commun à toutes les diodes limite le rendement des LED à forte densité de courant.

En revanche, dans le cas des LED du LOT 1, le rendement des LED n'atteint pas la courbe de référence. Le droop apparait prématurément. Nous signalons (figure III-19.b) sur la courbe de référence par un signe + le rendement de la courbe de référence à la densité de courant pour laquelle le rendement des petites diodes est maximal. Nous définissons ainsi un 'ratio d'idéalité', traduisant l'écart entre le rendement maximal atteint expérimentalement par la diode (●), et le rendement théorique si la courbe avait atteint la référence (+).

$$ratio\ d'idéalité = \frac{\max(EQE_{experimental})}{\max(EQE_{théorique})} \quad (III.7)$$

Ce ratio d'idéalité est calculé pour chaque taille de LED et les résultats présentés figure III-20.a.

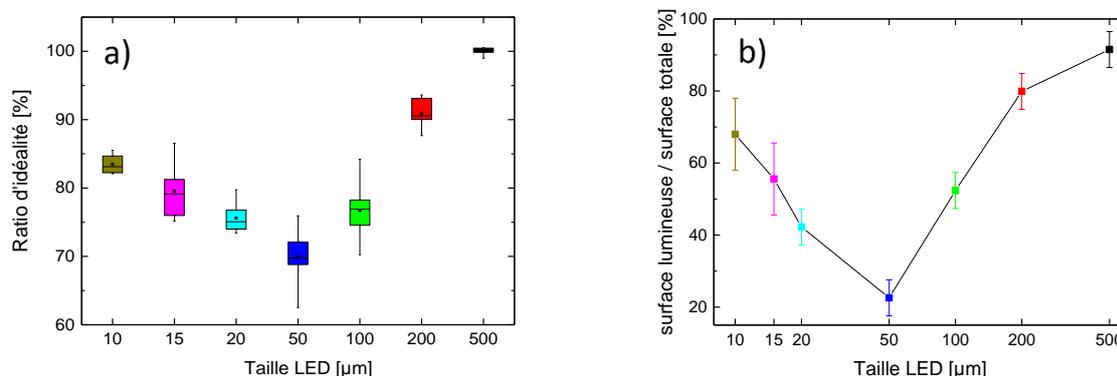


Figure III-20 : a) ratio d'idéalité et b) rapport de la surface lumineuse sur la surface totale de la LED pour différentes tailles de LED [17]

Le ratio d'idéalité dépend de la taille et atteint un minimum pour les diodes de dimension 50X50 μm^2 .

Afin de comprendre l'allure de la courbe, nous nous intéressons à l'inhomogénéité d'émission abordée au chapitre 2.

Pour chaque taille de diode, le rapport de la surface lumineuse sur la surface totale est calculé. Les résultats sont présentés figure III-20.b. La forte corrélation des graphes III-20.a et III-20.b tend à indiquer que la zone moins émissive étudiée au chapitre 2 est à l'origine d'une apparition prématurée du droop et limite ainsi le rendement maximal atteint par les LED. L'homogénéité d'émission est donc un point important à étudier et optimiser pour éviter une apparition prématurée du droop, et ainsi augmenter le rendement maximal atteint par les LED.

III.2.4 Synthèse

L'étude des effets de la taille des diodes sur leurs performances électro-optiques a donné des résultats importants que nous nous proposons de résumer ici.

Electriquement, les courbes de densité de courant en fonction de la tension sont très proches, ce qui montre la bonne qualité électrique des diodes obtenues. En particulier, la tension de seuil électrique est indépendante de la taille des diodes et la résistance série varie linéairement avec leur surface. Seule une légère augmentation du coefficient d'idéalité avec la diminution de la taille des LED est à noter, et montre une légère dégradation électrique des micro-LED.

En revanche, les effets de la taille des diodes sont importants sur leurs performances optiques. Le seuil optique (en densité de courant et en tension) augmente fortement lorsque la taille de la diode diminue. Une augmentation de la densité de défauts non-radiatifs de type SRH est présumée en être à l'origine. Cet effet sera investigué dans la suite de ce chapitre. D'autre part, les petites diodes supportent des densités de courant plus élevées que les grandes diodes, ce qui explique les forts niveaux de luminance atteints par les micro-LED.

Les courbes de rendement reflètent ces observations. A faible densité de courant, la taille des diodes affecte fortement leur rendement. A forte densité de courant, le droop limite le rendement des diodes, indépendamment de leur taille. En conséquence, plus une diode est petite et plus son rendement maximum diminue. Le point de fonctionnement au rendement maximum est aussi atteint à des densités de courant et tensions plus élevées. Cette observation est une constante observée pour tous les lots étudiés au cours de cette thèse.

Nous cherchons à investiguer dans la suite de ce chapitre les résultats et hypothèses présentés ci-dessus. En particulier, la variation du seuil optique sera analysée. C'est en effet ce phénomène qui est à l'origine des moins bonnes performances des LED à faible densité de courant et de leur rendement maximum plus faible. Pour cela, le modèle ABC sera utilisé afin d'étudier le rôle de chaque type de recombinaison en fonction de la taille des LED. De plus, des observations de cathodoluminescence et photoluminescence seront réalisées pour étudier l'émission des LED. Enfin, une étude sur les LED GaN émettant dans le vert sera présentée en fin de chapitre. Nous nous attacherons en particulier aux spécificités des LED vertes et les conséquences en vue de la réalisation de micro-écrans haute luminance.

III.3 Modélisation et simulation

III.3.1 Le modèle ABC

Le modèle ABC présenté au chapitre 1 est communément utilisé pour l'étude du rendement quantique interne de LED GaN. Chaque coefficient A , B et C représente un type de recombinaisons, respectivement SRH non-radiatif, radiatif et Auger non-radiatif. Le rendement IQE s'exprime alors de la forme :

$$IQE = \frac{B \cdot n^2}{A \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3} \quad (III.8)$$

Avec la densité de courant J :

$$J = q \cdot w \cdot (A \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3) \quad (III.9)$$

Où w est la profondeur de la zone active (des puits quantiques). Rappelons enfin que le rendement EQE est le produit du rendement IQE par l'extraction lumineuse.

$$EQE = IQE \times LEE \quad (III.10)$$

Nous souhaitons extraire la valeur des paramètres A , B et C pour chaque taille de LED afin de comprendre le rôle relatif de chaque recombinaison suivant la taille des LED. Bien que le modèle ABC soit parfois remis en question par les approximations qu'il entraîne et l'incertitude sur l'origine exacte du *droop*, il n'en reste pas moins un modèle efficace pour prédire le comportement des LED et comparer les résultats obtenus dans la littérature.

Une méthode proposée par David *et al.* [18] pour extraire les paramètres ABC consiste en une mesure différentielle de la durée de vie des porteurs. La durée de vie des porteurs est corrélée au décalage de phase entre la lumière collectée et le courant injecté dans la LED. Cependant, nous n'avons pas trouvé mention dans la littérature de l'extraction des paramètres A , B et C en fonction de la taille des LED.

III.3.2 Extraction des paramètres A , B et C

Nous proposons ici une nouvelle méthode d'extraction des paramètres du modèle ABC à partir des caractéristiques IVL obtenues, et en particulier des courbes du rendement EQE en fonction de la densité de courant. Le modèle ABC décrivant le rendement quantique interne IQE, il est nécessaire de déterminer au préalable l'extraction lumineuse. Pour cela, des simulations optiques de tracé de rayons sont réalisées. La structure simulée est similaire à celle présentée au chapitre 2, considérant des flancs de gravure de 85° (d'après des observations en microscopie électronique à balayage), une réflectivité du contact P de 85% et du contact N de 90%. Les résultats obtenus sont présentés figure III-21.a. Ils montrent que l'extraction lumineuse est quasi-constante en fonction de la taille de la LED, et d'environ 14%.

D'autre part, le coefficient de recombinaison bimoléculaire (B) de notre épitaxie a été mesuré au chapitre 2 : $B = 10^{-11} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$. Ce coefficient traduisant l'efficacité optique des puits quantiques, il est considéré indépendant de la taille des LED et uniquement fonction de la qualité de l'épitaxie. Afin

d'évaluer la validité de cette hypothèse, des mesures de μ PL sont réalisées sur des micro-LED. Une cartographie de μ PL est réalisée sur une μ LED (7 μ m de côté) et présentée figure III-21.b. L'intensité du signal PL (à 440 nm) est homogène sur toute la surface du pixel. En particulier, Les résultats ne montrent pas de dégradation sur les bords de pixel. Nous considérons que le paramètre B , qui avait été mesuré sur une épitaxie avant le procédé de fabrication, est identique sur une LED après process, et constant quelle que soit la taille de la LED.

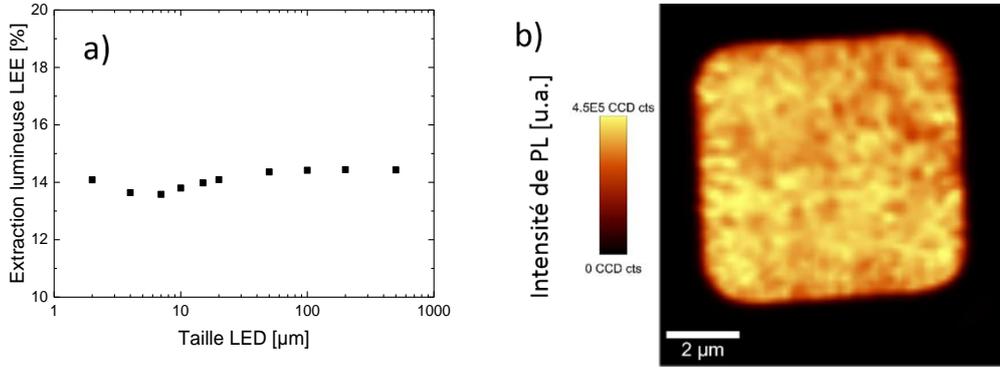


Figure III-21 :a) extraction lumineuse en fonction de la taille des LED obtenue par simulation et b) cartographie de μ PL réalisée sur une micro-LED de 7X7 μ m² [19]

Nous cherchons maintenant à extraire les paramètres A et C , correspondant aux recombinaisons non-radiatives (respectivement SRH et Auger). Partant des équations III.8 et III.9, il est possible d'exprimer la densité de porteurs sous la forme :

$$n = \sqrt{\frac{IQE \cdot J}{q \cdot w \cdot B}} \quad (\text{III.11})$$

En posant $Y = \frac{1}{IQE}$, $X = \sqrt{\frac{IQE \cdot J}{q \cdot w}}$, $\alpha = \frac{C}{B^{3/2}}$ et $\beta = \frac{A}{B^{1/2}}$, une équation simplifiée est obtenue et s'écrit sous la forme :

$$Y = \alpha \cdot X + \frac{\beta}{X} + 1 \quad (\text{III.12})$$

Le coefficient A (donc β) est prédominant à faible densité de courant et C (donc α) est prédominant à forte densité de courant. Il est ensuite possible de séparer l'équation précédente en un jeu de deux équations simples à ajuster, à faible et forte densité de courant :

$$Y_\alpha = \alpha \cdot X_\alpha + 1 \quad (\text{III.13})$$

$$Y_\beta = \frac{\beta}{X_\beta} + 1 \quad (\text{III.14})$$

Cette méthode est appliquée sur une diode de 100X100 μ m², et les ajustements obtenus permettant l'extraction des paramètres α et β sont présentés figure III-22. Un bon ajustement des courbes avec notre modèle est obtenu. Les valeurs obtenues des coefficients A et C ($A=3,7 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ et $C=2,6 \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$) sont proches de celles parues dans la littérature. En effet, les valeurs de A sont

généralement comprises entre 10^6 et 10^7 s^{-1} , et les valeurs de C comprises entre 10^{-32} et $10^{-29} \text{ cm}^6\text{s}^{-1}$ [20][21].

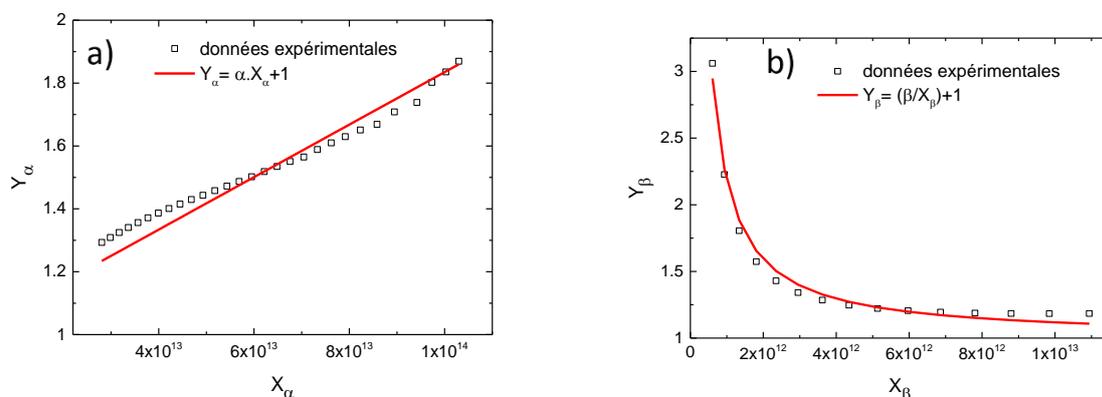


Figure III-22 : ajustement des équations a) III.13 et b) III.14 permettant l'extraction des coefficients A et C [19]

La figure III-23 ci-dessous présente le rendement IQE expérimental (calculé à partir des mesures EQE expérimentales et des simulations d'extraction lumineuse) et simulé à l'aide des paramètres obtenus. Un bon ajustement est observé. La partie à faible densité de courant est moins bien ajustée, probablement due à un nombre de points de mesure insuffisant et l'erreur expérimentale dans la mesure de très faibles niveaux de puissance optique due au courant d'obscurité inhérent à toute photodiode de mesure.

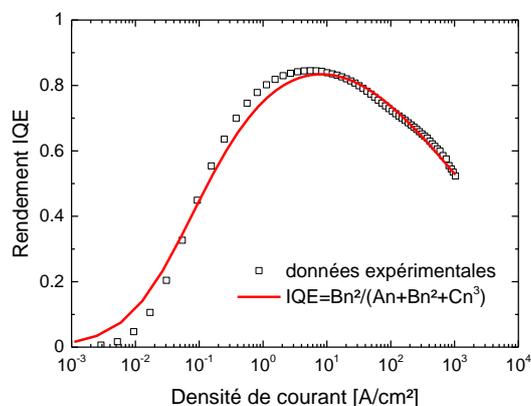


Figure III-23 : courbe IQE expérimentale et obtenue par extraction des paramètres ABC [19]

La méthode d'extraction proposée ici présente l'avantage d'une grande simplicité, contrairement aux méthodes proposées dans la littérature [18] [22]. Elle permet la détermination des paramètres A et C , traduisant les mécanismes de recombinaisons non-radiatives dans une LED. Elle repose au préalable sur la détermination du coefficient B , sur l'hypothèse de l'invariance de ce paramètre avec la taille des diodes, ainsi que sur une estimation de l'extraction lumineuse. Malgré la simplicité du modèle, un bon ajustement est obtenu sur la diode présentée ici et les valeurs obtenues des paramètres A , B et C sont en accord avec la littérature.

III.3.3 Etude en fonction de la taille

Cette méthode d'extraction est utilisée pour extraire les valeurs de A et C pour chaque taille de LED. Les résultats sont présentés figure III-24 avec les barres d'erreurs, puisque plusieurs diodes de chaque taille sont testées (en moyenne 15).

Les coefficients A et C montrent deux tendances différentes. Le coefficient A est fortement dépendant de la taille des LED. Plus la taille de la LED diminue, plus le coefficient A augmente. En revanche, le coefficient C est quasi-indépendant de la taille des LED. Ce résultat montre de nouveau que le droop est indépendant de la taille des diodes. C'est un résultat fondamental dans l'étude des micro-LED : le droop semble limité intrinsèquement par l'épitaxie. En conséquence, pour une épitaxie donnée, les deux principales voies d'amélioration du rendement des μ LED portent sur la diminution du paramètre A et l'augmentation de l'extraction lumineuse. D'après nos études, l'utilisation de micro-LED ne permet pas de diminuer le droop et d'obtenir un meilleur rendement à très forte densité de courant, contrairement à certaines publications scientifiques [6] [7] .

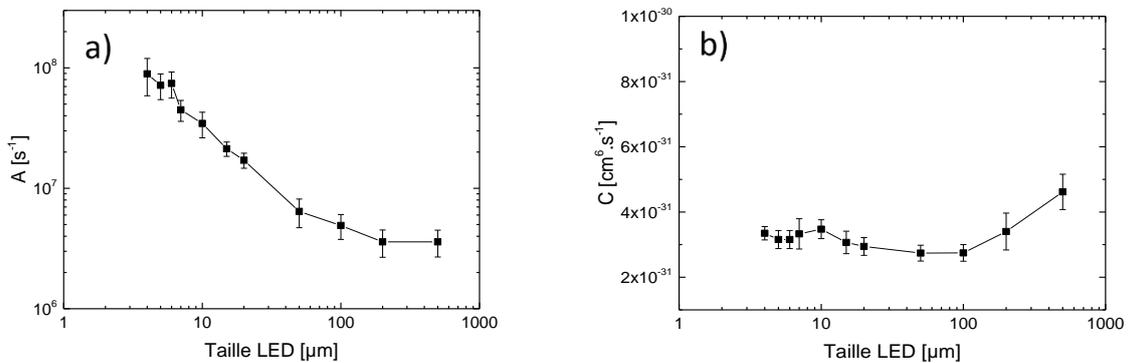


Figure III-24 : extraction des paramètres A et C pour différentes tailles de LED [19]

L'étude du coefficient A est complétée en traçant sa dépendance en fonction du rapport périmètre/surface de la LED (figure III-25).

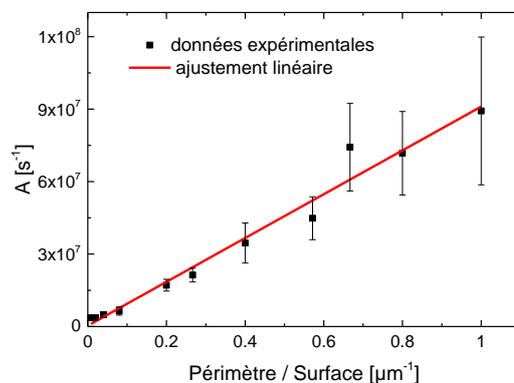


Figure III-25 : coefficient A en fonction du rapport périmètre / surface de la LED [19]

Le très bon ajustement linéaire obtenu indique que les recombinaisons non-radiatives type SRH à faible densité de courant dépendent principalement des bords de la LED. En d'autres termes, la majorité des recombinaisons non-radiatives ont lieu sur les flancs de la LED. Par conséquent, l'étude des bords de pixel, et l'amélioration du procédé de fabrication pour en limiter la dégradation sont des axes d'étude essentiels pour améliorer le rendement des micro-LED. Nous y reviendrons dans la suite de ce chapitre.

III.3.4 Utilisation du nouveau modèle ABC

III.3.4.a Comparaison aux mesures expérimentales

Au vu des résultats présentés ci-dessus, nous proposons de modifier le modèle standard ABC, pour prendre en compte la dépendance périmétrique du paramètre A. Ainsi, l'équation devient :

$$IQE = \frac{B \cdot n^2}{A \cdot \frac{P}{S} \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3} \quad (III.15)$$

Les figures III-26 présentent le rendement expérimental mesuré et le rendement obtenu par simulation en utilisant le modèle ci-dessus, considérant une extraction lumineuse de 14% et les paramètres A, B et C déterminés auparavant sur la diode 100X100 μm².

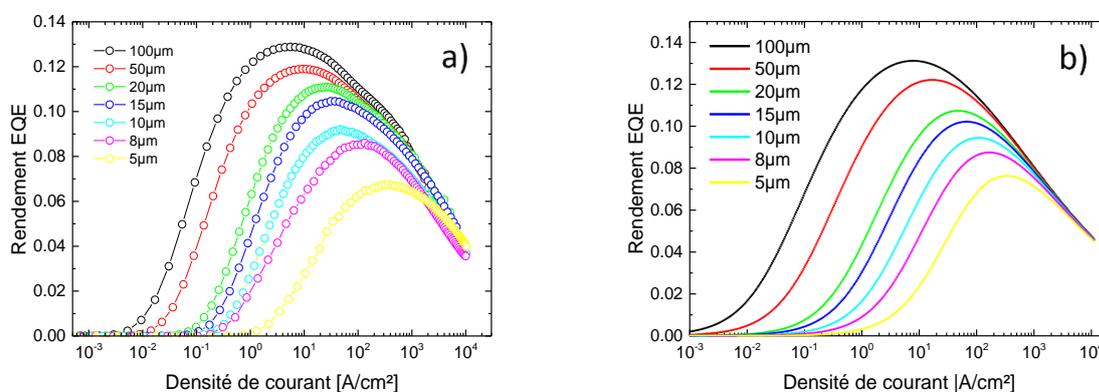


Figure III-26 : rendement EQE a) expérimental et b) obtenu par simulation à partir du modèle ABC modifié [23]

Les courbes de rendements obtenues par simulation sont très proches des courbes expérimentales, montrant la bonne qualité du nouveau modèle proposé pour décrire le rendement de nos LED.

Les coefficients B et C sont ainsi quasi-indépendants de la taille des LED. Ils sont uniquement fonction de la qualité cristalline de l'épitaixie, et de la zone active en particulier. En revanche, le coefficient A dépend de la taille des LED. Ainsi, plus une diode est petite, plus elle présente de centres de recombinaison non-radiatifs de type SRH. La dépendance en P/S de ce coefficient indique un effet périmétrique. C'est ce que nous nous attacherons à étudier dans le paragraphe suivant qui portera sur l'étude des bords de pixel.

III.3.4.b Vers des diodes submicroniques

En conclusion de cette étude, la simulation est étendue à des tailles de diode non-disponibles. L'objectif principal est de simuler en première approximation le rendement de micro-LED inférieure à $5 \times 5 \mu\text{m}^2$. Bien que nous ne disposions pas de diodes permettant d'évaluer la validité du modèle à ces échelles, la simulation doit permettre de donner un premier éclairage sur le rendement de LED de dimension proche voire inférieure à $1 \mu\text{m}$. En effet, certaines applications nécessitent de telles tailles de diodes. Par exemple, des écrans hyper-résolus sont nécessaires pour certaines applications, comme la réalité virtuelle, ou les écrans 3D.

Les courbes ci-dessous présentent le rendement EQE pour des tailles de LED variant de 1 mm à 100 nm.

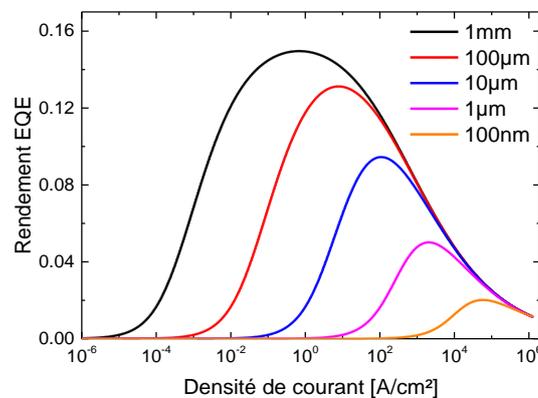


Figure III-27 : rendement EQE simulé pour des diodes de dimension variant de 1 mm à 100 nm

Le rendement maximum atteint par les μLED de dimension inférieure au micron chute rapidement. Le droop limite fortement le rendement que peut atteindre de telles diodes. En l'absence de nouvelles épitaxies présentant un droop plus faible (croissance sur un substrat non-polaire par exemple), et de solutions limitant les recombinaisons SRH en bord de pixels (passivation des flancs), il apparaît que la réalisation de μLED ne se fera qu'au prix d'un rendement faible. Il s'agit donc là de deux axes d'étude fondamentaux pour la réalisation de μLED haute performance.

Précisons enfin que pour des LED de dimension inférieure au micromètre, des effets d'optique ondulatoire seraient probablement à considérer. En effet, pour les diodes testées au cours de cette thèse, la longueur d'onde d'émission (450 nm environ) est toujours inférieure à la dimension des diodes. En revanche, pour des diodes de dimension inférieure au micromètre, cette condition n'est plus valide, et de nouvelles simulations optiques, de type FDTD, seraient certainement à considérer. Ainsi, la courbe de simulation de la LED de 100 nm n'est probablement pas représentative de la réalité.

En résumé de cette étude sur le rendement des LED en fonction de leur taille, le rendement maximal chute fortement pour les diodes micrométriques. L'augmentation des recombinaisons non-radiatives de type SRH à faible densité de courant en est la raison principale. Ces recombinaisons présentent une dépendance périmétrique indiquant que le bord des pixels est un lieu important de recombinaisons non-radiatives. Ce phénomène sera étudié dans la suite de ce chapitre.

D'autre part, il a été montré que le droop est presque indépendant de la taille des diodes. C'est une limite commune, que nous attribuons principalement à la qualité de l'épitaxie. Trois axes de recherche majeurs sont donc à considérer pour la réalisation de micro-LED haute performance.

Le premier concerne la passivation des pixels pour limiter les recombinaisons SRH en bord de pixel, responsables du décalage de seuil optique, et de la chute du rendement EQE maximal.

L'amélioration de l'extraction lumineuse est un point essentiel à optimiser. L'extraction actuelle, estimée à 14%, est la principale limitation du rendement des LED. Une difficulté importante consiste cependant à concilier extraction lumineuse et qualité d'image. Une étude y sera consacrée dans le chapitre 4.

Enfin la diminution, voire la suppression, du droop apparaît comme un élément décisif dans l'optique de la réalisation de micro-LED présentant de forts niveaux de rendement, en particulier pour les applications ultra-haute luminance fonctionnant à des densités de courant élevées.

Ainsi, pour l'application micro-écrans, l'impact de la taille des diodes se verra diversement selon la spécification visée. Pour des applications faible-luminance, l'effet de la taille des diodes est très important. A faible densité de courant, le rendement dépend très fortement de la taille des diodes. Une amélioration du procédé de fabrication permettant une diminution des recombinaisons de type SRH sur les bords des pixels doit permettre d'améliorer le rendement des μ LED.

Pour des applications très haute-luminance, la densité de courant sera très élevée et l'effet de la taille des diodes est faible, voire inexistant. Dans ce cas, le droop limite le rendement des diodes, indépendamment de leur taille. Une optimisation de l'épitaxie permettant de réduire le droop est une voie d'amélioration envisagée.

III.4 Etude des bords de pixel

III.4.1 Etude bibliographique

Nous avons vu dans l'étude précédente que le coefficient A , représentant les recombinaisons non-radiatives de type SRH, présente une dépendance linéaire en fonction du rapport périmètre/surface, indiquant qu'une majorité des recombinaisons non-radiatives a lieu sur les flancs de la LED.

Il est connu que les surfaces latérales perturbent la périodicité du réseau cristallin. Le diagramme de bande est alors modifié et des états électroniques à l'intérieur du gap du semiconducteur apparaissent. Des liaisons pendantes se forment en bord du cristal et peuvent se réarranger pour former des liaisons avec les liaisons voisines. Cette reconstruction de surface peut induire localement une nouvelle structure atomique. Aux interfaces, les porteurs se recombinent rapidement par les états de surface. La concentration de porteurs minoritaires peut alors s'écrire sous la forme [24] :

$$n(x) = n_0 + \Delta n(x) = n_0 + \Delta n_\infty \left(1 - \frac{\tau_n \cdot S \cdot \exp(-\frac{x}{L_n})}{L_n + \tau_n \cdot S} \right) \quad (\text{III.16})$$

Où S est la vitesse de recombinaison de surface. Pour $S \rightarrow 0$, la concentration de porteurs minoritaire est identique à la valeur dans le cristal. En revanche, si $S \rightarrow \infty$, elle tend vers l'équilibre, c'est-à-dire $n(0) \rightarrow n_0$.

Van de Walle et Segev ont étudié en 2007 [25] les états de surfaces des matériaux GaN et InN. Ils montrent une densité d'états non nulle dans la bande interdite du GaN. Les travaux de Himmerlich *et al.* [26] et Kempisty *et al.* [27] aboutissent à des observations similaires. La création de défauts lors de la gravure de GaN fut également analysée. Une baisse du photo-rendement et une augmentation de la barrière Schottky fut observée [28] ainsi que le création de pièges mise en évidence par DLTS [29].

Shul *et al.* [30] ont étudié la dégradation du courant de fuite d'une jonction PN en fonction des conditions de gravure et la corrélation apparente entre la morphologie des flancs de gravure et les courants de fuite.

Les publications étudiant spécifiquement les bords de LED sont peu nombreuses. Nous pouvons citer Otto *et al.* [31], qui ont étudié l'influence de la micro-pixellisation de LED en photoluminescence et électroluminescence (figure III-28). Ils observent une faible influence du procédé de matriçage sur les performances des LED grâce à une bonne passivation des pixels.

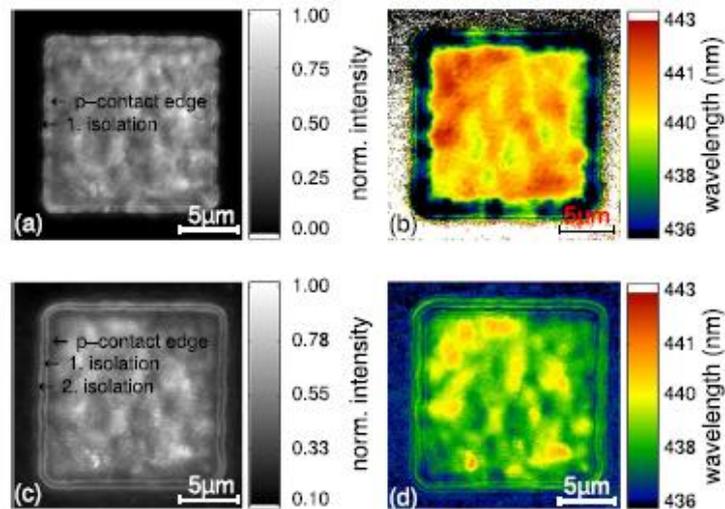


Figure III-28 : cartographie de photoluminescence a) en intensité et b) en longueur d'onde et cartographie d'électroluminescence c) en intensité et d) en longueur d'onde de μ LED [31]

III.4.2 Luminescence en bord de pixel

Dans cette étude, nous souhaitons caractériser l'effet périmétrique sur les performances des LED. Pour cela, les cartographies d'intensité obtenues en micro-photoluminescence et en cathodoluminescence pour des μ LED de 7 μ m sont présentées figure III-29. Les profils d'intensité obtenus le long de la diode sont présentés figure III-30.

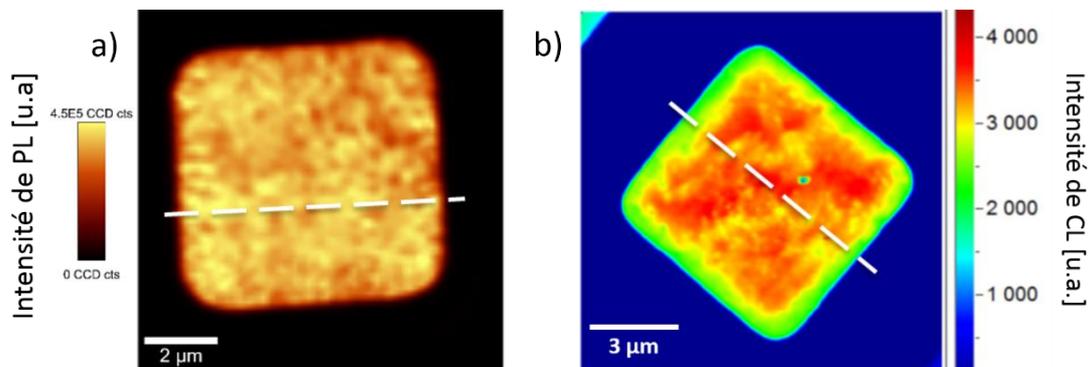


Figure III-29 : cartographie d'intensité a) de photoluminescence et b) de cathodoluminescence d'une micro-LED

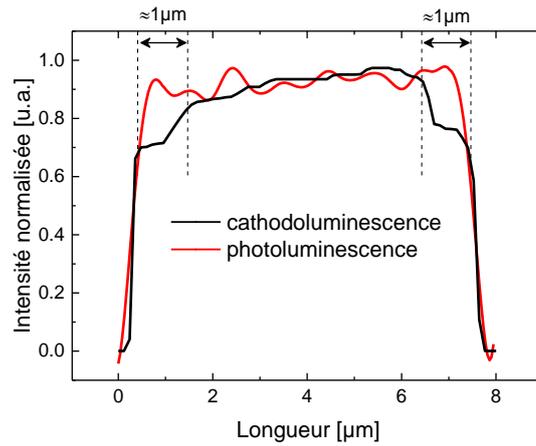


Figure III-30 : comparaison des profils d'intensité obtenus en CL et PL. Les profils sont obtenus suivant les pointillés blancs présentés figure III-29

Les résultats indiquent un effet des bords de pixel, observable en cathodoluminescence uniquement, moins émissifs que la zone centrale. D'après les premiers résultats, la largeur de la zone dégradée est de quelques centaines de nanomètres à un micromètre, suivant les diodes testées.

Des mesures de cathodoluminescence sont réalisées à basse température (8 K) afin d'étudier l'effet des bords lorsque les centres de recombinaison non-radiatifs sont considérés comme gelés et donc inactifs. La comparaison des résultats obtenus à 8 K et 300 K sur une même diode est présentée figure III-31. Les profils sont présentés figure III-32.

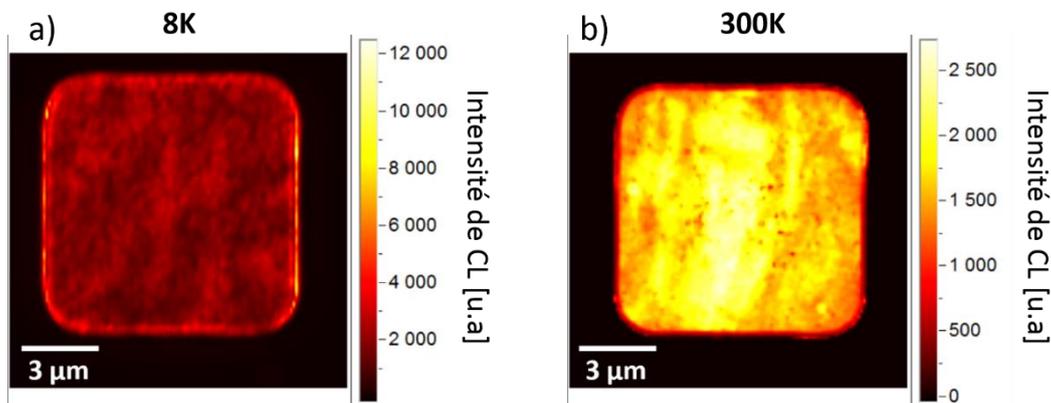


Figure III-31 : cartographie d'intensité de CL sur des diodes de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ a) à 8 K et b) à 300 K

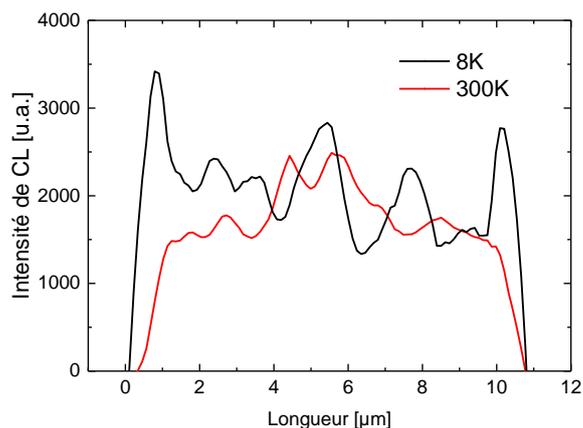


Figure III-32: profil de l'intensité de CL à 8 K et 300 K

La comparaison de l'intensité de CL à 8 K et 300 K montre de nouveau des effets de bords. A 8 K, température pour laquelle les centres de recombinaison non-radiatifs sont considérés gelés, l'intensité est forte sur les bords de pixel, ce que nous attribuons à une injection favorable des électrons par le faisceau d'excitation du MEB. En revanche à 300 K, l'intensité de CL est faible sur les bords de pixel et sur une zone périphérique de plusieurs centaines de nanomètres. La comparaison des deux courbes semble indiquer que les bords du pixel sont optiquement morts à 300 K. Ce résultat tend à montrer que, à 300 K, des recombinaisons non-radiatives ont lieu sur les bords de pixels et limitent l'intensité lumineuse émise par la diode.

Des mesures de photoluminescence à 290 K et à différentes puissances d'excitation du laser sont présentées ci-dessous (figure III-33).

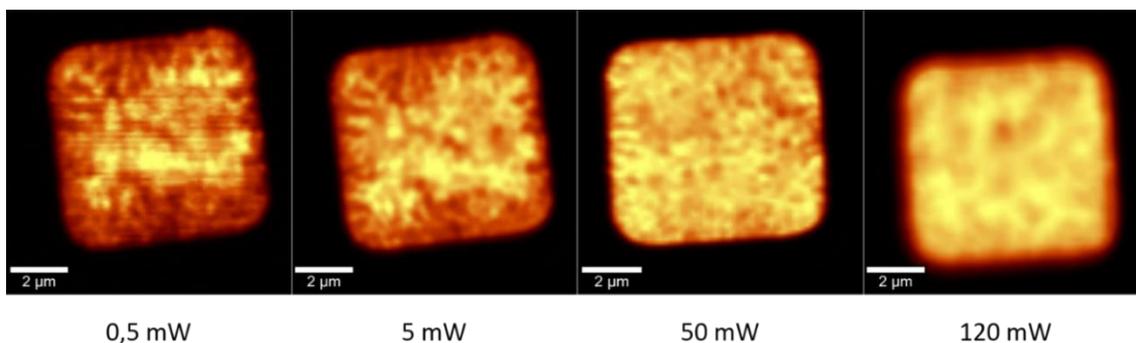


Figure III-33 : cartographie d'intensité de PL pour différentes puissances d'excitation du laser à 290 K

A faible puissance, la LED semble présenter des effets de bords moins émissifs, tandis qu'à 50 mW, l'intensité de PL est homogène sur la surface du pixel. Ces résultats semblent indiquer que les effets de bords sont visibles à faible puissance d'excitation, ce qui équivaut au régime de faible injection électrique dans une LED.

Les résultats conjoints de PL et de CL semblent indiquer que les porteurs (électrons ou photons) injectés en bord de pixel ont une probabilité plus faible d'atteindre les puits quantiques pour former un photon. Ainsi, les mesures de PL et de CL à 8 K montrent que la qualité des puits quantiques n'est pas dégradée, tandis que les résultats de CL à 300 K indiquent que les porteurs injectés près des

bords se recombinent non-radiativement au niveau de flancs du pixel avant d'atteindre les puits quantiques.

La distance dégradée estimée, de l'ordre du micromètre, peut être liée à la longueur de diffusion des porteurs dans le GaN. En effet, les porteurs diffusent et se recombinent non radiativement en bords de pixel avant d'atteindre la région active MQW. Ainsi, plus la diffusion des porteurs est grande, plus le processus de recombinaison non-radiatif sur les bords du pixel est probable. La largeur d'environ 1 μm dégradée est en accord avec les valeurs de longueurs de diffusion dans le GaN rapportées dans la littérature, typiquement comprises entre 100 nm et 1 μm [32] [33] [34] [35].

III.4.3 Estimation de la largeur dégradée par l'étude du rendement

Les études menées semblent indiquer que la baisse du rendement maximum en fonction de la taille des diodes est attribuée à des recombinaisons non-radiatives en bord de pixel. Une zone dégradée, de l'ordre de 1 μm , semble visible en cathodoluminescence. Nous cherchons ici à estimer la largeur de cette zone dégradée à partir des mesures expérimentales du rendement EQE.

Nous appelons L_D la largeur dégradée sur les bords de pixel et définissons alors la surface centrale non-dégradée ($S_{centrale}$) comme la surface totale de la LED (S_{totale}) moins la surface occupée par la largeur dégradée.

Le rendement EQE maximum normalisé est comparé figure III-34 au rapport de la surface centrale non-dégradée sur la surface totale du pixel ($\frac{S_{centrale}}{S_{totale}}$). L'axe de gauche représente le rendement EQE normalisé. L'axe de droite représente le rapport des surfaces, et l'axe des abscisses représente la taille des LED. Trois largeurs dégradées (L_D) sont présentées ici : 0.01 μm , 0.75 μm et 2 μm .

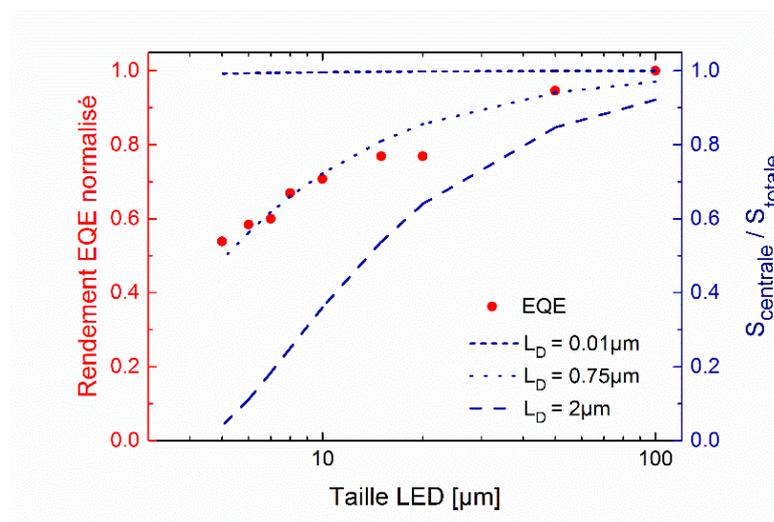


Figure III-34 : estimation de la largeur dégradée par comparaison de la chute du rendement EQE et du rapport de la surface centrale sur la surface totale

La figure III-34 montre qu'un bon ajustement est obtenu pour une largeur dégradée de 0.75 μm . Ce résultat est proche des valeurs observées en cathodoluminescence. Nous pouvons faire l'approximation que nos LED se comportent, du point de vue du rendement, comme si une région

périphérique de 750 nm de largeur est non-émissive. Nous faisons l'hypothèse que les porteurs injectés dans cette zone dégradée se recombinaient non-radiativement sur les bords du pixel avant d'atteindre la région à puits quantiques pour se recombiner radiativement. D'autre part, les courbes présentées figure III-34 donnent une première indication de ce que pourrait être la baisse du rendement si la largeur dégradée était réduite. Des gains importants peuvent être obtenus si la largeur dégradée est réduite.

En conséquence, il est important de comprendre l'origine de cette zone dégradée, pour pouvoir en limiter les effets. Pour cela, des mesures complémentaires sont réalisées, sur différentes épitaxies et avec différents procédés de gravure afin de mettre en évidence une éventuelle variation de la largeur dégradée.

III.4.4 Etudes complémentaires en cathodoluminescence

Nous procédons à des mesures complémentaires afin de comprendre la dégradation observée des bords de pixel. Pour cela, des mesures de cathodoluminescence sont réalisées sur des LED utilisant des épitaxies et des procédés de gravures différents. Nous souhaitons ainsi déterminer les facteurs influant au premier ordre sur la dégradation des bords de pixel et essayer de valider notre hypothèse d'une largeur dégradée qui dépend de la longueur de diffusion des porteurs.

Deux nouvelles épitaxies sont testées. Elles sont appelées épitaxie A et B. Ce sont des épitaxies à base d'InGaN/GaN sur saphir non PSS émettant dans le bleu. D'autre part, différents plasmas de gravure sont étudiés, à profondeur de gravure constante (1 µm). Trois gravures sont testées, dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Type de gravure	Gaz (chimie)	Bias induit au niveau de l'échantillon	Temps de gravure
<i>Inductively coupled plasma</i>	Cl ₂	360 V	2 min
<i>Inductively coupled plasma</i>	Cl ₂	70 V	7 min
<i>Reactive ion etching</i>	SiCl ₄ /Cl ₂	420 V	11 min

Tableau III-1 : présentation des épitaxies et des gravures testées

Des mesures de cathodoluminescence sont réalisées sur ces 6 échantillons. Les cartographies d'intensité d'émission à 440 nm sont présentées figure III-35.

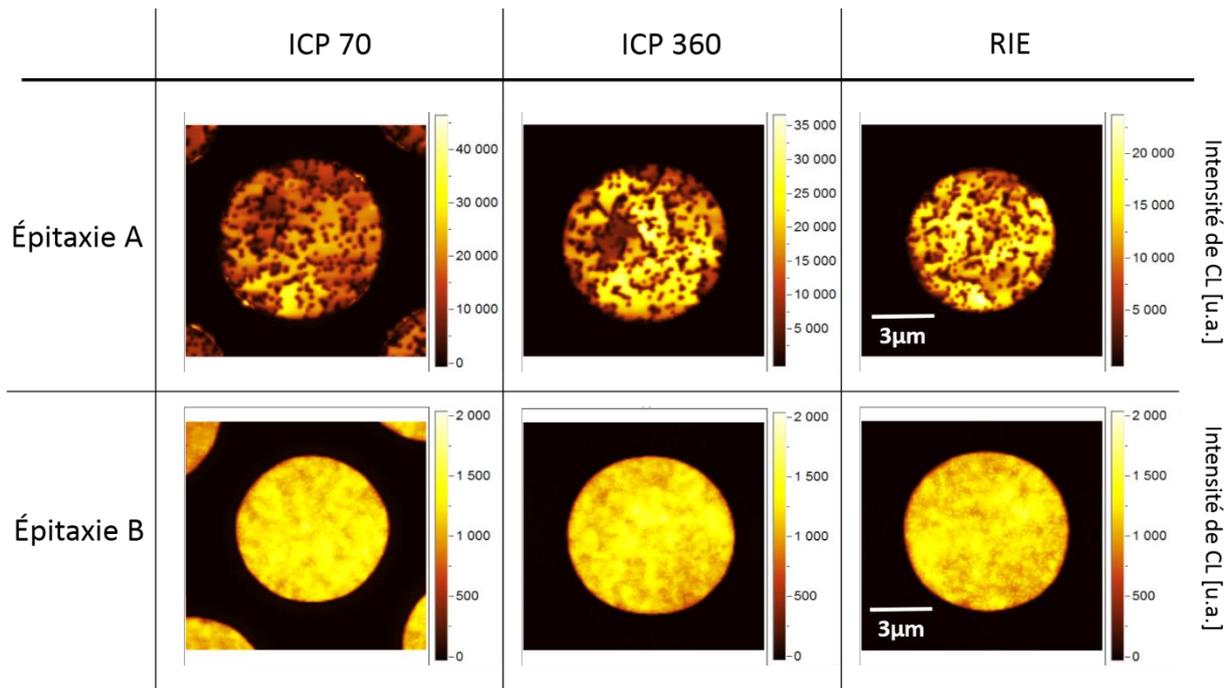


Figure III-35 : cartographie d'intensité de micro-LED de 7 μm de diamètre en cathodoluminescence

Les résultats obtenus varient fortement d'une épitaxie à l'autre. L'épitaxie A présente des points noirs, assimilés à des dislocations, agissant comme des centres de recombinaison non-radiatifs. Il est intéressant de noter qu'il n'y a pas plus de dislocations sur les bords de pixel, indiquant que la gravure ne semble pas créer pas de dislocations supplémentaires en bord de pixel.

D'autre part, l'épitaxie B présente une intensité d'émission homogène. Les différentes gravures ne montrent pas de changements significatifs sur l'intensité de luminescence des diodes. En particulier, l'effet des bords est peu visible ici.

Nous pouvons cependant faire l'observation sur l'épitaxie A gravée en ICP avec 360 V de bias qu'une zone moins intense se forme sur les bords du pixel. De plus, cette zone dégradée semble parfois prendre fin au contact des dislocations (zones mises en évidence par des flèches figure III-36). Cette observation tend à indiquer une corrélation possible entre flancs de gravure, densité de dislocations et longueur de diffusion des porteurs.

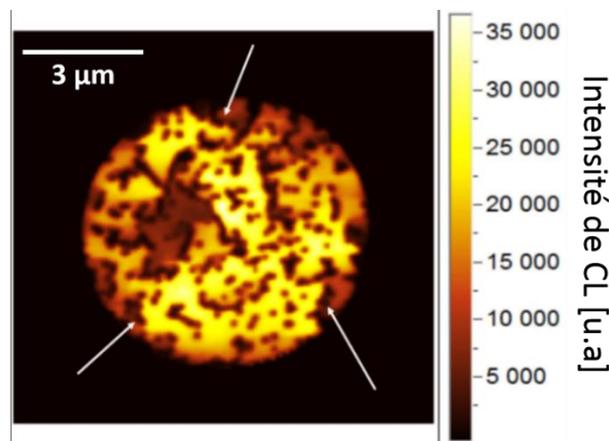


Figure III-36 : effet des dislocations sur l'émission en bord de pixel d'une micro-LED

Cette étude indique que l'épitaxie joue un rôle important sur les résultats de CL. Les différentes gravures testées ne semblent en revanche pas influencer au premier ordre sur les bords de pixel.

III.4.5 Caractérisation IVL de diodes de même surface, au périmètre différent

Dans cette dernière étude sur l'effet des bords de pixel, nous souhaitons apporter une preuve supplémentaire directe que le coefficient A du paramètre ABC dépend du rapport périmètre/surface de la LED. Pour cela, un nouveau type de LED unitaires est fabriqué, présentant une surface constante, et un rapport périmètre/surface différent. Ainsi, deux surfaces de diodes sont réalisées, chacune avec plusieurs formes de diode différentes (carré et rectangulaires). Les dimensions des diodes réalisées sont présentées ci-dessous :

Longueur (μm)	100	200	300	400	20	40	80
Largeur (μm)	100	50	33	25	20	10	5
Surface (μm^2)	10000	10000	10000	10000	400	400	400
P/S (μm^{-1})	0,04	0,05	0,067	0,085	0,2	0,25	0,43

Tableau III-2 : dimension des LED réalisées

La figure III-37 présente les courbes de la densité de courant en fonction de la tension et du rendement EQE en fonction de la densité de courant pour les 4 diodes d'une surface de $10000 \mu\text{m}^2$. Précisons que pour cette expérience une seule diode de chaque dimension est caractérisée. Par conséquent nous n'avons pas de statistique permettant d'évaluer la dispersion sur les mesures.

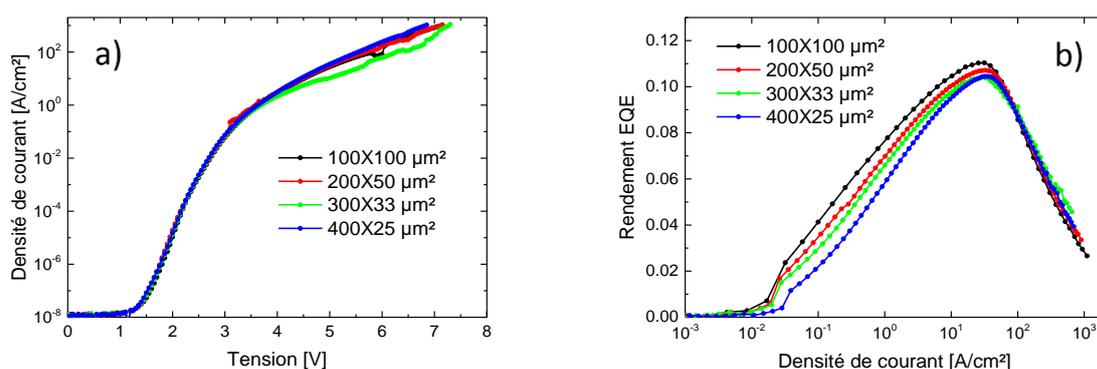


Figure III-37 : caractéristiques a) densité de courant-tension et b) rendement EQE pour quatre diodes de surface identique et de périmètre différent

Les résultats électriques montrent que les courbes se superposent, à l'exception d'une diode qui présente une densité de courant à forte tension. Ce résultat confirme que le périmètre des diodes n'influe pas sur les performances électriques. Nous avons évoqué en début de chapitre l'hypothèse d'une possible augmentation de coefficient d'idéalité avec l'augmentation du rapport P/S (figure III-13). Cet effet ne se confirme pas dans cette étude.

Les courbes de rendement indiquent qu'à faible densité de courant, l'allure du rendement varie en fonction de P/S. Plus le rapport est grand, plus le seuil optique est décalé vers de fortes densités de courant. Dans la région du droop, le rendement est identique pour toutes les tailles, confirmant les résultats obtenus précédemment sur les diodes de différentes surfaces.

Enfin, nous procédons à l'extraction du paramètre A pour les diodes de $10000 \mu\text{m}^2$ et $400 \mu\text{m}^2$ et traçons le résultat obtenu en fonction du rapport P/S (figure III-38). La dispersion est estimée à partir de la dispersion expérimentale obtenue figure III-25. Elle est de 20% et regroupe la dispersion sur le fonctionnement des diodes et sur la méthode d'extraction.

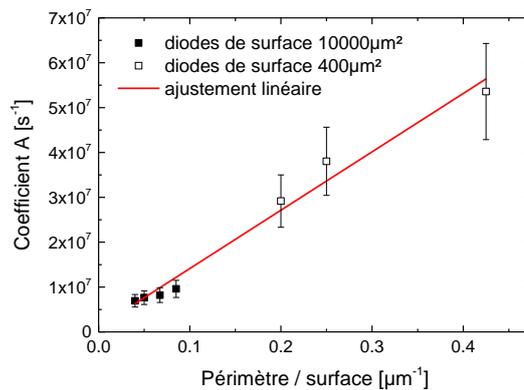


Figure III-38 : coefficient de recombinaison SRH (A) pour les différentes LED testées

L'ajustement linéaire obtenu confirme que le coefficient A dépend de la géométrie de la diode, et en particulier du rapport P/S. Il est donc important de minimiser ce rapport afin d'obtenir des LED performantes. Cet effet est contradictoire avec le besoin de réaliser des micro-LED, pour lesquelles P/S ne peut qu'augmenter avec la miniaturisation du pixel. Il conviendra donc de limiter cet effet dans l'optique de la réalisation de micro-LED performantes.

En l'état actuel du procédé de fabrication, les premières solutions à apporter consistent à optimiser la surface disponible du pixel ($10 \times 10 \mu\text{m}^2$ dans notre cas). C'est-à-dire réaliser des diodes dont la surface est proche de celle du pas de pixellisation, et dont la géométrie minimise le rapport P/S.

D'autre part, une amélioration du procédé de fabrication devrait permettre de limiter l'effet des bords de pixel. La première piste de travail consiste à améliorer la qualité de la gravure et la passivation de la jonction, afin de réduire la probabilité de recombinaison non-radiative en périphérie du pixel.

La seconde piste à étudier consiste à forcer l'injection des porteurs au centre de la LED, de sorte que les porteurs ne puissent pas diffuser jusqu'aux bords. L'utilisation d'un contact P n'occupant pas toute la surface du GaN est la solution la plus simple. Il faut pour cela que la longueur de diffusion des porteurs dans le GaN soit inférieure à la distance entre le bord du contact P et le bord du pixel. Ainsi, les porteurs n'atteignent pas les bords du pixel, et nous faisons l'hypothèse que le coefficient A

restera dans ce cas indépendant de la géométrie du pixel. Cependant, cette solution se traduit par une perte importante de la surface émissive, surtout dans le cas des micro-LED. Afin de limiter la perte de surface active, il est envisageable de modifier les propriétés des bords de la diode, pour empêcher les porteurs d'atteindre les bords de pixel [37].

Ces solutions devraient permettre de limiter le décalage du seuil optique, qui nuit fortement au rendement des LED à faible densité de courant.

En résumé, les études menées montrent un effet important du périmètre des LED qui dégrade fortement les performances des diodes à faible densité de courant via des recombinaisons non-radiatives de type SRH. Des effets de bords ont pu être observés en cathodoluminescence. Les résultats semblent indiquer que la qualité de l'épitaixie, et dans une moindre mesure la gravure utilisée, peuvent influencer sur la largeur de la zone dégradée. Enfin, des mesures IVL sur des LED présentant une surface constante et un rapport périmètre/surface différent ont permis de valider l'effet des bords sur les recombinaisons de type SRH. Il s'agit là d'un axe de recherche essentiel dans l'optique du développement des micro-LED.

III.5 Etude des LED vertes

III.5.1 Introduction

Nous avons traité dans ce manuscrit le cas des LED InGaN/GaN émettant dans le bleu (440nm environ). Il est également possible de réaliser des LED vertes InGaN/GaN en augmentant le taux d'indium. Cependant, il est connu que l'augmentation du taux d'indium entraîne des défauts (dislocations, polarisation, défauts, etc.) qui réduisent le rendement des LED vertes (chapitre 1). S'il est théoriquement possible de réaliser des LED rouges à bases de LED InGaN/GaN, d'autres semi-conducteurs sont en général utilisés pour les longueurs d'onde du jaune au rouge, en général à base de GaAs. On appelle en général 'green gap' cette absence de semi-conducteur performant dans le vert.

Au cours de cette thèse, des LED vertes à base de GaN ont été testées. Pour le cas des applications haute-luminance, le vert est en effet une couleur privilégiée puisque la sensibilité de l'œil est maximale pour cette couleur. En d'autres termes, un watt optique équivaut à plus de lumen vert que de lumen bleu ou rouge. Nous présentons ici les études menées sur des LED vertes, épitaxiées sur du saphir non PSS selon le plan c, par MOCVD. L'épitaxie spécifiée est similaire aux LED bleues (dopage P-GaN et N-GaN, nombre et épaisseur des puits quantiques), seule la concentration d'indium dans les puits augmente. Ces LED ont été réalisées avec le même procédé de fabrication que celui des LED du LOT 3.

III.5.2 Caractérisations I-V-L

Les courbes de densité de courant en fonction de la tension sont présentées figure III-39.a. Les résultats montrent une superposition quasi-idéale des courbes, sauf à forte tension où les diodes de 200 μm et 500 μm présentent une densité de courant légèrement plus faible.

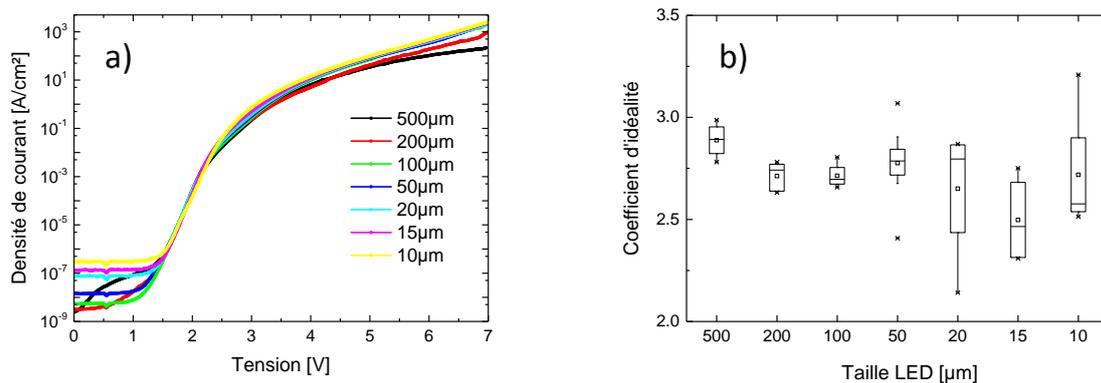


Figure III-39 : caractéristiques a) densité de courant-tension et b) extraction du coefficient d'idéalité pour plusieurs tailles de LED

Contrairement aux LED bleues, le coefficient d'idéalité (figure III-36.b) est quasiment constant selon la taille des LED. La tension de seuil électrique extraite est d'environ 1.8 V, soit environ 0.2 V plus faible que pour les LED bleues.

Les courbes de la puissance optique en fonction de la tension sont présentées figure III-40.a. La tension de seuil optique V_{SO} est plus faible de 0.5 V que pour les LED bleues, passant de 2.5 V à 2.0 V pour la diode de 500x500 μm^2 . En revanche, la variation de la tension de seuil optique en fonction de la taille est similaire aux LED bleues. Elle augmente de 0.5 V entre une diode de 500 μm et 10 μm de côté.

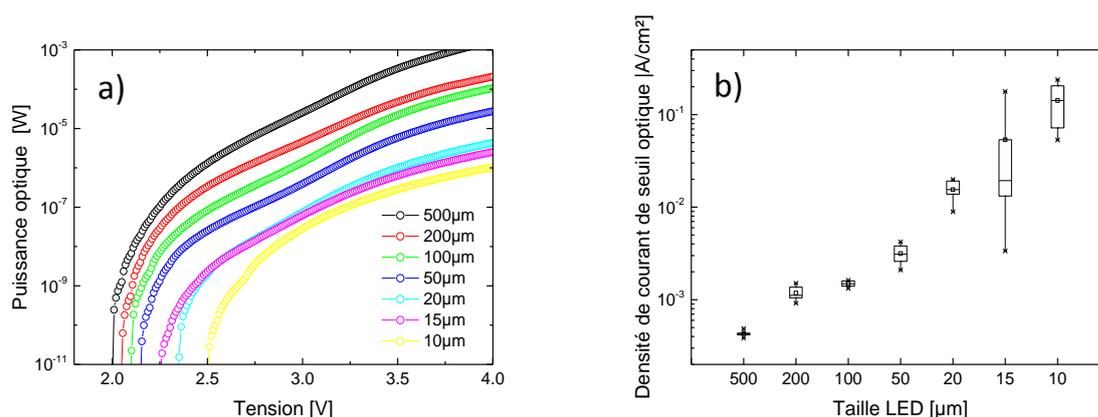


Figure III-40 : a) puissance optique en fonction de la tension et b) densité de courant de seuil optique pour différentes tailles de LED

La densité de courant de seuil optique (J_{SO}) est présentée figure III-40.b. La variation obtenue, de 5.10^{-4} A/cm² à 2.10^{-1} A/cm² est similaire à celle des LED bleues (figure III-15.b).

En résumé, les LED vertes, comme les LED bleues, présentent une forte variation du seuil optique avec la diminution de la taille des diodes. La tension de seuil optique augmente de 0.5 V et la densité de courant de seuil optique augmente de trois décades. D'autre part, les LED vertes présentent, pour une taille donnée, un seuil optique plus faible que les LED bleues.

Le rendement EQE des LED vertes est présenté figure III-41. Plusieurs différences par rapport aux LED bleues sont observées. Tout d'abord leur rendement maximum est plus faible. Les deux facteurs généralement évoqués pour expliquer cette observation sont la détérioration de la qualité cristalline due à la différence de paramètres de maille entre GaN et InGaN et la diminution du recouvrement de la fonction d'onde de l'électron et du trou liée à un champ de polarisation plus élevé [38] à cause de la concentration d'indium plus importante.

De plus, le droop apparaît toujours comme une limite commune à toutes les tailles de diode, mais il est plus marqué pour les LED vertes. D'autre part, il est intéressant de remarquer que la baisse du rendement maximum en fonction de la taille est moins importante que pour les LED bleues, et la densité de courant J_{max} est indépendante de la taille des LED (figures III-41.b et c).

Ainsi, l'effet de la taille des diodes sur leur rendement est moins prononcé pour les LED vertes.

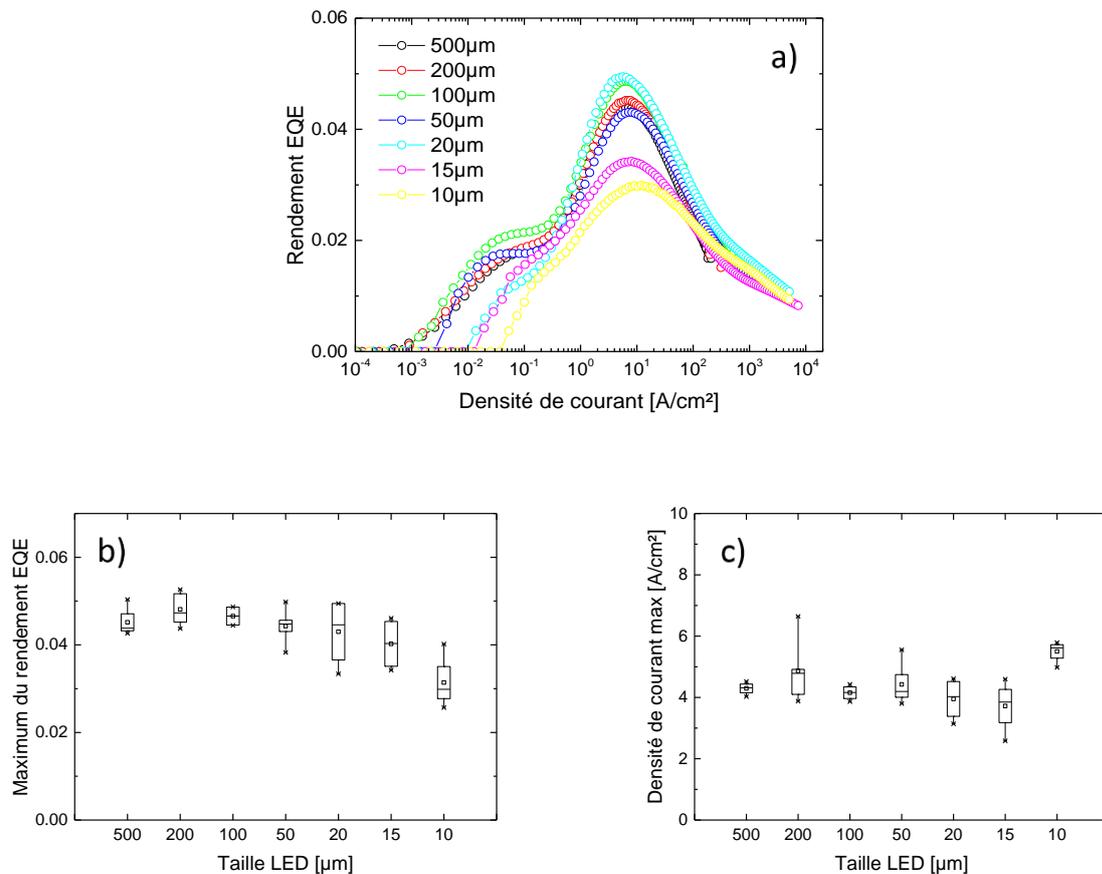


Figure III-41 : a) rendement EQE en fonction de la densité de courant et de la taille des LED, b) extraction du rendement maximum et c) de la densité de courant associée pour différentes tailles de LED

Enfin, l'allure de la courbe du rendement semble montrer deux domaines, en particulier à faible densité de courant. Les courbes EQE pour plusieurs diodes de dimensions $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ sont présentées figure III-42. Deux régimes sont clairement observables à faible densité de courant. Le rendement apparaît à $5 \cdot 10^{-3}$ A/cm² puis augmente jusque $2 \cdot 10^{-2}$ A/cm². Ensuite, le rendement sature sur une décade, avant d'augmenter fortement de nouveau, jusqu'à atteindre un maximum à 4 A/cm².

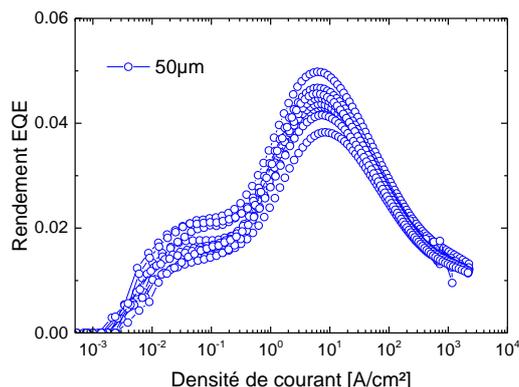


Figure III-42 : rendement EQE de LED vertes de dimension $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ présentant deux domaines à faible densité de courant

Nous n'avons pas trouvé mention de ce phénomène dans la littérature scientifique permettant d'expliquer cette observation. Nous faisons ici l'hypothèse d'un remplissage des niveaux d'énergie dans les puits quantiques. La première saturation correspondrait à la saturation du premier niveau. Le rendement augmente ensuite car un deuxième niveau est peuplé. Des études complémentaires sont en cours pour comprendre ce résultat.

III.5.3 Etude des bords

Les bords de pixel des LED vertes sont à présent étudiés. La figure III-43 présente la cartographie de μPL réalisée sur des micro-LED vertes de $7 \mu\text{m}$ de côté à un pas de $10 \mu\text{m}$.

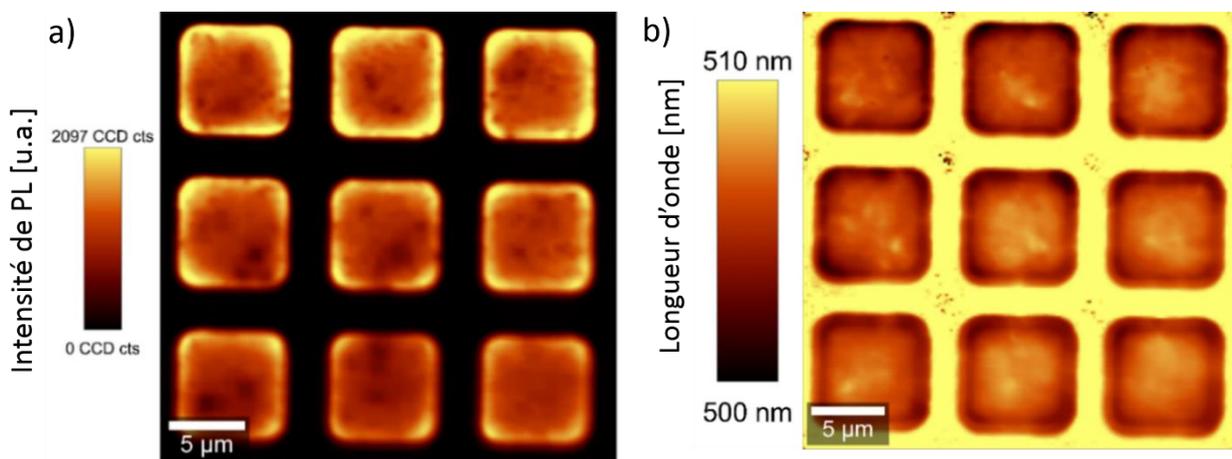


Figure III-43 : cartographie a) d'intensité de PL et b) de longueur d'émission

Contrairement aux LED bleues, l'intensité d'émission de PL est plus élevée sur les bords de LED. D'autre part, la longueur d'onde d'émission y est légèrement plus faible. La corrélation apparente entre intensité et longueur d'onde d'émission tend à indiquer que, dans les LED vertes, l'effet Starck confiné quantique (QCSE) est moins important sur les bords de pixel.

En effet, une relaxation des contraintes sur les bords de pixels peut entraîner une baisse de la polarisation spontanée dans les puits en ainsi diminuer la courbure des bandes responsables du faible recouvrement de la fonction d'onde de l'électron et du trou. Ainsi, en relaxant les contraintes, l'énergie d'émission $h\nu$ augmente légèrement, le recouvrement des fonctions d'onde augmente et l'émission de photons est donc favorisée (schéma figure III-44) [39]. Une observation similaire en cathodoluminescence sur des micro-LED vertes est rapportée dans la littérature scientifique [40].

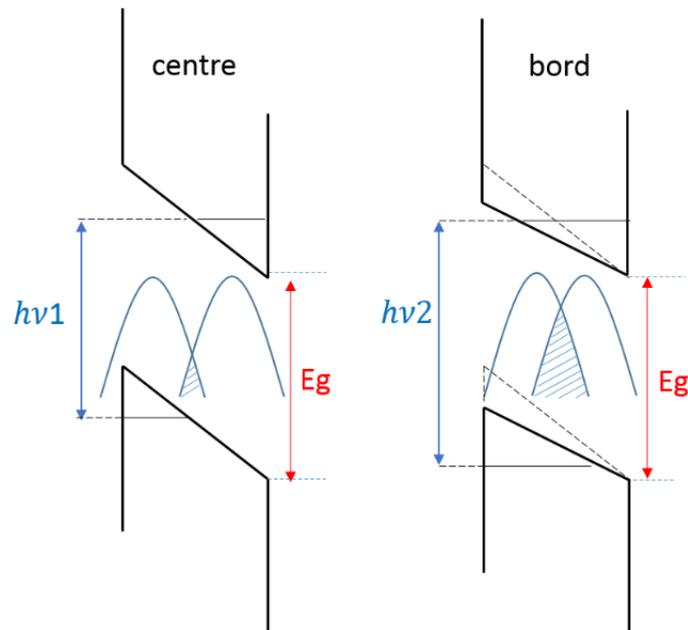


Figure III-44 : représentation schématique des bandes d'énergie en centre et bord de pixel. La relaxation des contraintes en bord de pixel entraîne $h\nu_2 > h\nu_1$ et un meilleur recouvrement des fonctions d'onde

Cette observation peut expliquer en partie la raison de la faible chute du rendement EQE des LED vertes. Les effets de recombinaisons non-radiatives SRH sur les bords sont compensés par une diminution de l'effet QCSE et ainsi une probabilité de recombinaison radiative augmentée. Ces premières observations demandent à être confirmées par une investigation plus approfondie des LED vertes.

III.5.4 Homogénéité d'émission

Dans cette dernière étude sur les LED vertes, l'homogénéité d'émission de LED vertes à différentes densités de courant est étudiée. Les résultats obtenus pour une LED de dimension $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ sont présentés ci-dessous (figure III-45). Rappelons que les photographies sont réalisées avec des temps d'intégration très différents, les intensités observées sont donc relatives.

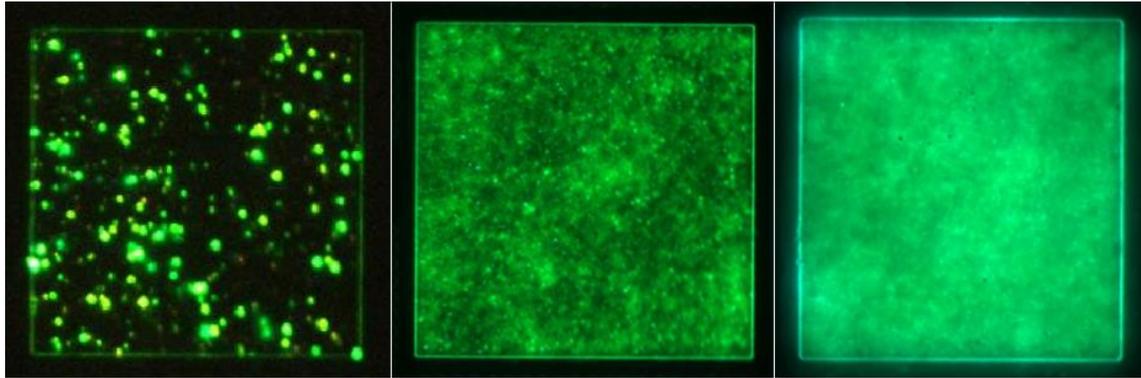


Figure III-45 : homogénéité d'émission d'une LED verte 100X100 μm^2 à 2.2 V, 3.5 V et 4.5 V

Pour de faibles tensions, proches du seuil optique, l'émission est très inhomogène à l'échelle de la LED. Des points lumineux apparaissent, que nous attribuons à une inhomogénéité de l'incorporation d'indium dans les puits quantiques. Dans le cas de micro-LED de quelques micromètres de diamètre, cette inhomogénéité peut induire une forte dispersion d'un pixel à l'autre.

Lorsque la tension augmente, l'émission devient plus homogène et la longueur d'onde d'émission change et tend légèrement vers le cyan.

Cet effet est d'autant plus visible dans nos micro-LED. En effet, nous avons vu auparavant que les micro-LED peuvent fonctionner à des densités de courant très élevées. Les photographies optiques d'une μLED (6 μm de diamètre) à densité de courant croissante sont présentées ci-dessous. Une très forte variation de la longueur d'onde d'émission est observée, du vert au bleu.

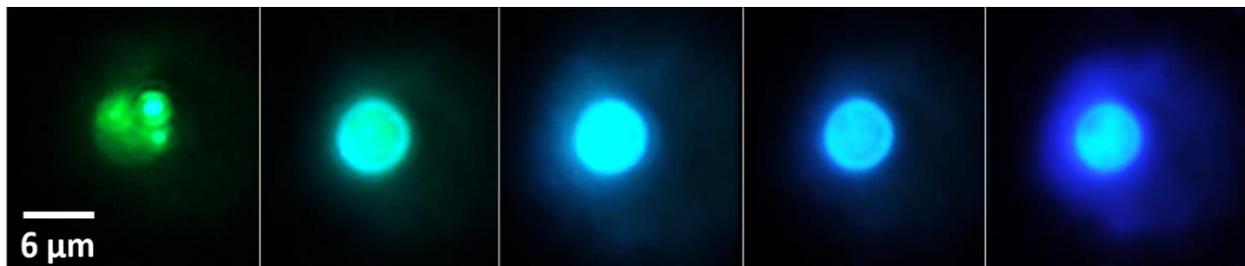


Figure III-46 : émission d'une μLED verte (6 μm) à densité de courant croissante

Afin de caractériser ce décalage en longueur d'onde, généralement appelé *blue-shift*, la longueur d'onde mesurée pour différentes tensions, de 2.5 V à 7.5 V, est reportée sur le digramme CIE (figure III-47). Chaque point de mesure représente une variation de 0.1 V. La longueur d'onde émise couvre une grande partie du diagramme CIE, du vert (540 nm) au bleu profond (475 nm).

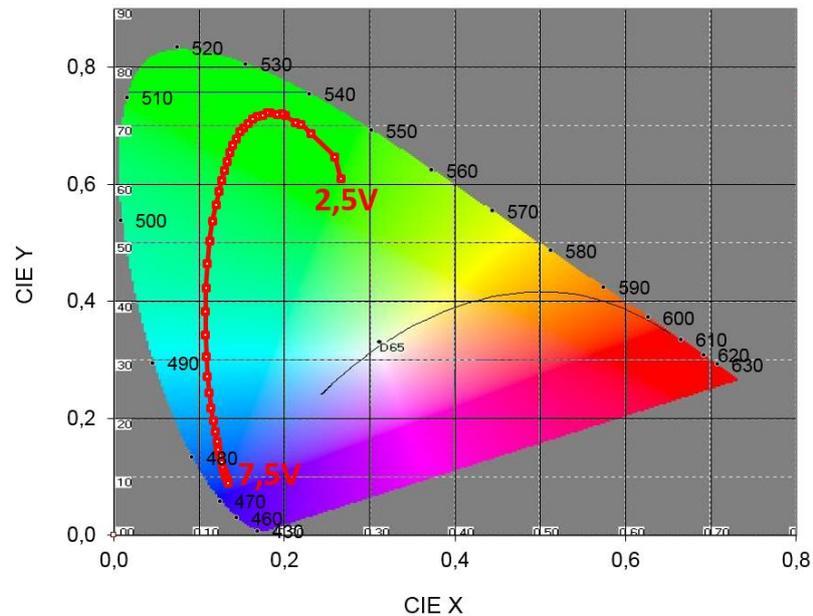


Figure III-47 : diagramme CIE montrant l'évolution de la longueur d'onde d'émission d'une micro-LED, du vert au bleu

Cette forte variation de la longueur d'émission est principalement attribuée à l'effet Starck confiné quantique (QCSE). Cet effet est dû à la présence d'un champ électrique interne dans les puits quantiques. Nous avons vu au chapitre 1 les deux sources de polarisation, la polarisation spontanée et la polarisation piézo-électrique. La polarisation piézo-électrique dépend de la contrainte que subit le matériau, liée à la différence de paramètre de maille. Puisque les LED vertes contiennent un taux d'indium plus important, la différence de paramètre de maille avec le GaN augmente, la contrainte est plus forte et la polarisation piézo-électrique est plus forte que dans les LED bleues. L'effet QCSE est donc plus prononcé dans les LED vertes que les LED bleues, et les bandes d'énergies sont plus inclinées dans les puits quantiques.

Lorsque la densité de courant augmente, le champ électrique à l'intérieur du puit est écranté, et la courbure des bandes diminue [41]. En conséquence, l'énergie du gap augmente et l'émission tend vers le bleu (effet analogue à celui présenté figure III-44). Une deuxième explication possible consiste à attribuer l'augmentation de l'énergie au remplissage des niveaux d'énergie dans les puits à forte densité de courant. Les niveaux de plus basse énergie saturent et l'émission tend vers des énergies plus élevées. La conséquence de ce remplissage des niveaux d'énergie est un décalage de l'émission vers le bleu. Les deux phénomènes sont probablement en jeu dans le cas des micro-LED [42].

Le spectre d'émission à différentes tensions présentée figure III-48 montre quatre pics qui peuvent correspondre aux niveaux d'énergie dans les puits quantiques. Le premier pic à faible tension est à 520 nm et correspond à la transition fondamentale dans le puits. Ensuite différents pics apparaissent, à 510 nm, 480 nm et 460 nm. Cette observation semble valider l'hypothèse d'un remplissage des niveaux d'énergie dans les puits quantiques.

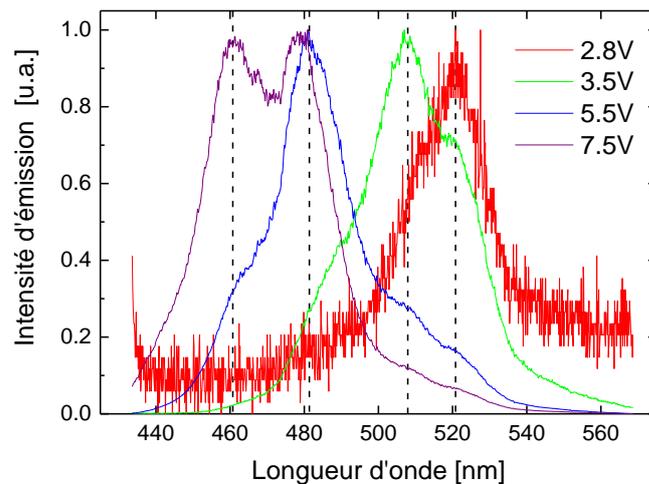


Figure III-48 : intensité d'émission d'une μ LED verte à différentes tensions

Dans l'optique de la réalisation de micro-écrans vert haute luminance, fonctionnant à forte densité de courant, cet effet est néfaste puisque la longueur d'onde d'émission tend vers le bleu. En l'état actuel des épitaxies vertes, il apparaît donc difficile de réaliser des μ LED haute luminance émettant dans le vert. Des épitaxies semi-polaires ou non-polaires devraient permettre de réduire ce phénomène en supprimant le champ électrique dans les puits quantiques dû à la polarisation piézo-électrique [43].

Les LED vertes présentent ainsi de nombreuses différences avec les LED bleues. Électriquement, leur tension de seuil plus faible est favorable pour des applications nécessitant de faibles niveaux de tension. En revanche, le rendement des LED vertes est inférieur à celui des LED bleues, et l'homogénéité d'émission semble moins bonne. Enfin, puisque l'œil humain est plus sensible au vert, ces LED semblaient plus adaptées aux applications haute luminance, mais nous avons vu que le *blue-shift* empêche la réalisation de micro-LED haute-luminance émettant dans le vert à forte densité de courant.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre consacré à l'étude des effets de la taille des LED sur leurs performances, des résultats importants dans l'optique de la réalisation de micro-LED ont été mis en évidence. Tout d'abord, les caractérisations I-V-L ont permis d'identifier les paramètres qui dépendent de la taille des LED. Ainsi, les caractéristiques électriques sont très proches, tandis qu'optiquement les effets de la taille des diodes sont importants. En particulier, le seuil optique varie fortement avec la taille des LED. La densité de courant de seuil optique varie sur plusieurs décades, et entraîne une augmentation significative de la tension de seuil optique des micro-LED.

Le rendement EQE dépend fortement de la taille et deux phénomènes sont à considérer. Le premier est à faible densité de courant. Le rendement η dépend très fortement de la taille des LED. Plus une diode est petite, plus la courbe du rendement est décalée vers les hautes densités de courant. Le second est à forte densité de courant. Dans cette région, la chute du rendement, appelée droop, est indépendante de la taille des LED. En conséquence de ces deux phénomènes, plus une diode est petite et plus son rendement maximal est faible, et obtenu à une densité de courant élevée.

L'extraction des paramètres du modèle ABC a permis de montrer que le coefficient C , représentant les recombinaisons non-radiatives Auger est indépendant de la taille des LED. En revanche, le coefficient A , représentant les recombinaisons non-radiatives de type SRH dépend fortement de la taille, avec une dépendance linéaire au rapport périmètre/surface de la LED. Nous proposons une modification du modèle ABC pour prendre en compte la taille de la diode.

$$IQE = \frac{B \cdot n^2}{A \cdot \frac{P}{S} \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3} \quad (\text{III.17})$$

L'utilisation de cette nouvelle équation nous a permis de simuler le rendement de diodes de dimension inférieure à 5 μm . L'étude des effets périmétriques apparaissant comme problématique majeure du rendement des μLED , une étude des bords de pixels a ensuite été réalisée. Les mesures de cathodoluminescence montrent une zone dégradée de quelques centaines de nanomètres. Les études réalisées sur différentes épitaxies et différentes gravures du GaN semblent montrer que la qualité de l'épithaxie joue un rôle important sur cette largeur dégradée, et que les procédés de gravure étudiés ne montrent pas de différences notables.

Trois axes d'étude majeurs sont identifiés et permettront d'améliorer fortement le rendement des micro-LED. Le premier est l'optimisation de l'extraction lumineuse. C'est aujourd'hui le principal frein au rendement des micro-LED. Le deuxième est la suppression du droop en travaillant sur de nouvelles épitaxies sur plans de croissance non-polaires par exemple. Le dernier porte sur la réduction des effets de bords. Une optimisation du procédé de fabrication (gravure du GaN, passivation de la jonction), ou un contrôle sur l'injection électrique (dimension du contact P, structures confinant les porteurs au centre de la LED) sont autant de pistes à explorer.

Enfin, le cas des LED vertes a été présenté. Des différences importantes ont été observées par rapport aux LED bleues. La baisse du rendement suivant la taille des LED est moins marquée, et la densité de courant au maximum du rendement est similaire pour toutes les tailles de diode. D'autre part, les bords de pixel présentent une émission plus forte, et l'hypothèse d'une relaxation des

contraintes diminuant les effets de polarisation dans les puits quantiques est avancée. Enfin, le *blue-shift* est un phénomène important à prendre en compte. A densité de courant croissante, l'émission tend vers le bleu. Ce phénomène est important à étudier dans le cadre des micro-écrans haute luminance puisque ces écrans imposent de fonctionner à forte densité de courant. Il semble difficile, en l'état actuel des épitaxies vertes commerciales, de réaliser des micro-LED très haute luminance émettant dans le vert.

Ces résultats sont à mettre en perspectives avec les objectifs de la thèse. En effet, l'objectif principal de la thèse est de comprendre les spécificités de LED pour application à des micro-écrans, c'est-à-dire des LED de petite taille, très nombreuses, très proches les unes des autres, et permettant la formation d'image.

Nous avons présenté au chapitre 2 l'importance du procédé de fabrication et les conséquences sur le rendement EQE. Le chapitre 3 a mis en évidence l'effet de la taille des LED sur leurs performances électro-optiques. Nous souhaitons maintenant étudier les LED en tant que pixels, dans un réseau permettant la formation d'images. En effet, nous avons étudié jusqu'à présent la LED en tant que diode unitaire. Or, c'est un réseau composé de centaines de milliers de LED qu'il faut considérer dans le cadre de l'étude d'écrans LED. C'est ce que nous allons développer dans le chapitre 4 qui présentera les effets d'inhomogénéité et de qualité d'image, ainsi que les caractéristiques des micro-écrans LED réalisés au cours de cette thèse.

III.7 Références

- [1] S. X. Jin, J. Li, J. Z. Li, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, "GaN microdisk light emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 5, p. 631, 2000.
- [2] L. Dai, B. Zhang, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, "Comparison of optical transitions in InGaN quantum well structures and microdisks," *J. Appl. Phys.*, vol. 89, no. 9, pp. 4951–4954, May 2001.
- [3] H. W. Choi, C. W. Jeon, M. D. Dawson, P. R. Edwards, R. W. Martin, and S. Tripathy, "Mechanism of enhanced light output efficiency in InGaN-based microlight emitting diodes," *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 10, pp. 5978–5982, May 2003.
- [4] C. W. Jeon, H. W. Choi, and M. D. Dawson, "Fabrication of matrix-addressable InGaN-based microdisplays of high array density," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 15, no. 11, pp. 1516–1518, Nov. 2003.
- [5] Z. Gong *et al.*, "Size-dependent light output, spectral shift, and self-heating of 400 nm InGaN light-emitting diodes," *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 1, p. 013103, Jan. 2010.
- [6] P. Tian *et al.*, "Size-dependent efficiency and efficiency droop of blue InGaN micro-light emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 23, p. 231110, Dec. 2012.
- [7] Y. B. Tao *et al.*, "Size effect on efficiency droop of blue light emitting diode," *Phys. Status Solidi C*, vol. 9, no. 3–4, pp. 616–619, Mar. 2012.
- [8] Q. Q. Jiao *et al.*, "Capability of GaN based micro-light emitting diodes operated at an injection level of kA/cm^2 ," *Opt. Express*, vol. 23, no. 13, pp. 16565–16574, Jun. 2015.
- [9] P. Tian, A. Althumali, E. Gu, I. M. Watson, M. D. Dawson, and R. Liu, "Aging characteristics of blue InGaN micro-light emitting diodes at an extremely high current density of 3.5 kA cm^{-2} ," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 4, p. 045005, 2016.
- [10] D. Hwang, A. Mughal, C. D. Pynn, S. Nakamura, and S. P. DenBaars, "Sustained high external quantum efficiency in ultrasmall blue III-nitride micro-LEDs," *Appl. Phys. Express*, vol. 10, no. 3, p. 032101, Feb. 2017.
- [11] L.-B. Chang, C.-C. Shiue, and M.-J. Jeng, "Formation process of high reflective Ni/Ag/Au Ohmic contact for GaN flip-chip light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 16, p. 163515, Apr. 2007.
- [12] L.-B. Chang, C.-C. Shiue, and M.-J. Jeng, "High reflective p-GaN/Ni/Ag/Ti/Au Ohmic contacts for flip-chip light-emitting diode (FCLED) applications," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, no. 12, pp. 6155–6158, Apr. 2009.
- [13] D. Zhu *et al.*, "The origin of the high diode-ideality factors in GaInN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 8, p. 081113, Feb. 2009.
- [14] H. Masui, "Diode ideality factor in modern light-emitting diodes," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 7, p. 075011, 2011.
- [15] A. David, C. A. Hurni, N. G. Young, and M. D. Craven, "Electrical properties of III-Nitride LEDs: Recombination-based injection model and theoretical limits to electrical efficiency and electroluminescent cooling," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, no. 8, p. 083501, Aug. 2016.
- [16] J. Herrnsdorf *et al.*, "Active-Matrix GaN Micro Light-Emitting Diode Display With Unprecedented Brightness," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 62, no. 6, pp. 1918–1925, Jun. 2015.
- [17] F. Olivier, S. Tirano, L. Dupré, B. Aventurier, C. Langeron, and F. Templier, "Influence of size-reduction on the performances of GaN-based micro-LEDs for display application," *J. Lumin.*, vol. 191, pp. 112–116, Nov. 2017.
- [18] A. David and M. J. Grundmann, "Droop in InGaN light-emitting diodes: A differential carrier lifetime analysis," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 10, p. 103504, 2010.
- [19] F. Olivier, A. Daami, C. Licitra, and F. Templier, "Shockley-Read-Hall and Auger non-radiative recombination in GaN based LEDs: A size effect study," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, no. 2, p. 022104, Jul. 2017.
- [20] G.-B. Lin, D. Meygaard, J. Cho, E. F. Schubert, H. Shim, and C. Sone, "Analytic model for the efficiency droop in semiconductors with asymmetric carrier-transport properties based on drift-

- induced reduction of injection efficiency,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 16, p. 161106, Apr. 2012.
- [21] T. H. Ngo, B. Gil, P. Valvin, B. Damilano, K. Lekhal, and P. D. Mierry, “Auger effect in yellow light emitters based on InGaN–AlGaIn–GaN quantum wells,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 5S, p. 05FG10, Apr. 2016.
- [22] X. Meng *et al.*, “Study on efficiency droop in InGaIn/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 1, p. 013501, Jan. 2016.
- [23] F. Olivier, “Investigation and improvement of 10 μ m pixel-pitch GaN-based LED arrays,” presented at the Display Week SID 2017, Los Angeles, mai-2017.
- [24] E. F. Schubert, *Light-emitting diodes*, 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2006.
- [25] C. G. Van de Walle and D. Segev, “Microscopic origins of surface states on nitride surfaces,” *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 8, p. 081704, Apr. 2007.
- [26] M. Himmerlich, L. Lymperakis, R. Gutt, P. Lorenz, J. Neugebauer, and S. Krischok, “GaN(0001) surface states: Experimental and theoretical fingerprints to identify surface reconstructions,” *Phys. Rev. B*, vol. 88, no. 12, Sep. 2013.
- [27] P. Kempisty and S. Krukowski, “On the nature of Surface States Stark Effect at clean GaN(0001) surface,” *J. Appl. Phys.*, vol. 112, no. 11, p. 113704, Dec. 2012.
- [28] A. Terano, H. Imadate, and K. Shiojima, “Mapping etching induced damages on GaN surfaces using scanning internal photoemission microscopy,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 70, no. Supplement C, pp. 92–98, Nov. 2017.
- [29] K. J. Choi, H. W. Jang, and J.-L. Lee, “Observation of inductively coupled-plasma-induced damage on n-type GaN using deep-level transient spectroscopy,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 8, pp. 1233–1235, Feb. 2003.
- [30] R. J. Shul *et al.*, “Inductively coupled plasma-induced etch damage of GaN p-n junctions,” *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*, vol. 18, no. 4, pp. 1139–1143, Jul. 2000.
- [31] I. Otto *et al.*, “Micro-pixel light emitting diodes: Impact of the chip process on microscopic electro- and photoluminescence,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 15, p. 151108, Apr. 2015.
- [32] S. Hafiz *et al.*, “Determination of carrier diffusion length in GaN,” *J. Appl. Phys.*, vol. 117, no. 1, p. 013106, Jan. 2015.
- [33] K. Kumakura, T. Makimoto, N. Kobayashi, T. Hashizume, T. Fukui, and H. Hasegawa, “Minority carrier diffusion length in GaN: Dislocation density and doping concentration dependence,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 5, p. 052105, Jan. 2005.
- [34] J. Y. Duboz *et al.*, “Diffusion length of photoexcited carriers in GaN,” *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 50, no. 1, pp. 289–295, Dec. 1997.
- [35] E. B. Yakimov, “Diffusion length measurements in GaN,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 5S, p. 05FH04, Apr. 2016.
- [36] E. B. Yakimov, “What is the real value of diffusion length in GaN?,” *J. Alloys Compd.*, vol. 627, pp. 344–351, Apr. 2015.
- [37] D. P. Bour, K. McGroddy, D. A. Haeger, J. M. Perkins, A. Chakraborty, and J.-J. P. Drolet, “Led structures for reduced non-radiative sidewall recombination,” US20160197232 A1, 07-Jul-2016.
- [38] Y. Jiang *et al.*, “Realization of high-luminous-efficiency InGaIn light-emitting diodes in the ‘green gap’ range,” *Sci. Rep.*, vol. 5, Jun. 2015.
- [39] J. H. Ryou *et al.*, “Control of Quantum-Confined Stark Effect in InGaIn-Based Quantum Wells,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 15, no. 4, pp. 1080–1091, Jul. 2009.
- [40] E. Y. Xie *et al.*, “Strain relaxation in InGaIn/GaN micro-pillars evidenced by high resolution cathodoluminescence hyperspectral imaging,” *J. Appl. Phys.*, vol. 112, no. 1, p. 013107, Jul. 2012.
- [41] V. Fiorentini, F. Bernardini, F. Della Sala, A. Di Carlo, and P. Lugli, “Effects of macroscopic polarization in III-V nitride multiple quantum wells,” *Phys. Rev. B*, vol. 60, no. 12, pp. 8849–8858, Sep. 1999.

- [42] S. Zhang *et al.*, “CMOS-Controlled Color-Tunable Smart Display,” *IEEE Photonics J.*, vol. 4, no. 5, pp. 1639–1646, Oct. 2012.
- [43] C. X. Ren, “Polarisation fields in III-nitrides: effects and control,” *Mater. Sci. Technol.*, pp. 1–16, Mar. 2016.
- [44] “Polarisation fields in III-nitrides: effects and control: Materials Science and Technology: Vol 32, No5.” [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/1743284715Y.0000000103>.

Chapitre IV

Etude de micro-LED en matrice
permettant la formation d'images

du pixel à l'écran

IV	Etude de micro-LED en matrice permettant la formation d'images	141
IV.1	INTRODUCTION	143
IV.2	CARACTERISATIONS DE MICRO-LED EN MATRICE.....	143
IV.2.1	<i>Comparaison de micro-LED unitaires et matricées.....</i>	<i>143</i>
IV.2.2	<i>Dispersion à l'échelle de l'écran</i>	<i>146</i>
IV.2.2.a	Dispersion électrique	146
IV.2.2.b	Dispersion optique.....	148
IV.2.3	<i>Dispersion à l'échelle de l'épitaxie.....</i>	<i>151</i>
IV.3	ETUDE DE LA DIAPHOTIE	153
IV.3.1	<i>Définition et présentation.....</i>	<i>153</i>
IV.3.2	<i>Simulations optiques</i>	<i>153</i>
IV.3.2.a	Etude des substrats PSS et de la texturation de surface.....	153
IV.3.2.b	Etude de la pixellisation	155
IV.3.3	<i>Modification du procédé de fabrication</i>	<i>158</i>
IV.3.4	<i>Caractérisations électro-optiques.....</i>	<i>159</i>
IV.3.4.a	Gain obtenu sur le cross-talk	159
IV.3.4.b	Impact sur les caractéristiques courant-tension	159
IV.4	ETUDES ET CARACTERISATIONS DE MICRO-ECRANS LED	163
IV.4.1	<i>Réalisation et fonctionnement de micro-écrans à matrice active</i>	<i>163</i>
IV.4.2	<i>Performances des micro-écrans LED</i>	<i>164</i>
IV.4.2.a	Indicatrice en intensité	164
IV.4.2.b	Luminance de l'écran : moyenne, dispersion et taux de fonctionnement.....	165
IV.4.2.c	Comparaison de matrices de LED bleues et vertes	167
IV.4.2.d	Résolution et qualité d'image	169
IV.5	CONCLUSION	171
IV.6	REFERENCES	172

IV.1 Introduction

Nous avons vu au chapitre 1 qu'un écran est constitué d'une couche électro-optique et d'un circuit électronique d'adressage. La couche électro-optique est constituée d'un grand nombre de pixels, déterminant la définition de l'image. Dans un écran monochrome, il y a donc autant de diodes que de pixels de l'image. La LED a été étudiée au chapitre 3 en tant que pixel unitaire. Les performances électro-optiques de diodes unitaires ont été présentées et la baisse de rendement lorsque leur taille diminue a été analysée.

Dans ce chapitre 4, nous allons étudier les LED en tant que réseau 2D permettant la formation d'images. Des diodes de $8\ \mu\text{m}$ de diamètre, matricées à un pas de $10\ \mu\text{m}$, dans un réseau de 873×500 micro-LED (figure IV-1) seront caractérisées.

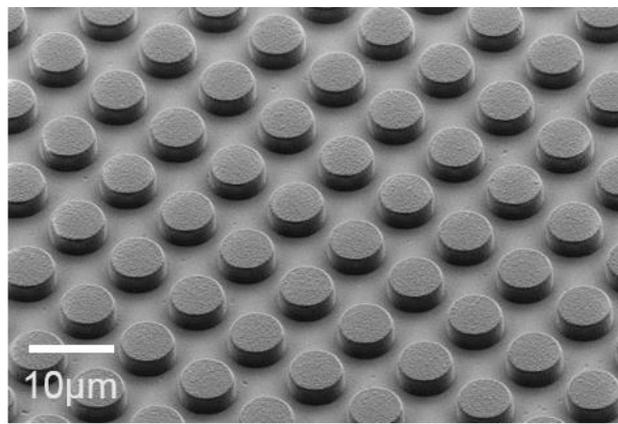


Figure IV-1 : observation MEB d'un réseau de micro-LED au pas de $10\ \mu\text{m}$

De nouveaux éléments sont à considérer. Le premier est celui des performances électro-optiques de ces micro-LED en matrice, de la dispersion sur ces résultats et du taux de LED fonctionnelles à l'échelle de l'écran. Le deuxième élément important à examiner dans le cas des écrans est celui de la diaphotie (généralement appelé cross-talk). Les études menées visant à réduire ce phénomène et les conséquences sur le rendement seront présentées. Enfin, les performances de micro-écrans LED à matrice active obtenus après hybridation du réseau de micro-LED sur un circuit CMOS seront étudiées (luminance, contraste, qualité d'image, etc.).

IV.2 Caractérisations de micro-LED en matrice

IV.2.1 Comparaison de micro-LED unitaires et matricées

Des micro-LED en matrice issues du LOT 3 émettant dans le bleu ($440\ \text{nm}$) sont caractérisées. C'est avec ce lot, avec un contact P à base d'argent, que nous avons obtenu au chapitre 2 les meilleures performances sur les diodes unitaires. La figure IV-2 présente la courbe typique du courant en fonction de la tension d'une micro-LED ($8\ \mu\text{m}$ de diamètre) matricée, comparée avec une micro-LED unitaire ($8\ \mu\text{m}$ de côté). Ces deux types de diodes sont réalisés avec le même procédé de fabrication (LOT 3), sur le même wafer (de diamètre 4'' avec EBL).

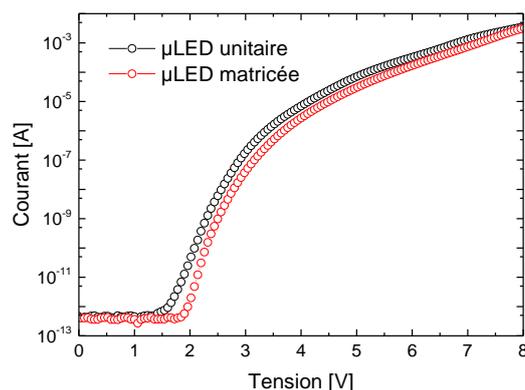


Figure IV-2 : caractéristique courant-tension typique d'une micro-LED en matrice et unitaire

Le courant de saturation à faible tension est très faible ($5 \cdot 10^{-13}$ A), et identique que la LED soit matricée ou unitaire, indiquant une bonne isolation électrique de la jonction PN. La tension de seuil électrique est de l'ordre de 2 V et le courant augmente ensuite très fortement entre 2 V et 3 V avant de commencer à saturer. Nous pouvons observer que les caractéristiques électriques de μ LED matricées sont bonnes, et proches de celles des diodes unitaires. La seule différence observée est une baisse du courant traversant la diode sur l'ensemble de la gamme de tension. Sans une étude plus approfondie des effets de dispersion, il est impossible de conclure si cette différence provient du procédé de matricage de μ LED ou d'une variation des performances électro-optiques à l'échelle du wafer.

Les courbes de luminance typiques en fonction de la tension et du courant sont présentées figure IV-3. Nous présentons les valeurs de luminance car communément utilisées pour caractériser l'émission d'écrans et de micro-sources lumineuses.

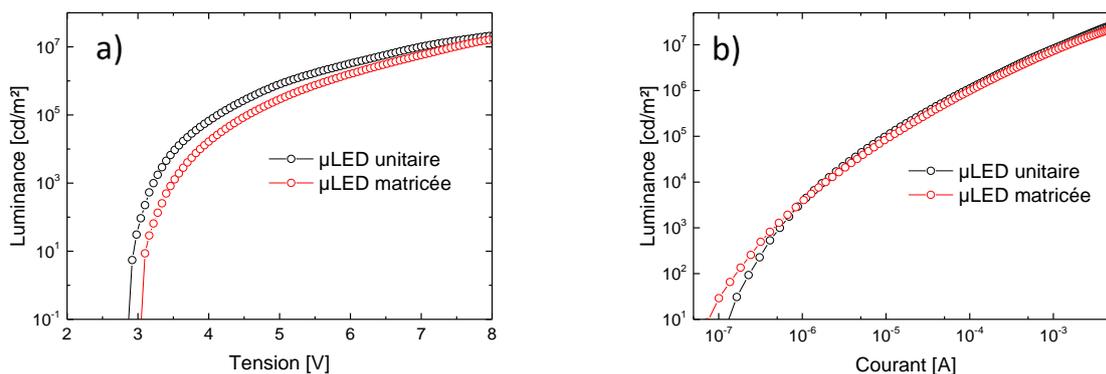


Figure IV-3 : luminance typique d'une micro-LED matricée unitaire en fonction a) de la tension et b) du courant

Le seuil optique est d'environ 3 V, ce qui correspond à un courant d'environ 10^{-7} A. Les courbes de luminance en fonction du courant sont très proches, tandis qu'en tension, les diodes en matrice présentent une luminance plus faible, à cause d'un courant plus faible parcourant les diodes.

Pour obtenir des niveaux de luminance de 10^4 cd/m² à 10^5 cd/m², la tension à appliquer sur les μ LED matricées est de l'ordre de 4 V à 4.5 V, soit un courant de l'ordre de 1 μ A à 10 μ A. La luminance maximale atteinte est alors de $3 \cdot 10^7$ cd/m². Précisons cependant qu'une compliance de 5 mA est appliquée pour ne pas risquer d'endommager les diodes. Il est possible de polariser au-delà de 5 mA pour obtenir des luminances plus élevées.

Ainsi, les niveaux de luminances obtenus de micro-LED matricées sont en accord avec les spécificités demandées pour des applications de type réalité augmentée. Cependant, dans le cas d'un micro-écran à matrice active, c'est le circuit d'adressage qui limitera le courant disponible, et donc la luminance maximale du pixel. Nous y reviendrons en fin de chapitre.

Enfin, les courbes de rendement EQE en fonction de la tension et du courant sont présentées figure IV-4.

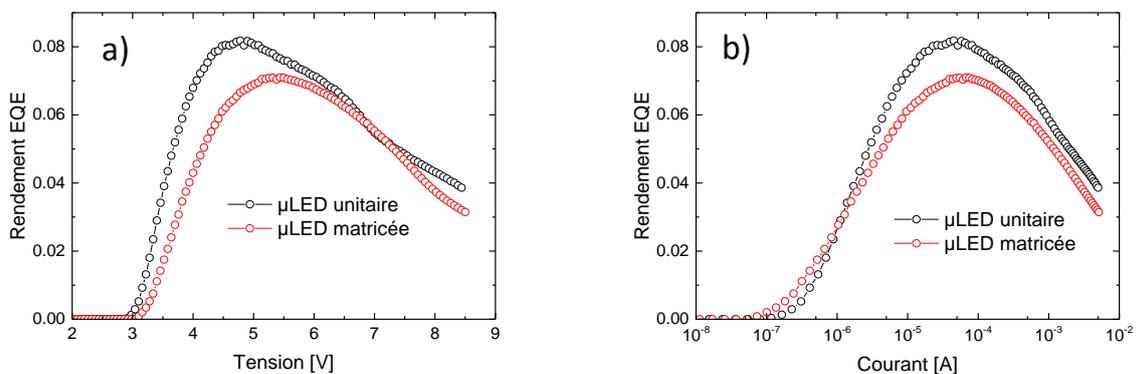


Figure IV-4 : rendement EQE typique d'une micro-LED matricée et unitaire en fonction a) de la tension et b) du courant

Le rendement maximum d'une μ LED unitaire est de l'ordre de 8% et de 7% pour les diodes matricées. Nous avons étudié aux chapitres précédents les raisons principales de ce faible rendement (faible extraction lumineuse et fort coefficient de recombinaisons non-radiatives SRH sur les flancs). Le maximum du rendement est atteint à 5 V, ce qui correspond à des niveaux de courant de l'ordre de 100 μ A. La forte résistance série observée précédemment explique en partie la forte tension nécessaire pour atteindre le maximum du rendement. Au-delà de 0.1 mA le rendement chute, c'est le phénomène de droop que nous avons identifié au chapitre 3 comme indépendant de la taille des LED.

Les μ LED matricées semblent ainsi présenter un rendement EQE maximal légèrement plus faible que les diodes unitaires. Cependant, les caractéristiques électro-optiques obtenues sont très proches, et nous pouvons conclure en première approximation que le matricage des LED ne semble pas dégrader leurs performances électro-optiques.

Nous avons présenté les performances typiques d'une μ LED parmi plus de 400000 diodes présentes sur l'écran. Il nous paraît important d'étudier la dispersion à l'échelle de l'écran pour confirmer les résultats obtenus, et appréhender le fonctionnement des diodes dans le cadre de la réalisation d'un écran.

IV.2.2 Dispersion à l'échelle de l'écran

IV.2.2.a *Dispersion électrique*

Afin de procéder à l'étude de la dispersion, des mesures sont réalisées sur un banc automatique permettant l'acquisition des courbes courant-tension. Les résultats obtenus pour 950 micro-LED adjacentes testées sont présentées ci-dessous figure IV-5.

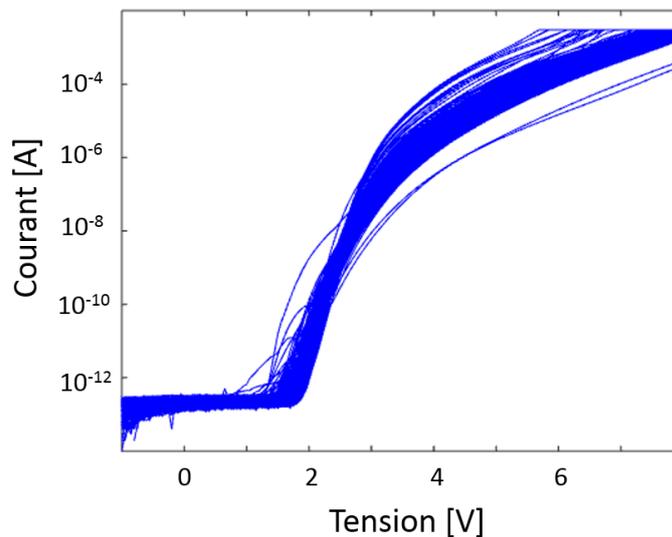


Figure IV-5 : caractéristique courant-tension de 950 micro-LED d'une matrice

La première indication à extraire de cette figure est le taux de fonctionnalité. Nous appelons 'fonctionnelle' une LED qui n'est ni en court-circuit, ni en circuit ouvert, et qui émet de la lumière. Ici, toutes les diodes testées sont fonctionnelles. Cela nous renseigne sur le taux de défaut de notre procédé de fabrication, que l'on peut estimer en première approximation, inférieur ou égal à 1/1000. C'est un résultat important dans l'optique de la réalisation d'écrans LED qui indique une nouvelle fois la qualité et la maîtrise du procédé de matricage d'une épitaxie LED.

Le tracé de la caractéristique I-V révèle que le courant à faible tension est très faible, avec une très faible dispersion sur les valeurs obtenues. Aucune diode ne montre de courants de fuite à faible tension (inférieure à 1 V), et la dispersion est faible au niveau de la tension de seuil. Cependant, au-delà de 3 V, une dispersion plus importante apparaît à fort courant. A titre d'exemple, le courant moyen à 5 V est de $4 \cdot 10^{-5}$ A et l'étendue est de deux décades environ.

Ce résultat implique que deux diodes polarisées à la même tension présenteront une variation sur le courant et donc sur la puissance optique émise par chaque LED. Cette variation sur le courant implique une conséquence importante dans le cadre de la réalisation d'un écran LED. Si chaque LED est contrôlée en tension, la puissance optique émise par chaque pixel sera différente, à cause de la variation sur l'injection du courant électrique. En conséquence, la qualité d'image de l'écran sera dégradée, avec une variation de l'intensité lumineuse d'un pixel à l'autre.

L'extraction des paramètres caractéristiques est réalisée pour chaque diode testée et les histogrammes associés sont présentés figure IV-6. Les paramètres caractéristiques d'une diode sont :

la tension de seuil électrique V_{se} , le coefficient d'idéalité n_{id} , la résistance série R_s et la résistance parallèle R_p . L'extraction de V_{se} , n_{id} et R_s est identique au chapitre 3. L'extraction de R_p est déterminée par l'équation :

$$R_p \approx \left. \frac{dV}{dI} \right|_{0.5V} \quad (IV.1)$$

Le choix d'une tension de 0.5 V est ici arbitraire. La mesure de R_p doit être faite pour une tension proche de 0 V et largement inférieure à la tension de seuil V_{se} .

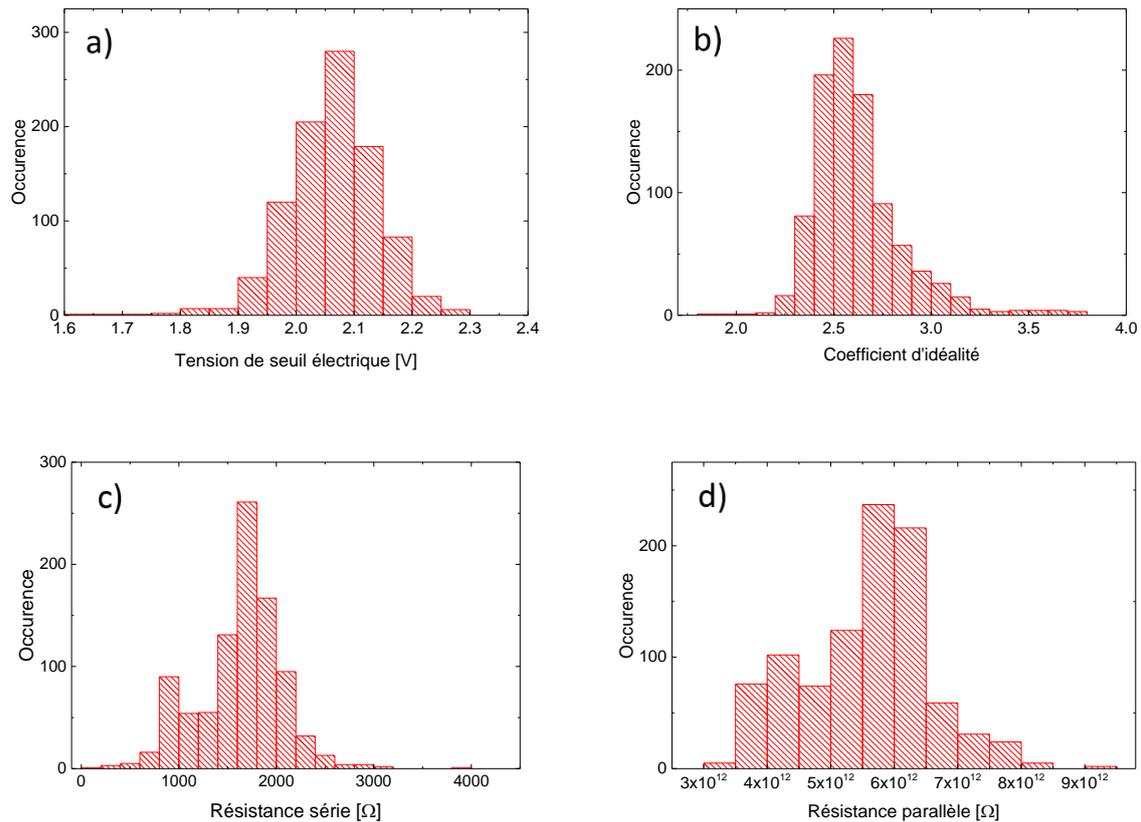


Figure IV-6 : extraction des paramètres électriques caractéristiques : a) V_{se} b) n_{is} c) R_s et d) R_p

La tension de seuil électrique moyenne est de 2.04 V et le coefficient d'idéalité moyen est de 2.6. C'est un coefficient d'idéalité très bon, inférieur aux valeurs parues dans la littérature, généralement de l'ordre de 4 à 7 [1][2].

La valeur du coefficient d'idéalité est la seule différence observée entre micro-LED unitaires et matricées. En effet, les résultats présentés au chapitre 3 montrent un coefficient d'idéalité de l'ordre de 3.5 pour les micro-diodes unitaires, tandis qu'il est de 2.6 pour les micro-diodes matricées. C'est donc un avantage des micro-LED matricées, que nous pouvons attribuer à un procédé de fabrication optimisé pour les matrices de micro-LED. La répétition d'un même motif sur une grande surface semble préférable à la réalisation de diodes unitaires de tailles différentes.

La résistance parallèle est de l'ordre de $10^{12} \Omega$. C'est une valeur élevée, proche de l'idéalité (pour une diode idéale $R_p \rightarrow \infty$). Nous pouvons considérer que les micro-LED testées ne présentent pas de

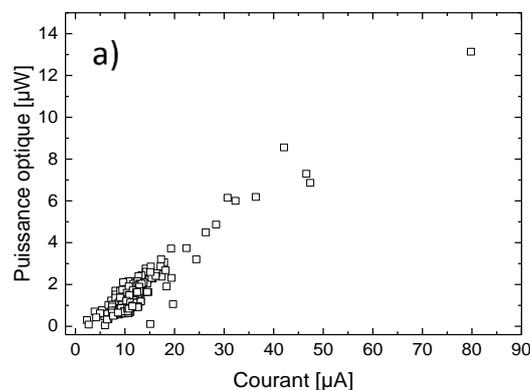
résistance parallèle, symbolisant généralement des courants de fuites, et le courant mesuré est attribué au courant de saturation I_s . Ce résultat indique une bonne isolation électrique de la jonction PN.

Des effets néfastes apparaissent à forte tension. En particulier, la valeur de la résistance série moyenne est élevée (environ 2 k Ω), ce qui limite le courant disponible à forte tension. Nous avons vu au chapitre 3 que la résistance série variait linéairement avec l'inverse de la surface, ce qui explique la résistance élevée des micro-LED. La dispersion sur R_s est faible. Quelques points hors tendance ne sont pas représentés ici sur l'histogramme de la résistance série, et 99% des valeurs de R_s sont comprises dans l'intervalle [500 - 3000 Ω] (figure IV-6). Ces résultats montrent la qualité du contact, qui permet une bonne injection du courant à forte tension, sans défauts supplémentaires liés à la réduction de la taille des LED. La faible dispersion montre un bon contrôle du procédé de fabrication à l'échelle de l'écran.

En résumé, les performances électriques obtenues sont bonnes. Les valeurs de tension de seuil électrique, coefficient d'idéalité et de résistance parallèle sont proche de valeurs idéales théoriques et des résultats parus dans littérature. La résistance série est légèrement élevée. Il s'agit ici d'une voie d'amélioration pour améliorer les performances des micro-LED. D'autre part, la dispersion relevée sur l'ensemble des paramètres est faible, signe d'un procédé de fabrication et d'une épitaixie maîtrisés et homogènes à l'échelle du micro-écran.

IV.2.2.b Dispersion optique

Afin d'étudier la dispersion sur la puissance optique, 300 micro-LED réparties sur le réseau de diodes sont caractérisées. Les diodes sont polarisées à 4.5 V et les courants et puissances optiques associés sont mesurés. Les résultats sont présentés figure IV-7. Le choix de cette étude est motivé par le fonctionnement de nos futurs écrans à matrice active. Les pixels y sont pilotés en tension, et le niveau de tension maximum disponible est de l'ordre de 4.5 V. Nous souhaitons donc étudier ici la dispersion attendue de l'écran.



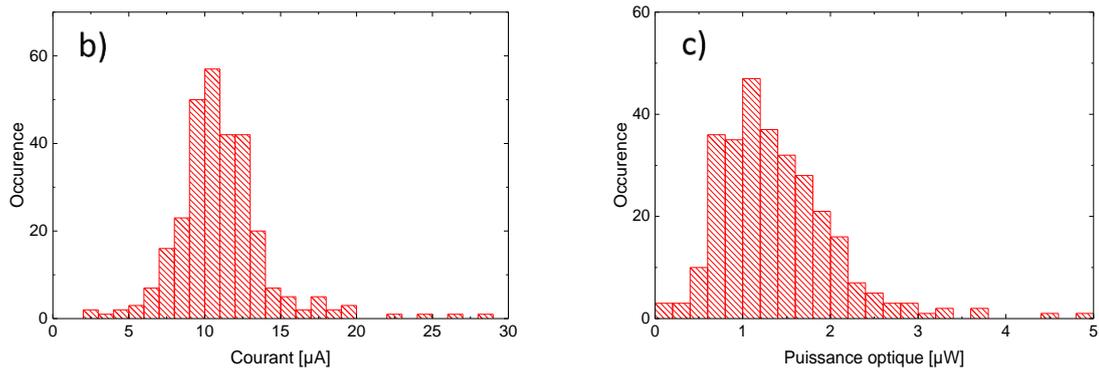


Figure IV-7 : a) dispersion de la puissance optique de 300 diodes polarisées à 4.5V. Les histogrammes présentent la dispersion sur la mesure b) du courant et c) de la puissance optique

Les résultats montrent une proportionnalité entre la puissance optique et le courant injecté, ainsi qu'une dispersion élevée. La principale source de dispersion porte sur le courant. Le courant moyen, de l'ordre de 10 μA , peut varier fortement d'une diode à une autre. Environ 95% points de mesure sont compris dans l'intervalle [5 μA – 20 μA], mais une dizaine de points sont hors de cet intervalle. La dispersion sur la puissance optique suit la même tendance. La majorité des LED émet entre 1 μW et 2 μW , mais l'étendue varie typiquement sur une décade. Dans le cadre de la réalisation d'un écran, une telle étendue nous semble rédhitoire.

D'autre part, à courant donné, il existe une faible variation sur la puissance optique. Cette dispersion est principalement attribuée à l'inhomogénéité du rendement quantique interne de l'épitaxie.

Les conséquences sur le futur écran LED sont importantes. La conception du circuit électronique de commande doit notamment prendre en compte une possible variation du courant d'un pixel à l'autre. Le choix d'un circuit électronique permettant de piloter les pixels en courant nous paraît essentiel afin de se soustraire à la dispersion observée sur la réponse I-V des diodes.

Afin d'étudier la dispersion observée précédemment figure IV-7, nous procédons à une modélisation de la LED. Pour cela une diode 'réelle' est considérée, symbolisée par une diode 'idéale' D , une résistance série R_s et une résistance parallèle R_p (figure IV-8). La puissance optique P_{OPT} émise par la diode dépend du courant traversant la diode I_D et est obtenue par l'équation :

$$P_{OPT} = f(I_D) = \frac{I_D \cdot EQE \cdot h\nu}{q} \quad (IV.2)$$

Considérant une distribution gaussienne sur la résistance série R_s ($3\sigma = 10\%$) et sur le rendement EQE (moyenne à 5.5% et dispersion à 3σ comprise entre 4 et 7%), il est possible de simuler le courant I_D parcourant la diode et la puissance optique émise P_{OPT} . Un tirage de type MonteCarlo sur 10000 LED est effectué afin d'obtenir la distribution du courant et de la puissance optique (figure IV-9) qui sera comparée aux mesures expérimentales.

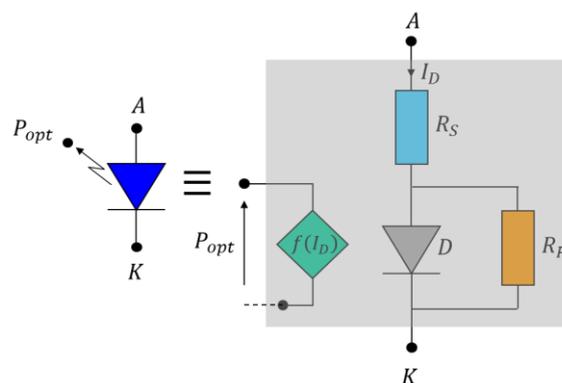


Figure IV-8 : modèle SPICE simulé permettant l'extraction de la puissance optique émise par une LED [3]

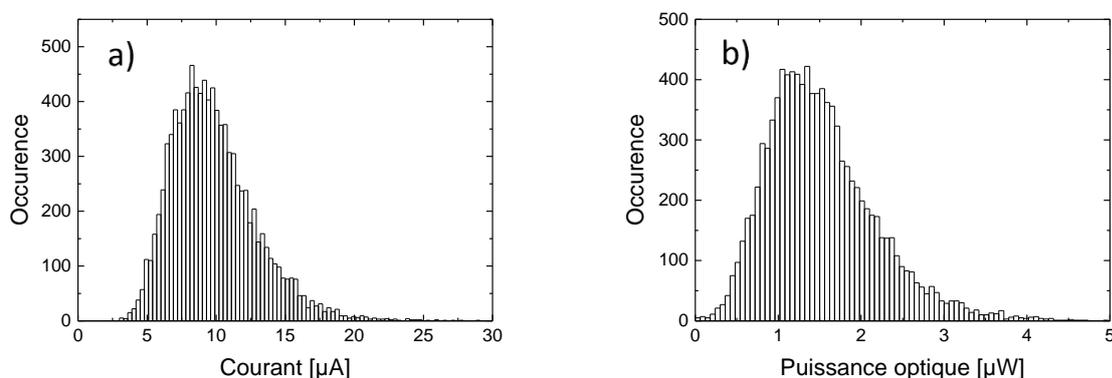


Figure IV-9 : histogrammes obtenus sur a) le courant et b) la puissance optique de 10000 LED après un tirage de type Monte-Carlo [3]

Les valeurs obtenues sont en accord avec les mesures expérimentales. Le courant moyen est de l'ordre de $10 \mu\text{A}$ et la puissance optique de $1,5 \mu\text{W}$. Ainsi, la variation de 10% sur la résistance série permet d'expliquer au premier ordre les variations observées en courant et puissance optique. Cette variation peut s'expliquer par la variabilité intrinsèque de l'épitaxie, du fonctionnement interne de la LED ou du procédé de fabrication. Une étude plus approfondie des phénomènes de dispersion est à considérer dans l'optique de la réalisation de micro-écrans présentant une émission homogène.

Nous n'avons pas trouvé mention de résultats de dispersion de micro-LED dans la littérature. Il nous est donc impossible de comparer les valeurs de dispersion obtenues avec d'autres groupes. La dispersion simulée ici, sur le courant et la puissance optique, ne nous paraît pas acceptable dans le cadre d'une application pour des écrans, où la qualité d'image est une contrainte importante. Bien que des améliorations soient envisageables pour réduire la dispersion (sur l'épitaxie et le procédé de fabrication), une polarisation des LED en courant semble nécessaire pour la réalisation d'écrans LED homogènes.

IV.2.3 Dispersion à l'échelle de l'épithaxie

La dispersion à l'échelle de l'écran a été analysée. Il est dorénavant intéressant d'étudier la dispersion à l'échelle de l'épithaxie. En effet, les épithaxies utilisées, d'un diamètre de 4'', permettent de réaliser environ 100 matrices de LED par wafer. Nous souhaitons étudier si les performances obtenues sont identiques en différents endroits de l'épithaxie.

Pour cela, nous procédons tout d'abord à une mesure de photoluminescence (laser d'excitation à 405 nm) à l'échelle du wafer, en intensité et en longueur d'onde (figure IV-10).

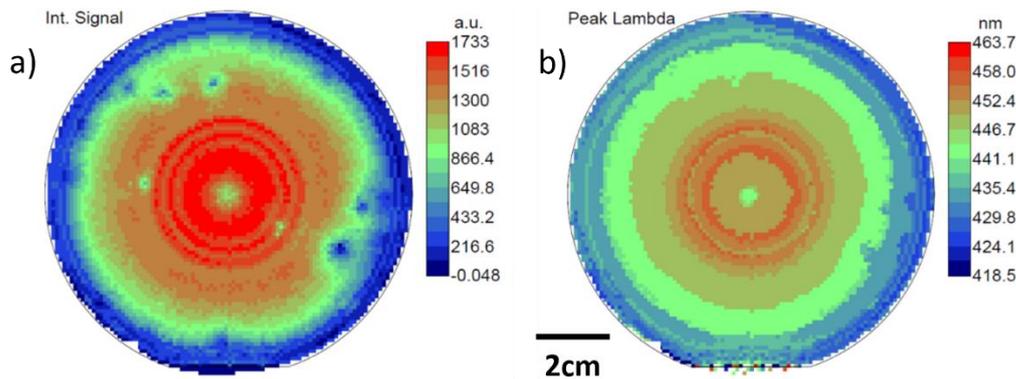


Figure IV-10 : cartographie a) d'intensité de PL et b) de longueur d'onde d'émission à l'échelle de l'épithaxie

Les résultats montrent que l'intensité de PL et la longueur d'onde d'émission varient à l'échelle de l'épithaxie. En particulier, un effet concentrique est observé. L'intensité de PL, très faible en bord de plaque, augmente à mesure que l'on s'approche du centre de l'épithaxie. La longueur d'onde d'émission varie d'environ 440 nm sur les bords à 455 nm en centre de plaque.

C'est un élément important à prendre en considération dans l'analyse de la dispersion à l'échelle du wafer, mais aussi d'un wafer à l'autre. La fabrication d'épithaxies LED très homogènes, d'un point de vue des performances électriques et optiques, est un axe d'étude important dans l'optique de la réalisation de micro-écrans LED.

La deuxième source de dispersion à étudier porte sur le procédé de fabrication. Nous procédons pour cela à des caractérisations I-V-L sur trois matrices en différents endroits du wafer. Sur chaque matrice, un dizaine de micro-LED est caractérisée. Les courbes de courant, de luminance et de rendement sont présentées figure IV-11.

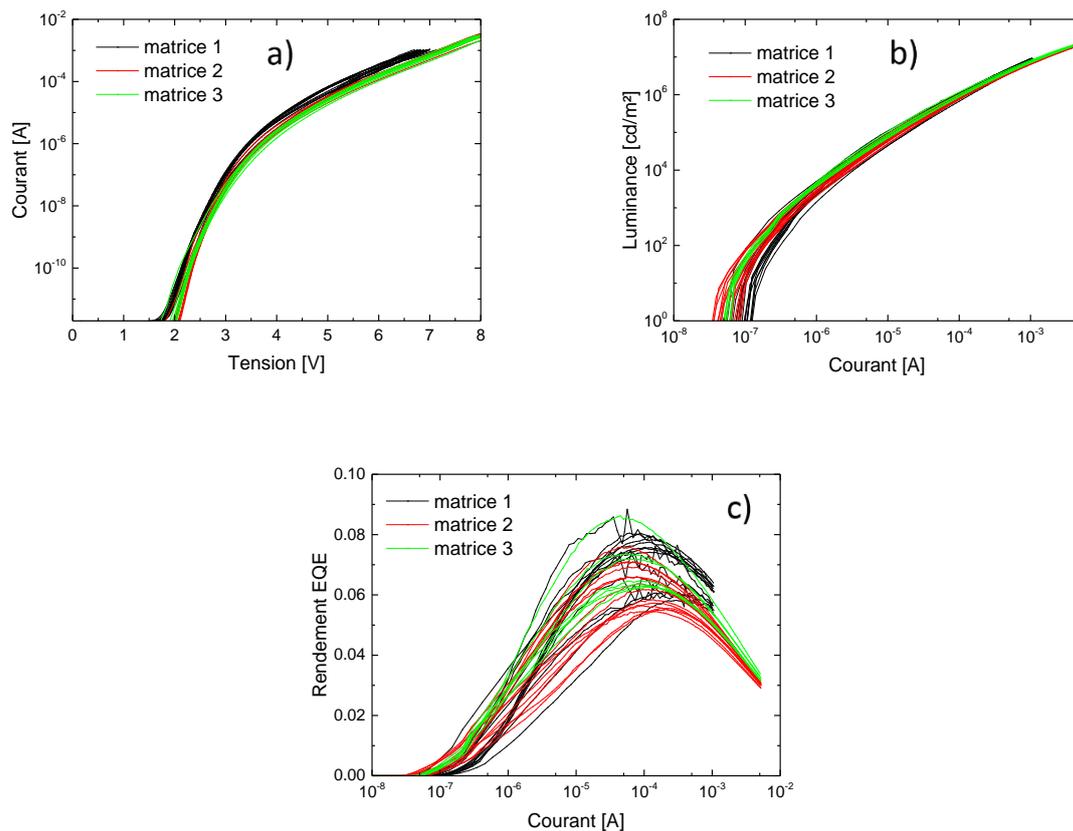


Figure IV-11 : caractéristiques a) du courant en fonction de la tension, b) de la luminance en fonction du courant et c) du rendement EQE en fonction du courant pour 3 matrices de LED réalisées sur le même wafer

Les résultats montrent des caractéristiques similaires d'une matrice à une autre. La dispersion obtenue est faible et similaire pour les trois matrices testées, indiquant une très bonne maîtrise du procédé de fabrication à l'échelle du wafer. Le maximum du rendement EQE est typiquement de $6.5\% \pm 1\%$. Le point de fonctionnement optimal est d'environ $100 \mu\text{A}$ à 5.5 V.

En résumé, deux sources de dispersion ont été étudiées. D'après les premières observations, la dispersion à grande échelle est principalement due à l'épitaxie, tandis qu'à faible échelle, la dispersion obtenue sur les caractéristiques électro-optiques est principalement attribuée au procédé de fabrication. Malgré un contrôle du procédé de fabrication qui nous semble maîtrisé, une variation inhérente à tout process peut expliquer la dispersion observée.

Nous avons étudié jusqu'à présent les performances électro-optiques de LED unitaires (chapitres 2 et 3) et de micro-LED matricées au cours de ce chapitre 4. Nous avons présenté en introduction de ce manuscrit de thèse les principales caractéristiques à étudier dans le cadre de micro-écrans LED. C'est-à-dire des LED de petites dimensions, très nombreuses, et proches les unes des autres. Nous avons traité au chapitre 3 l'étude des effets de la taille et dans l'étude précédente les aspects de dispersion et de taux de fonctionnement. Le dernier point à considérer est celui de la proximité des diodes et des conséquences sur la qualité d'image.

IV.3 Etude de la diaphotie

IV.3.1 Définition et présentation

La diaphotie est une problématique importante à considérer dans le cadre des écrans. Elle caractérise la propension d'un pixel - voulu non-émissif - à émettre de la lumière. C'est donc un effet néfaste qui nuit à la qualité de l'image obtenue à travers par exemple une dégradation du contraste ou du point couleur. Nous utiliserons dans la suite du manuscrit le terme anglo-saxon de cross-talk, communément utilisé dans le domaine des écrans.

Nous pouvons distinguer deux sources de cross-talk : le cross-talk électrique, dû à un court-circuit qui relie deux pixels, et le cross-talk optique, dû au chemin parcouru par les photons dans la structure. Le cross-talk optique au niveau de la matrice de micro-LED sera étudié dans ce chapitre. Pour cela, nous procéderons à des simulations optiques de type tracé de rayons et à des observations optiques. Ensuite, une modification du procédé de fabrication sera proposée afin de supprimer le cross-talk. Un nouveau lot (LOT 4) sera réalisé, caractérisé et comparé au lot précédent.

IV.3.2 Simulations optiques

IV.3.2.a *Etude des substrats PSS et de la texturation de surface*

L'utilisation de substrat PSS est largement répandue pour l'épitanie de LED GaN pour l'éclairage. Elle permet, comme nous l'avons mentionné au chapitre 1, de limiter le taux de dislocation, et d'améliorer l'extraction lumineuse comme nous allons le voir ici. Deux observations MEB d'épitanies PSS sont présentées figure IV-12, l'une vue de dessus après gravure du GaN jusqu'au saphir, la seconde vue en tranche par coupe FIB en fin de fabrication.

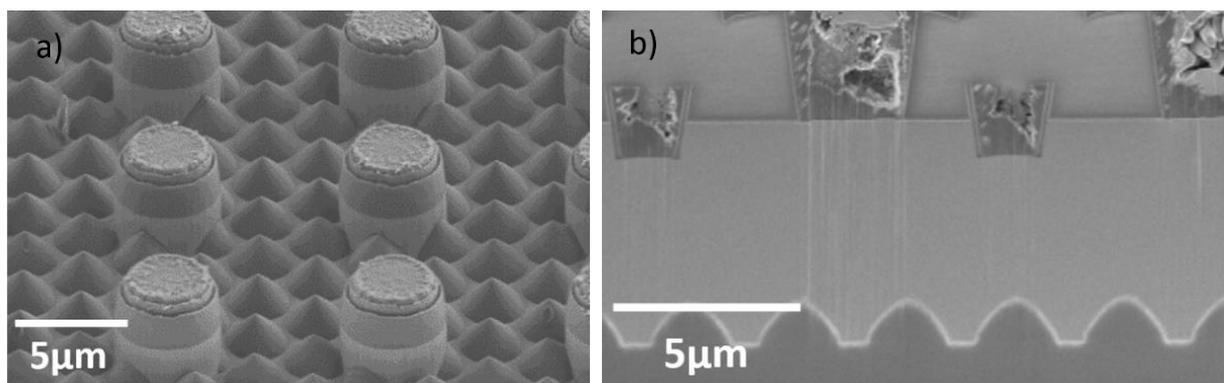


Figure IV-12 : structure PSS observée au MEB a) vue par-dessus après gravure, b) vue en coupe en fin de fabrication

Il s'agit de structures de quelques micromètres, répétées périodiquement dans le plan. La figure IV-13 ci-dessous présente la structure simulée en tracé de rayons. Des microsphères en saphir sont ajoutées à la structure initiale présentée au chapitre 2.

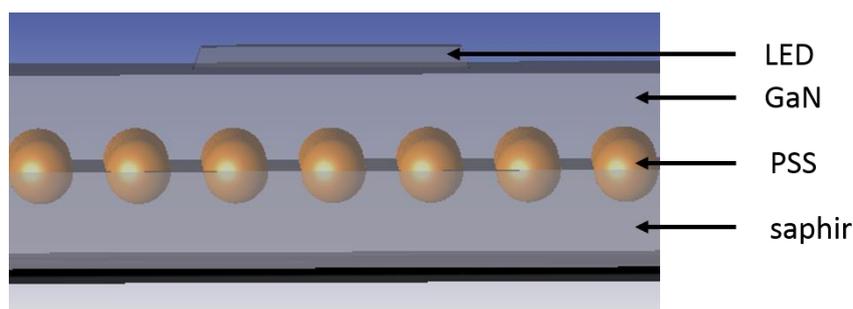


Figure IV-13 : simulation d'une structure PSS

La texturation de surface est une deuxième technique visant à améliorer l'extraction lumineuse. La texturation consiste à rendre rugueuse la surface du saphir ou du GaN afin d'obtenir une réflexion diffuse et non spéculaire (figure IV-14).

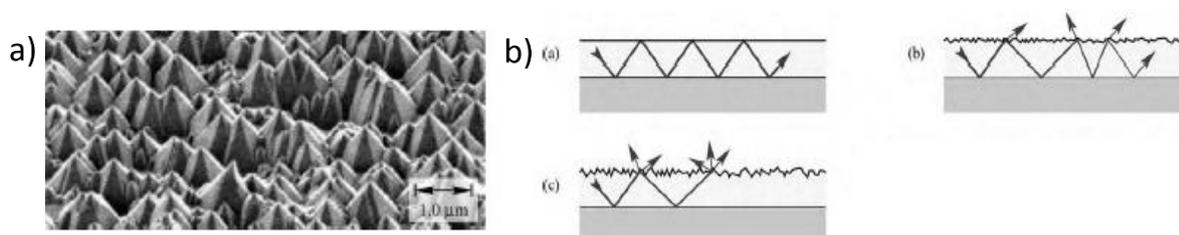


Figure IV-14 : a) observation MEB et b) principe de fonctionnement de la texturation de surface [4]

Par simulation optique de tracés de rayons, les gains obtenus en PSS et texturation, pour le modèle de référence présenté au chapitre 2, sont similaires (figure IV-15). Il est possible d'utiliser un substrat PSS et de texturer le saphir, dans ce cas, le gain sur l'extraction est plus important. Les résultats obtenus sont en accord avec des simulations réalisées sur des LED de dimensions $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ et publiées dans la littérature [5], ce qui indique qu'au premier ordre, ces structures (PSS et texturation) permettent d'améliorer fortement l'extraction lumineuse.

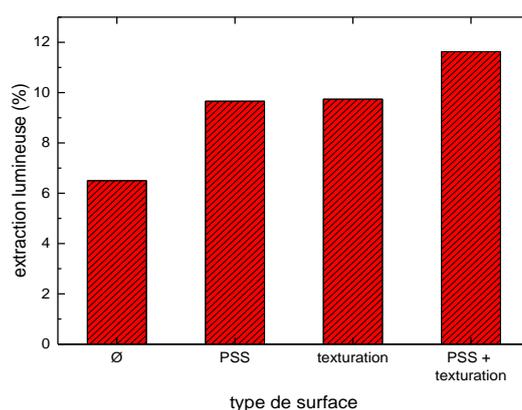


Figure IV-15 : gains obtenus sur l'extraction lumineuse avec PSS et structuration

Le gain en extraction lumineuse est cependant compensé par une baisse de la qualité d'image dans le cas des écrans. Nous prenons ci-dessous l'exemple d'une LED avec substrat PSS (figure IV-16). Deux rayons lumineux sont présentés. L'un des deux (en rouge) n'est pas dévié et est extrait sous le pixel, tandis que le second (en bleu) est dévié par les structures PSS et est extrait en dehors du pixel.

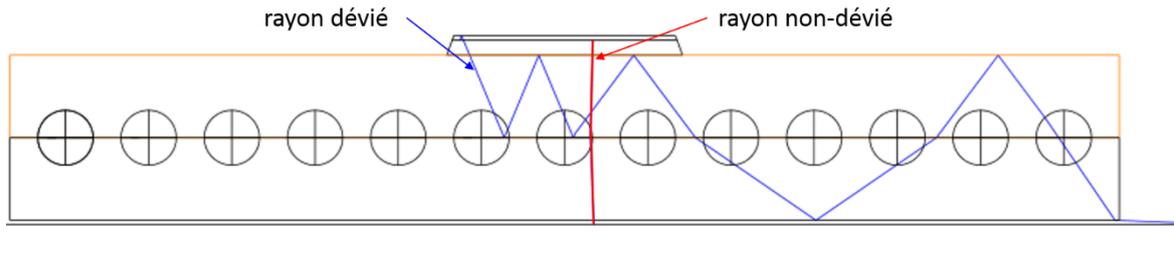


Figure IV-16 : trajets des rayons lumineux dans une épitaxie PSS. Un rayon (en rouge) n'est pas dévié et est extrait sous le pixel, l'autre (en bleu) est dévié par la structure PSS et n'est pas extrait sous le pixel

L'émission obtenue pour les différentes structures simulées est présentée figure IV-17.

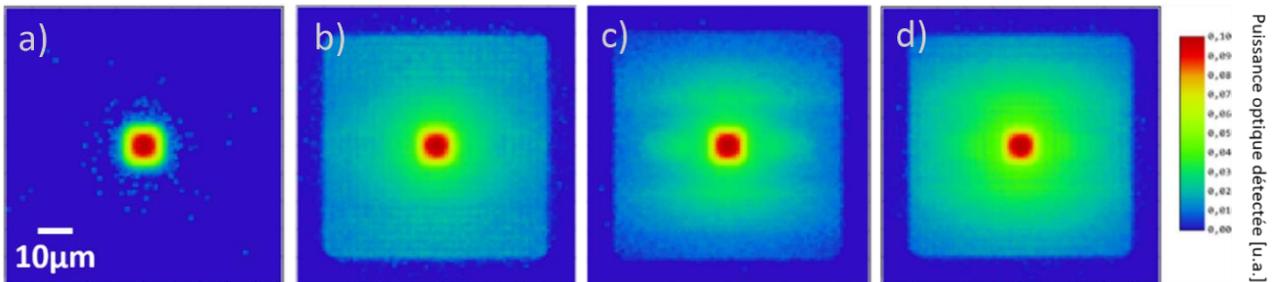


Figure IV-17 : émission simulée d'une LED a) classique, b) avec substrat PSS, c) avec texturation du saphir, d) avec substrat PSS + texturation du saphir

Une épitaxie classique permettra ainsi d'obtenir une image de bonne qualité tandis que l'utilisation de substrat PSS ou texturé génère du cross-talk et dégrade la qualité de l'image.

C'est une différence importante entre l'utilisation de LED pour l'éclairage et pour les écrans. Dans le cas des écrans, il faut faire un compromis entre l'extraction lumineuse et la qualité de l'image. C'est pour cette raison que des épitaxies non PSS et non texturées sont utilisées au cours de cette thèse. Ce choix explique par ailleurs en partie le faible rendement EQE obtenu pour nos LED comparativement aux LED commerciales utilisées pour l'éclairage (typiquement 50%).

IV.3.2.b Etude de la pixellisation

Les simulations optiques de tracé de rayons effectuées jusqu'à présent ont été réalisées sur des diodes unitaires. Nous allons maintenant considérer un réseau de 10×10 μ LED au pas de $10 \mu\text{m}$, dans lequel une seule diode est émissive (figure IV-18). Le parcours des rayons lumineux est étudié pour étudier l'impact de la pixellisation sur l'émission.

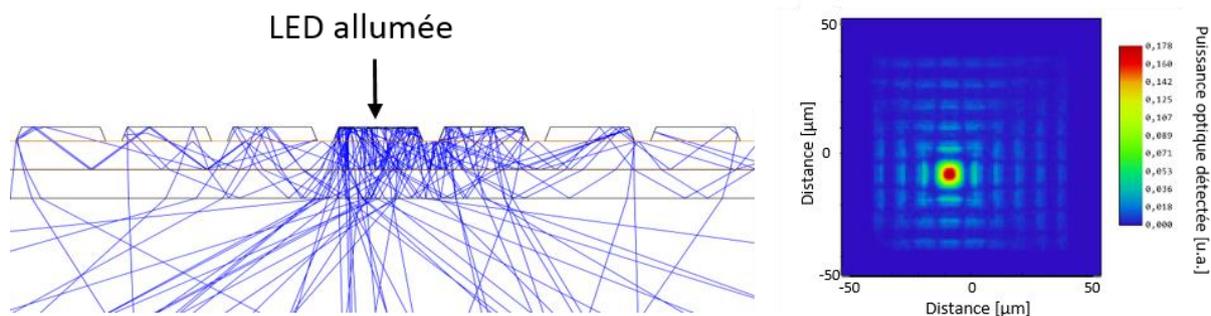


Figure IV-18 : influence du matricage sur le cross-talk optique

Une partie des rayons initialement guidés dans le GaN est déviée par les LED voisines. En particulier, les flancs des pixels, ici à 70°, dévient la trajectoire des rayons et permettent à une partie d'entre eux d'être extrait de la structure.

Puisqu'une partie des rayons initialement guidés dans le GaN est extraite, cela signifie que l'extraction lumineuse augmente, et donc le rendement EQE. Pour notre modèle de référence considéré chapitre 2 (réflectivité du contact P : $R_p=35\%$ et du contact N : $R_n=85\%$), l'extraction passe ainsi de 8% à 9% lorsqu'on ajoute des pixels voisins. Dans le cas d'une cavité parfaitement réfléchissante, l'extraction passe à 26%. Cette forte augmentation est liée à l'angle des flancs (ici 70°). Nous avons vu au chapitre 2 que l'angle de gravure influait fortement sur l'extraction lumineuse. Ceci est d'autant plus vrai en considérant le cross-talk optique. On voit apparaître ici un compromis à faire entre extraction lumineuse et contrôle de l'image obtenue. Pour les écrans, cet effet est rédhibitoire et doit être supprimé. Par conséquent, nous cherchons des solutions, réalisables dans notre procédé de fabrication de micro-LED, qui permettent de supprimer le cross-talk optique.

La première solution consiste à réaliser des flancs parfaitement verticaux. La figure IV-19 présente une simulation effectuée avec une gravure de 90°.

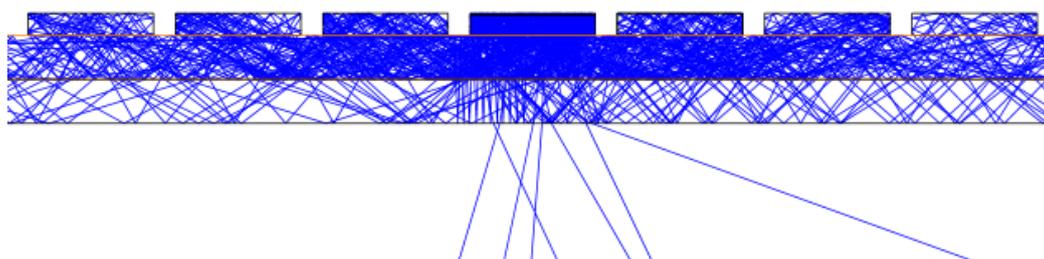


Figure IV-19 : effet théorique d'une gravure verticale sur le cross-talk

Dans ce cas, les rayons sont guidés dans la structure et les seuls rayons extraits sont situés sous le pixel émissif. Cependant un contrôle parfait de la verticalité des flancs est difficile à assurer en process, et les effets de diffraction sur les flancs peuvent induire du cross-talk. En effet, nous considérons ici des réflexions parfaitement spéculaires, mais il n'est pas à exclure des réflexions diffuses sur les flancs de la LED. De plus, l'effet des espaceurs entourant les pixels n'est pas simulé. L'épaisseur de ces structures est faible, et les outils d'optique géométrique, tels que le tracé de rayons, ne permettent pas de rendre

compte des phénomènes associés. Cette solution permet de limiter le cross-talk, mais ne semble pas pertinente pour le supprimer.

Une deuxième solution consiste à graver le GaN dans sa totalité, jusqu'au saphir, puis retirer le saphir. L'extraction obtenue est présentée ci-dessous (figure IV-20).

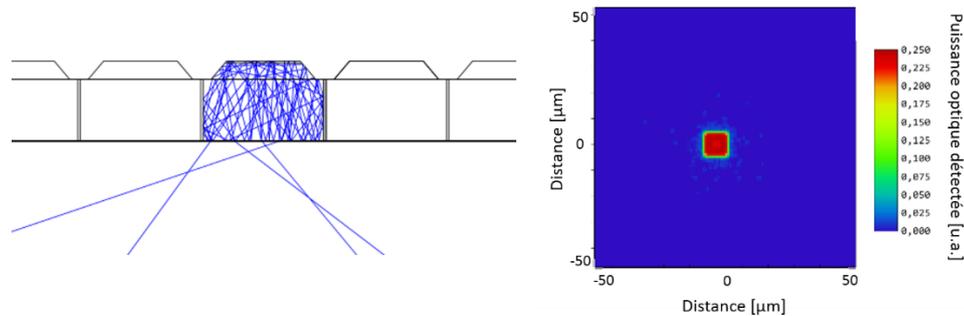


Figure IV-20 : effet d'une gravure complète du GaN et du retrait du saphir

Ici, la lumière se trouve piégée sous le pixel, et le cross-talk est entièrement supprimé. Un avantage majeur de cette solution est de pouvoir utiliser de nouvelles structures visant à améliorer l'extraction. Nous pensons notamment à l'utilisation de flancs de gravure non verticaux, de substrats PSS, ou de cristaux photoniques.

Nous avons évoqué au chapitre 2 la possible utilisation de flancs orientés à environ 50° pour améliorer l'extraction et les problématiques associées. Le contrôle de l'orientation des flancs de gravure est difficile à assurer en process et risque de plus d'empêcher l'isolation électrique de la jonction PN. D'autre part, cette solution entraîne une baisse significative de la surface émissive. Il est donc préférable de maintenir une surface de LED élevée, pour augmenter la surface émissive, et limiter la baisse de rendement EQE due à l'augmentation des recombinaisons SRH des plus petites LED.

La meilleure solution envisagée pour optimiser le compromis extraction lumineuse / suppression cross-talk consiste à modifier la surface du N-GaN après retrait du saphir par LLO (*Laser Lift-Off*). L'utilisation de substrats PSS, de texturation de surface ou de cristaux photoniques sont autant de solutions envisageables [6]. Nous les avons initialement éliminées car incompatibles avec le procédé utilisé en raison du fort cross-talk qu'elles généraient.

Nous prenons à présent l'exemple d'une LED de $7\ \mu\text{m}$ de diamètre de surface émissive, à un pas de $10\ \mu\text{m}$, gravée à 70° sur $1\ \mu\text{m}$ de profondeur, puis à 90° jusqu'au substrat. Considérant des réflexions de 90% aux interfaces, et une structuration du GaN similaire à du PSS, l'extraction obtenue est de 31% , à comparer avec les 11% d'extraction estimés avec notre technologie actuelle (figure IV-21).

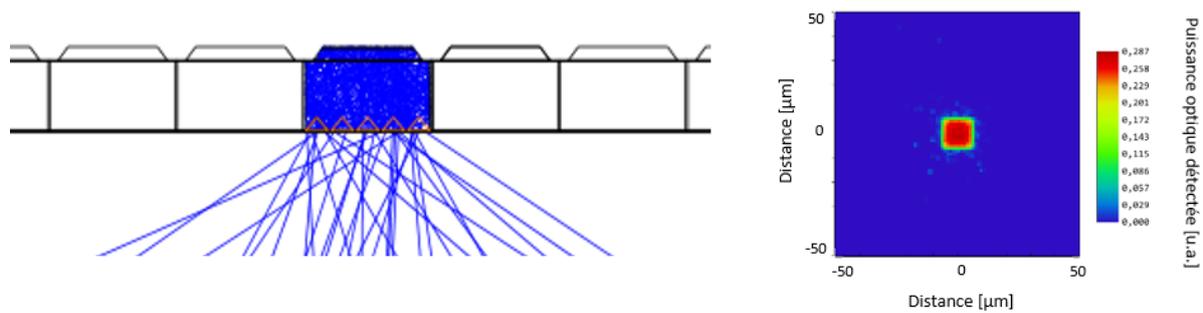


Figure IV-21 : utilisation de structures géométriques sur du GaN avec une gravure complète du GaN

En résumé de cette étude par simulation optique, la gravure totale du GaN est une solution qui paraît adaptée pour supprimer le guidage de la lumière dans le GaN. Associée au retrait du saphir et à des structures visant à améliorer l'extraction, le gain sur le rendement peut être important. Un gain d'un facteur 3 sur l'extraction semble envisageable d'après les résultats de simulation.

IV.3.3 Modification du procédé de fabrication

Un nouveau lot, appelé LOT 4, est réalisé et caractérisé. Pour ce lot, une gravure complète du GaN jusqu'au saphir est réalisée. L'épitaxie utilisée est identique à celle du LOT 3, ainsi que le reste des étapes du procédé de fabrication. Les essais de retrait de saphir se sont révélés non concluants. C'est pourquoi les résultats présentés ci-après sont réalisés sur des échantillons avec saphir. La structure réalisée est présentée en coupe figure IV-22, de manière schématique et par observation MEB.

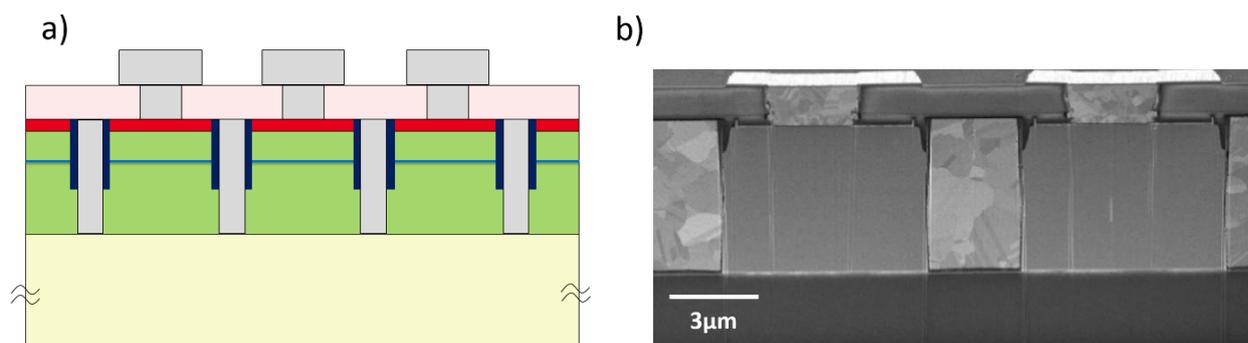


Figure IV-22 : a) schéma en coupe du LOT 4 avec gravure complète du GaN et b) observation MEB

IV.3.4 Caractérisations électro-optiques

IV.3.4.a *Gain obtenu sur le cross-talk*

Les photographies optiques de l'émission d'un réseau de μ LED sont présentées figure IV-23.b, en comparant avec les résultats obtenus avec le lot précédent (figure IV-23.a).

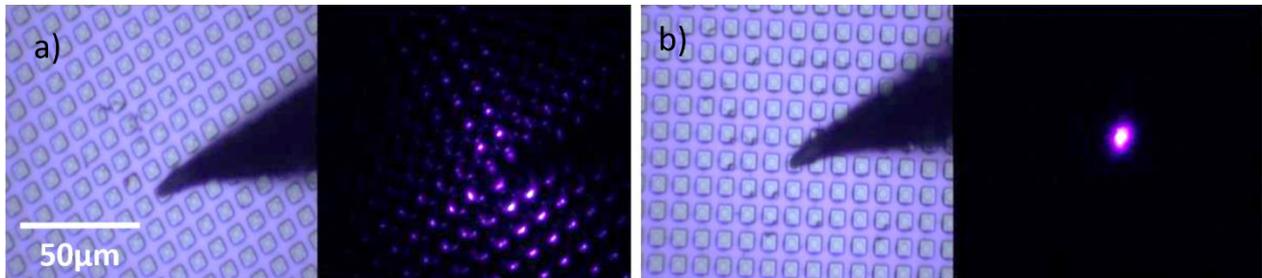


Figure IV-23 : observation au microscope optique du cross-talk dans un réseau de μ LED du a) LOT 3 et b) LOT 4

Le LOT 3 présente un fort cross-talk optique qui a été supprimé sur le nouveau lot. C'est un résultat important dans l'optique de la réalisation d'écran permettant la formation d'images de bonne qualité.

IV.3.4.b *Impact sur les caractéristiques courant-tension*

L'effet de ce nouveau procédé de fabrication sur les performances électro-optiques est ensuite étudié. Des micro-LED en matrice de 8 μ m de diamètre sont caractérisées et les résultats obtenus sont comparés avec le LOT 3. Les caractéristiques typiques du courant en fonction de la tension sont présentées figure IV-24.

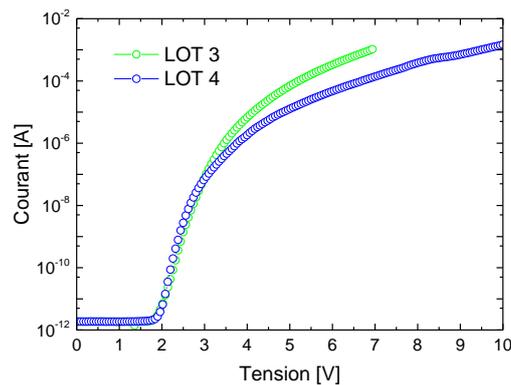


Figure IV-24 : caractéristique typique courant-tension de micro-LED matricées des lots 3 et 4

Les résultats montrent qu'à faible tension, le nouveau procédé de fabrication n'a pas d'impact sur les caractéristiques électriques. En revanche, au-delà de 3 V, le courant obtenu pour le LOT 4 est inférieur à celui du LOT 3. C'est un effet néfaste du nouveau procédé de fabrication, qui limite fortement le courant injecté à forte tension.

Nous émettons l'hypothèse que cette diminution de l'injection électrique est due à un contact N moins efficace. En effet le contact N présente une structure très différente entre le LOT 3 et le LOT 4. La surface de contact de chacun des lots est présentée schématiquement figure IV-25.

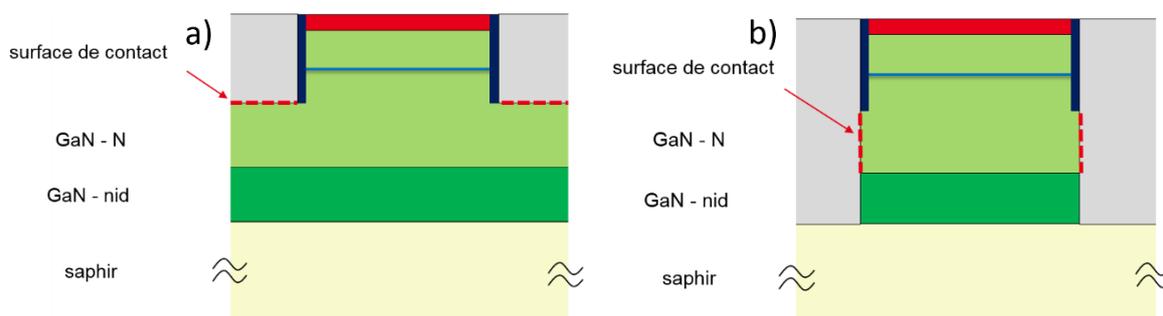


Figure IV-25 : surface de contact N pour une diode a) du LOT 3 et b) du LOT 4

Dans le cas du LOT 3, le contact N est pris dans le plan horizontal, tandis que pour le LOT 4, il est réalisé sur la tranche du pixel. Ceci se traduit par une variation de la surface de contact et de la forme du contact lui-même. Considérant comme surface totale la surface du pas de pixellisation ($10 \times 10 \mu\text{m}^2$), une diode circulaire de $7 \mu\text{m}$ de diamètre, et une région GaN-N de $3 \mu\text{m}$ de profondeur entre le bas de l'espaceur et la zone GaN non-intentionnellement dopée (GaN-nid), il est possible de comparer les surfaces de contact S_c des lots 3 et 4.

$$S_{c_{LOT\ 3}} = S_{totale} - S_{LED} \quad (IV.3)$$

$$S_{c_{LOT\ 4}} = P_{LED} \times (\text{épaisseur GaN}_N \text{ disponible}) \quad (IV.4)$$

Les surfaces de contact obtenues sont similaires ($60 \mu\text{m}^2$ environ). Les autres hypothèses envisagées portent sur le changement sur la forme du contact, ou une baisse de la surface de N-GaN disponible pour injecter les porteurs.

Les conséquences de cette baisse d'injection électrique sur les performances optiques et sur le rendement sont ensuite étudiées. Les courbes de luminance en fonction de la tension et du courant sont présentées figure IV-26. Les résultats montrent une forte baisse de la luminance avec le LOT 4. En particulier, plus la tension augmente et plus la différence de luminance augmente entre les lots 3 et 4. D'autre part, l'étude en fonction du courant montre que la luminance est environ 5 fois plus faible sur toute la gamme de courant (figure IV-26.b).

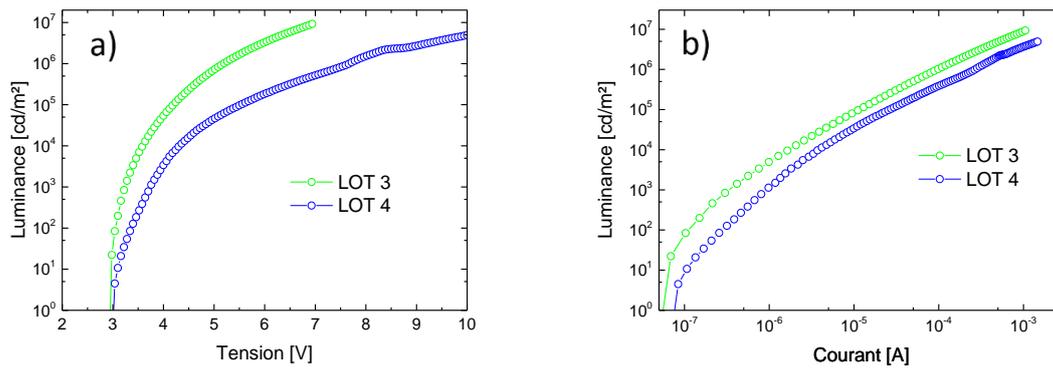


Figure IV-26 : comparaison de la luminance en fonction a) de la tension et b) du courant pour des micro-LED du LOT 3 et LOT 4

L'effet de la baisse de la luminance à une tension donnée est attribué à la conjonction de deux effets. Le premier est la baisse du courant injecté, observée figure IV-24, que nous avons attribué à une dégradation du contact N. Le second est une efficacité moins bonne à courant donné (figure IV-26.b). Cette baisse d'efficacité peut être attribuée à une moins bonne injection des porteurs dans les puits, mais l'hypothèse d'une baisse du rendement quantique interne du wafer utilisé n'est pas à exclure.

Les courbes du rendement EQE de micro-LED des lots 3 et 4 sont présentées figure IV-27, en fonction du courant et de la tension. La chute du rendement avec le LOT 4 est importante, passant d'environ 7% à 3%.

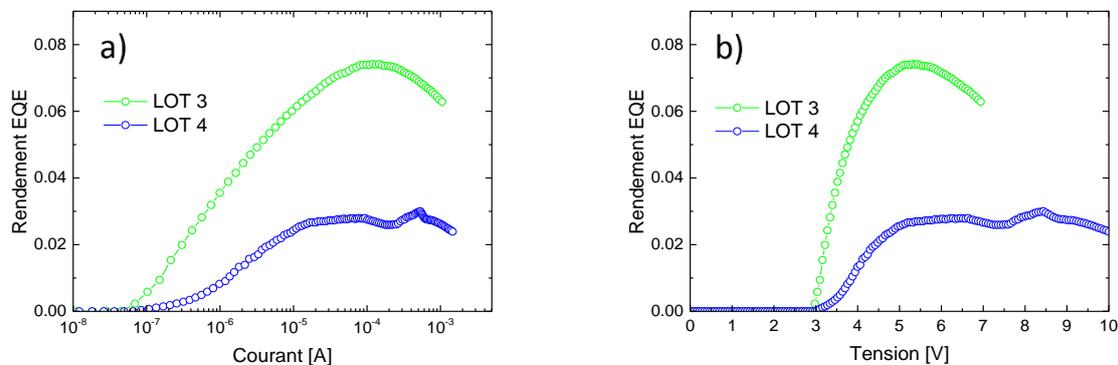


Figure IV-27 : rendement EQE de micro-LED en matrice des lots 3 et 4

De nombreuses hypothèses peuvent expliquer la baisse de rendement observée. La première concerne une augmentation du coefficient de recombinaison SRH qui dégrade le rendement à faible densité de courant. Afin d'évaluer cette hypothèse, nous procédons à des mesures de cathodoluminescence (CL) sur des micro-LED des LOT 3 et LOT 4. Les cartographies d'intensité de CL obtenues sont présentées figure IV-28, ainsi qu'un profil d'intensité pour une micro-LED de chaque lot.

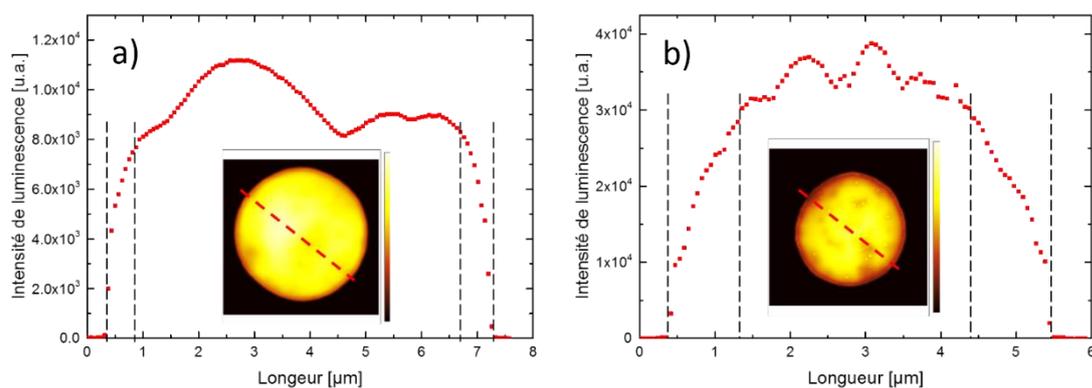


Figure IV-28 : profil d'intensité de cathodoluminescence du a) LOT 3 et b) LOT 4

Dans le cas du LOT 3, la zone dégradée en bords de pixel est de l'ordre de 500 nm, tandis qu'elle est de l'ordre de 1 μm pour le LOT 4. Cette étude indique que la gravure du LOT 4 dégrade plus fortement les bords de pixel, entraînant plus de défauts non-radiatifs nuisant au rendement des LED. Ainsi, la baisse du rendement observée sur le LOT 4 semble attribuée en partie à une augmentation des défauts de type SRH sur les bords de pixel, due à un temps de gravure plus long pour graver le GaN sur toute son épaisseur.

La seconde hypothèse, permettant d'expliquer le faible rendement à forte densité de courant, est un échauffement de la LED à forte densité de courant qui participe à la baisse du rendement [7] [8] [9].

Enfin, une dernière hypothèse porte sur une baisse de l'extraction lumineuse. En effet, la réflectivité du contact N entourant la diode est de l'ordre de 85%. Dans le cas d'une gravure totale du GaN, les rayons lumineux peuvent être réfléchis plusieurs fois sur le contact N avant d'être extraits et l'intensité lumineuse est ainsi réduite à chaque réflexion.

Bien qu'il soit difficile de conclure sur les causes exactes de la baisse du rendement EQE, le nouveau procédé de fabrication réalisé doit être optimisé afin d'améliorer le rendement des micro-LED. Les principales voies d'amélioration concernent une optimisation de la passivation des bords de pixels et une augmentation de la réflectivité du métal N.

En conclusion de cette étude, la gravure totale du GaN permet de supprimer le cross-talk, et doit permettre à terme d'améliorer fortement l'extraction lumineuse en l'associant au retrait du saphir et à l'ajout de structures visant à améliorer l'extraction. Il apparaît en revanche que la gravure totale du GaN entraîne une dégradation du fonctionnement de la diode. En particulier, l'injection électrique à forte tension est dégradée, ce qui peut être lié au changement du contact N. D'autre part la courbe du rendement en fonction du courant subit une forte baisse. L'hypothèse d'une augmentation du taux de recombinaisons non-radiatives de type SRH sur les bords de pixel due à une gravure plus longue est principalement avancée.

En résumé, bien que l'objectif initial de suppression du cross-talk soit réalisé, les performances électro-optiques sont fortement dégradées. De nouvelles améliorations du procédé de fabrication sont à l'étude pour permettre d'améliorer le compromis extraction lumineuse / cross-talk optique.

IV.4 Etudes et caractérisations de micro-écrans LED

IV.4.1 Réalisation et fonctionnement de micro-écrans à matrice active

La dernière étude de ce manuscrit porte sur l'étude des micro-écrans LED à matrice active obtenus au cours de la thèse. Afin de réaliser un écran, un réseau de μ LED est connecté à un circuit d'adressage permettant ainsi de contrôler individuellement chaque diode. Nous avons vu au chapitre 1 que dans le cas des micro-écrans à matrice active, un circuit CMOS constitue le circuit d'adressage. La technologie d'hybridation par micro-tubes développée au CEA LETI de Grenoble [10] [11] permet la connexion du réseau de diodes et du circuit CMOS au pas de $10\ \mu\text{m}$. Le principe consiste à faire croître des micro-tubes sur un circuit CMOS et des plots d'hybridation sur le réseau de LED (cf. chapitre 2). L'assemblage du réseau de diodes et du CMOS permet de réaliser un écran à matrice active. Un schéma explicatif et une observation MEB sont présentées figure IV-29.

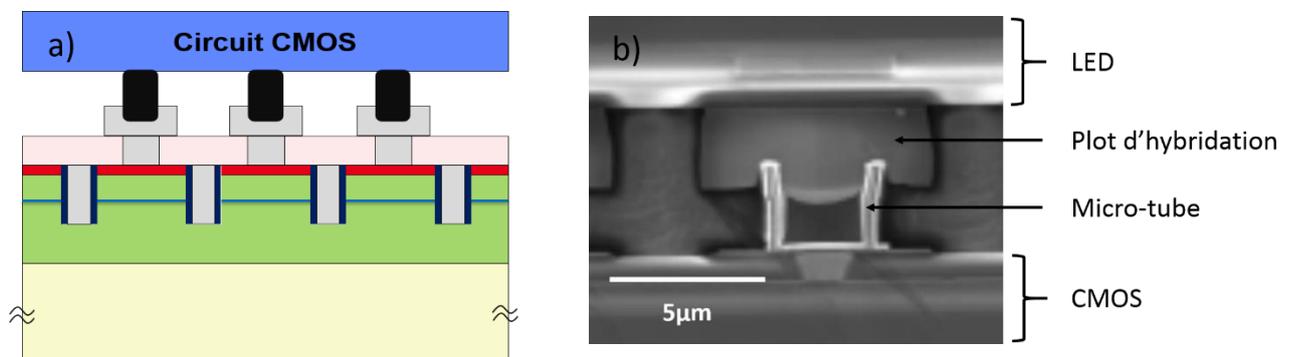


Figure IV-29 : a) schéma en coupe de l'hybridation d'un circuit CMOS et d'un réseau de micro-LED
b) observation MEB de l'hybridation d'un micro-tube dans un plot d'hybridation

Une photographie d'un micro-écran obtenu après hybridation et assemblage sur une carte mère de pilotage est présentée figure IV-30. L'écran fait environ 1 cm de diagonale. Il est constitué de 873×500 μ LED de $8\ \mu\text{m}$ de diamètre au pas de $10\ \mu\text{m}$.

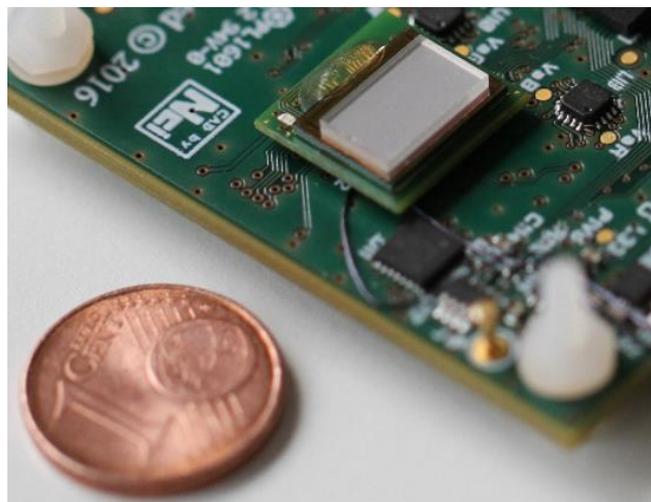


Figure IV-30 : photographie d'un micro-écran LED à matrice active

Les écrans à matrice active réalisés utilisent un circuit d'adressage constitué de 2 transistors et 1 capacité pour chaque pixel. Ce circuit d'adressage, appelé 2T1C, est classiquement utilisé pour l'adressage d'écrans émissifs (figure IV-31).

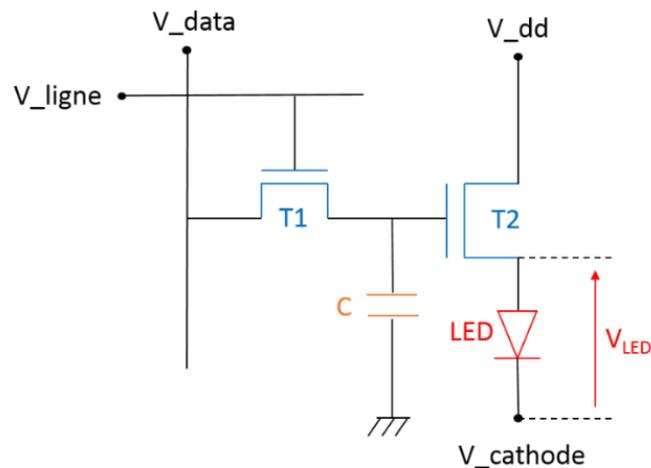


Figure IV-31 : adressage typique 2T1C utilisé dans les écrans émissifs

Le premier transistor (T1) sélectionne la ligne à allumer. Lorsque la ligne est sélectionnée, la tension souhaitée (V_{data}) est transmise et sert de tension de grille au second transistor (T2) qui contrôle la tension aux bornes de la diode. La tension V_{dd} est la source du transistor T2. Le signal V_{data} est stocké dans la capacité (C), de sorte que la tension aux bornes de la LED soit maintenue pendant la durée de rafraîchissement de l'écran.

Dans la suite de ce chapitre, les performances des micro-écrans LED obtenus au cours de la thèse seront étudiées (luminance, directivité, homogénéité, etc.). L'objectif n'est pas de concevoir ou d'étudier le circuit électronique d'adressage, mais d'analyser le fonctionnement d'un réseau de micro-LED dans le cadre d'une utilisation dans un écran à matrice active.

IV.4.2 Performances des micro-écrans LED

IV.4.2.a *Indicatrice en intensité*

La directivité d'émission est un point important dans l'étude des écrans. Dans le cadre des micro-écrans, qui sont associés à une optique de grandissement de l'image, cette caractéristique est d'autant plus importante à étudier pour concevoir le système optique. Par ailleurs, la luminance dépend de l'angle d'émission. Pour un même flux lumineux, plus l'émission est directive et plus la luminance est élevée. C'est donc une étude importante dans l'optique de l'optimisation de la luminance des micro-LED.

Nous procédons à la mesure de l'indicatrice d'émission d'un micro-écran LED. Celui-ci est placé sur un support mobile permettant de modifier son inclinaison. Un spectromètre mesure la luminance de l'écran. La mesure de référence est réalisée lorsque l'écran n'est pas incliné (0°). Les mesures de luminance sont réalisées pour des inclinaisons variant de 0° à 70° . Le point à 80° n'a pas pu être mesuré à cause d'un signal trop faible. Nous considérons qu'à 90° l'intensité est nulle. Les résultats sont présentés figure IV-32.

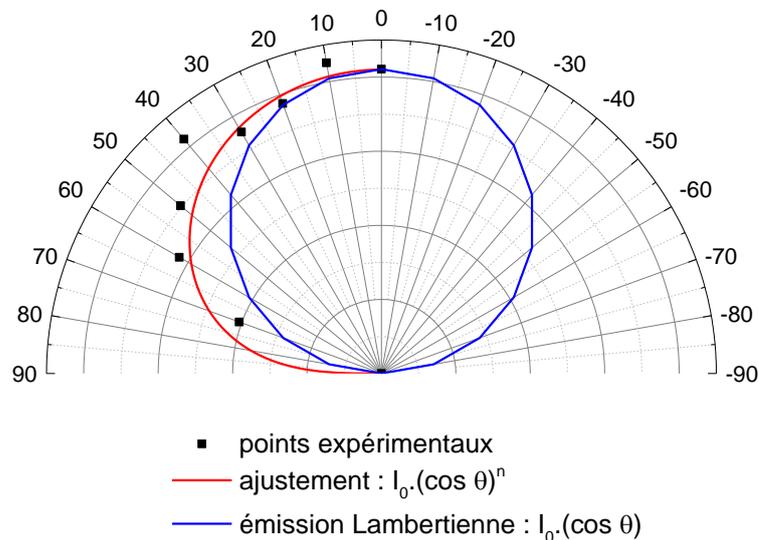


Figure IV-32 : indicatrice d'intensité d'un micro-écran LED

Les points expérimentaux sont ajustés (courbe rouge) avec une loi de la forme :

$$I = I_0 (\cos \theta)^n \quad (IV.5)$$

Dans le cas d'une source de lumière idéale, dite Lambertienne (courbe bleue), la luminance est uniforme angulairement. L'intensité lumineuse dépend de la direction (angle de direction θ par rapport à la normale de la source) et l'indice n est égal à 1.

Nous obtenons ici un indice $n = 0,48$. En d'autres termes, l'émission de l'écran est proche d'une loi Lambertienne, mais elle est moins directive. L'intensité lumineuse pour des angles s'éloignant de la normale (0°) est plus élevée que pour une émission parfaitement Lambertienne. Dans l'optique de la réalisation de micro-écrans très haute luminance, ou pour certaines applications nécessitant une émission très directive, le contrôle de l'indicatrice d'émission est une possible voie d'amélioration des micro-écrans LED.

IV.4.2.b Luminance de l'écran : moyenne, dispersion et taux de fonctionnement

La luminance est une caractéristique importante des écrans. Dans le cadre des micro-écrans LED, il s'agit peut-être de la caractéristique principale puisque cette technologie est étudiée historiquement pour obtenir des niveaux de luminance très élevés, notamment pour la réalité augmentée (chapitre 1).

La luminance des pixels de l'écran est mesurée à l'aide d'une photodiode de mesure placée en regard de l'écran. Les unes après les autres, les LED de l'écran sont allumées puis éteintes. La mesure du photocourant est ensuite échantillonnée pour déterminer la luminance de chaque diode.

Environ 1500 pixels sont ainsi testés, et les résultats obtenus sont présentés figure IV-33.a et comparés aux mesures effectuées à l'échelle du réseau de LED, pour lequel 300 LED ont été caractérisées à 4.5 V avant hybridation (figure IV-33.b).

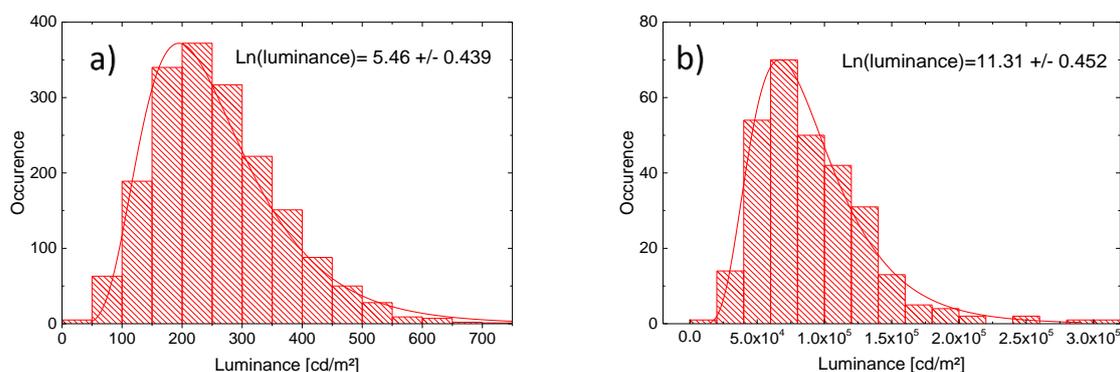


Figure IV-33 : luminance mesurée a) de 1500 pixels d'un micro-écran LED et b) de 300 diodes polarisées en tension avant hybridation

La luminance moyenne des pixels de l'écran est de 250 cd/m². Elle est calculée en considérant la surface totale du pas de pixellisation (10×10 μm²) et la directivité mesurée précédemment. C'est une valeur typique d'un écran traditionnel, mais de plusieurs ordres de grandeur inférieure aux spécifications demandées pour les applications visées, notamment la réalité augmentée.

La luminance obtenue sur le réseau de diodes, polarisées à 4.5 V, est environ 300 fois plus élevée que celle obtenue sur l'écran. Le circuit électronique d'adressage limite donc fortement la luminance des écrans. Nous reviendrons plus tard sur l'explication de cette différence.

La dispersion obtenue à l'échelle de l'écran est assez faible et suit une loi de type lognormale. Environ 95% des diodes sont comprises dans l'intervalle [100-500 cd/m²]. La dispersion à l'échelle de l'écran est similaire à celle obtenue à l'échelle du réseau de LED (figure IV-33.b). Ce résultat indique que le passage du réseau de LED à l'écran à matrice active ne dégrade pas la dispersion.

Le deuxième résultat important à extraire de cette caractérisation est celui du taux de défauts. Les mesures effectuées sur plusieurs lignes de l'écran indiquent qu'en moyenne le taux de diodes non-fonctionnelles est d'environ 0.2%. Cette valeur est similaire au taux de défaut que nous avons estimé avant hybridation sur le réseau de micro-LED bleues, pour lequel nous avons estimé un taux de défaut inférieur ou égal à 1/1000. Il semble donc que l'hybridation par micro-tubes ne dégrade peu ou pas le taux de fonctionnement de l'écran.

En résumé, l'essentiel de la dispersion sur la luminance d'un écran LED est attribuée à la variation du courant injecté dans chaque pixel, comme nous l'avons observé précédemment (figure IV-5). Pour s'affranchir de cette dispersion, une polarisation des pixels en courant est nécessaire. Le montage de type 2T1C utilisé ici ne paraît donc pas adapté aux écrans LED. Un gain important sur la dispersion est attendu avec une polarisation des pixels en courant.

IV.4.2.c Comparaison de matrices de LED bleues et vertes

Les luminances typiques obtenues des écrans bleus et verts sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Couleur de l'écran	Luminance typique (cd/m ²)
Bleu	250
Vert	10000

Tableau IV-1 : luminances typiques de micro-écrans LED bleus et verts obtenus au cours de la thèse

Les écrans verts obtenus sont environ 40 fois plus lumineux que les écrans bleus. Nous nous proposons d'expliquer ce résultat qui peut paraître contradictoire avec les observations faites en III.5.2 où nous avons montré que les LED vertes présentent un rendement plus faible que les LED bleues. Pour cela, des caractérisations I-V-L de μ LED vertes et bleues en matrice sont réalisées.

Les tracés de la puissance optique et de la luminance en fonction du courant sont présentés ci-dessous (figure IV-34).

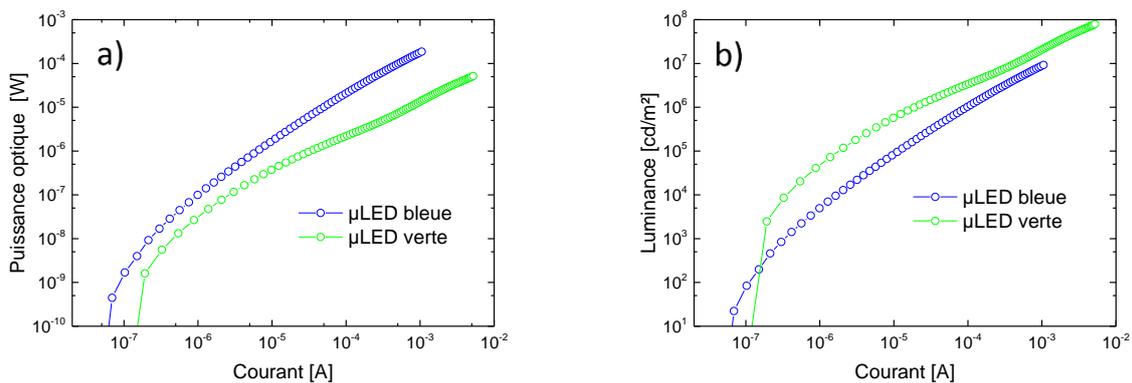


Figure IV-34 : a) puissance optique typique et b) luminance typique de μ LED bleues et vertes en fonction du courant

Les LED vertes présentent une puissance optique (en W) plus faible, ce qui traduit un moins bon rendement quantique interne des épitaxies vertes. En revanche, la luminance des LED vertes est supérieure. En effet, le flux lumineux (en lm) prend en considération la sensibilité de l'œil humain. Celui-ci est environ 30 fois plus sensible au vert (520 nm) qu'au bleu (440 nm).

Cependant, la meilleure sensibilité de l'œil au vert ne permet pas à elle seule d'expliquer la différence de luminance de l'écran. Les courbes du courant en fonction de la tension et de la puissance optique en fonction de la tension sont présentées ci-dessous (figure IV-35).

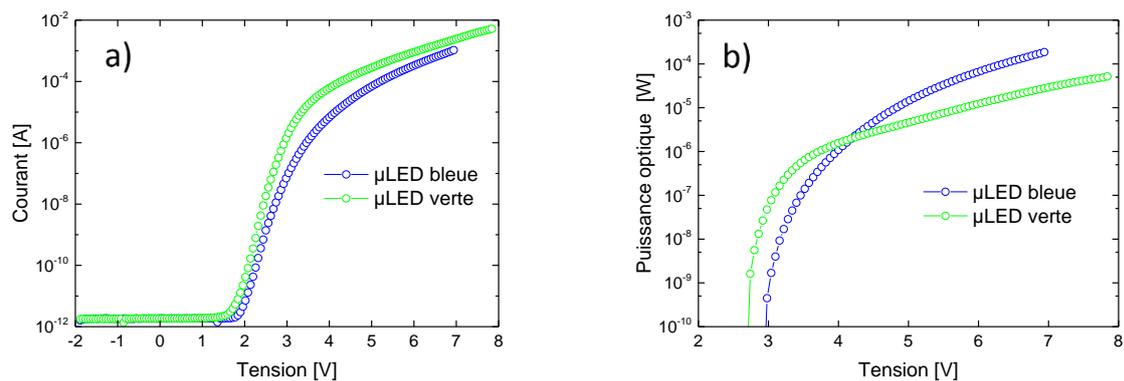


Figure IV-35 : a) courant typique et b) puissance optique typique de μ LED bleues et vertes en fonction de la tension

La tension de seuil électrique d'une LED verte est inférieure à celle d'une LED bleue, et le courant est ensuite plus important sur toute la gamme de tension au-delà du seuil. La compétition entre courant plus élevé et efficacité quantique plus faible est clairement identifiable sur la figure de la puissance optique en fonction de la tension (figure IV-35.b). La tension de seuil optique des LED vertes est inférieure à celle des LED bleues, et la puissance optique est supérieure jusqu'à 4 V. Au-delà de cette tension, les μ LED bleues présentent une puissance optique plus élevée.

Les courbes typiques de la luminance et du rendement en fonction de la tension présentées ci-dessous (figure IV-36) permettent de résumer ces résultats.

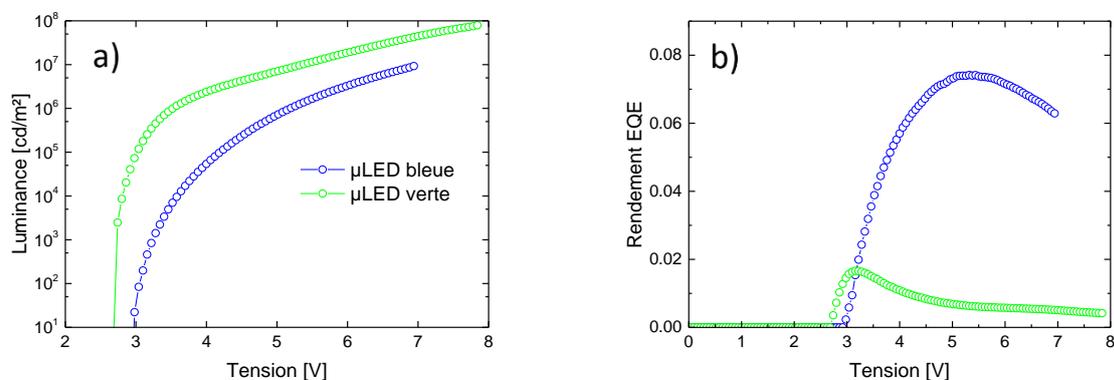


Figure IV-36 : a) luminance et b) rendement typique de μ LED bleues et vertes en fonction de la tension

Malgré un rendement EQE plus faible (2% contre 7%), la luminance d'une μ LED verte est supérieure à celle d'une μ LED bleue. A une tension typique de 4 V (tension estimée aux bornes de la LED de l'écran), la luminance d'une LED verte est 45 fois supérieure à celle d'une LED bleue. Ce résultat est donc en accord avec les mesures de luminance des écrans bleus et verts.

Ainsi, deux phénomènes sont à l'origine de la meilleure luminance des LED vertes, malgré leur rendement inférieur. Le premier est la meilleure sensibilité de l'œil au vert et le second est l'amélioration de l'injection électrique.

IV.4.2.d Résolution et qualité d'image

La définition d'un écran est l'une de ses principales caractéristiques. Elle correspond au nombre de pixels qu'il peut afficher. Dans notre cas, l'écran est constitué de 873X500 LED de 8 μm de diamètre, au pas de 10 μm . La résolution du micro-écran, généralement exprimée en pixel par pouce, est de 2540 ppi (*pixel per inch*). A titre de comparaison, la résolution typique d'un écran traditionnel est de l'ordre de 100 ppi.

La qualité de l'image dépend de nombreux facteurs (couleur, contraste, luminance, etc.). Trois photographies d'un micro-écran bleu à matrice active obtenu au cours de cette thèse sont présentées figure IV-37 afin d'étudier la qualité de l'image obtenue à l'échelle de l'écran.

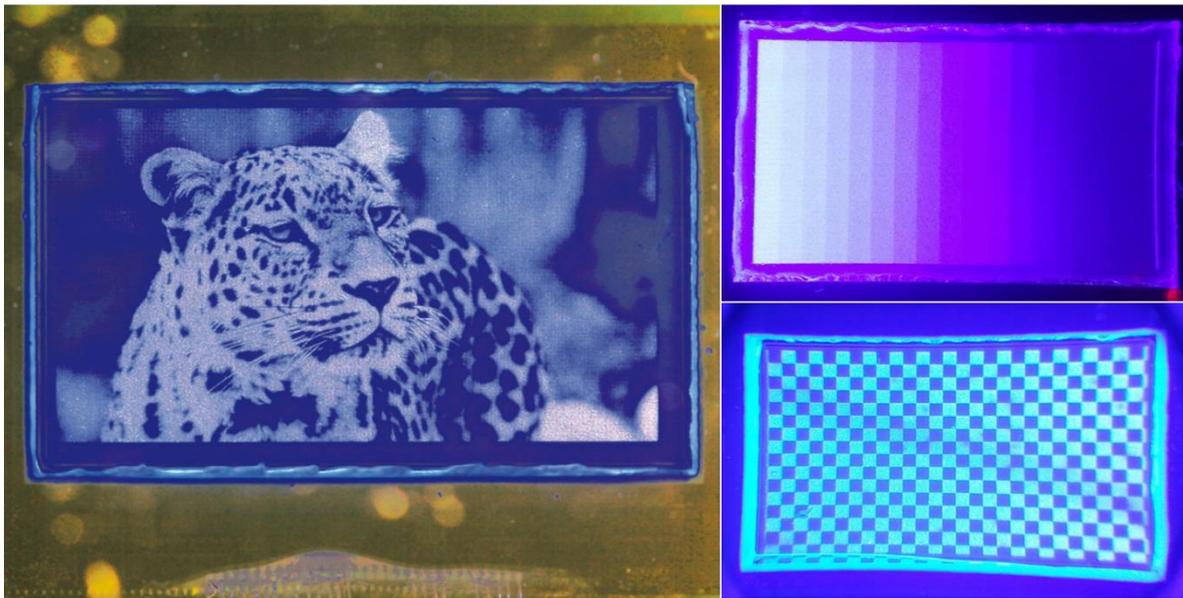


Figure IV-37 : photographies d'un micro-écran LED monochrome à matrice active en fonctionnement

Des écrans fonctionnels ont été obtenus, permettant un affichage en mode image et vidéo à une fréquence de 60 Hz. La qualité d'image obtenue de ces premiers prototypes est bonne et très encourageante. En particulier, l'ensemble des pixels de l'écran sont pilotés, les images obtenues sont nettes et sans défauts apparents. Les niveaux de luminance obtenus (250 cd/m^2) sont suffisants pour une observation directe de l'écran. De plus, une forte modulation de l'intensité lumineuse de chaque pixel est disponible. Nous montrons l'exemple de 16 niveaux de gris sur un même écran.

Il est intéressant de constater que le cross-talk optique et la dispersion étudiés au cours de ce chapitre semblent peu dégrader les performances de l'écran à grande échelle. Les images présentées ici sont en effet obtenues avec des matrices de LED du LOT 3, c'est-à-dire sans gestion du cross-talk optique. Une amélioration de la qualité d'image est donc attendue avec les nouveaux lots réalisés (LOT 4).

Une autre voie importante d'amélioration concerne le circuit électronique d'adressage utilisé. Celui-ci limite la tension aux bornes des LED et le courant qu'il est possible d'injecter. C'est aujourd'hui principalement le circuit électronique d'adressage qui limite la luminance de l'écran. De plus, les LED

sont pilotées en tension, et nous avons vu précédemment qu'un pilotage des pixels en courant est préférable pour améliorer l'homogénéité d'émission. Enfin, une réduction du taux de diodes non-fonctionnelles permettra d'améliorer les performances de l'écran. En effet, notre technologie utilise une cathode commune, de sorte que si quelques pixels sont en courts-circuits, tout l'écran est affecté.

Ainsi, la qualité actuelle des écrans est satisfaisante et des gains importants sont attendus par la suite en optimisant le procédé de fabrication du réseau de micro-LED et le circuit électronique d'adressage.

Les micro-écrans bleus et verts présentés ici (figure IV-38), constitués de 873X500 pixels au pas de 10 μm , sont à l'état de l'art mondial. Ils démontrent la faisabilité du matriçage d'une épitaxie LED pour la réalisation de micro-écrans LED à matrice active.

Les premiers prototypes réalisés présentent de bonnes performances et des gains importants sont attendus dans le futur sur la qualité d'images (suppression du cross-talk, amélioration de l'homogénéité et de la luminance).

L'utilisation de micro-LED est ainsi très prometteuse pour la réalisation de futurs micro-écrans LED plus lumineux, plus résolus et plus économes en énergie.

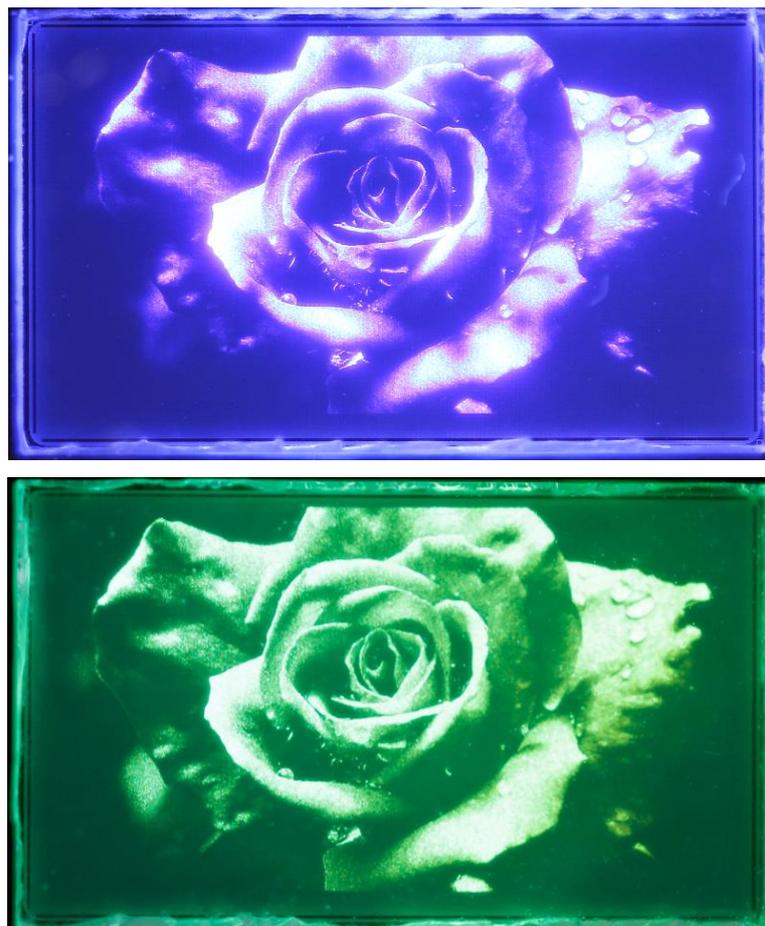


Figure IV-38 : photographies de micro-écrans LED bleus et verts à matrice active au pas de 10 μm

IV.5 Conclusion

Les matrices de micro-LED réalisées au cours de cette thèse présentent de bonnes caractéristiques électro-optiques et un fort taux de fonctionnalité. Les niveaux de luminance sont conformes aux spécifications demandées, notamment pour la réalité augmentée, pour des tensions de l'ordre de 4 V à 5 V. Les différentes sources de dispersion ont été étudiées. La principale source d'inhomogénéité est attribuée à la variation sur le courant injecté dans la diode à forte tension. La modélisation par une résistance série présentant une dispersion de 10% permet de simuler la dispersion mesurée expérimentalement. A plus grande échelle, l'homogénéité de l'épitaxie est une contrainte à prendre en considération.

L'étude du cross-talk optique a permis de mettre en évidence un défi important dans le cadre des micro-écrans à très forte densité de pixels. Une partie du signal optique est émise en dehors du pixel souhaité et nuit ainsi à la qualité de l'image. Une voie d'amélioration a été proposée en gravant l'intégralité du GaN. Le lot testé a permis de valider cette méthode pour supprimer le cross-talk optique, mais une baisse du rendement est observée. Une optimisation du procédé de fabrication est donc en cours pour limiter les défauts engendrés.

D'autre part, le retrait du saphir, associé à des structures de type PSS ou texturation de surface, devrait permettre d'améliorer fortement le rendement. Un gain d'un facteur trois semble réalisable d'après les simulations effectuées. L'extraction lumineuse est le principal frein au rendement de nos diodes. C'est donc un axe d'étude important qu'il conviendra d'étudier avec la miniaturisation du pixel, en particulier le compromis extraction lumineuse / cross-talk optique.

Enfin, les premiers micro-écrans LED à matrice active réalisés au cours de cette thèse ont été caractérisés. Le taux de défaut des pixels est faible, de l'ordre 1/1000, mais peut suffire à créer des courts-circuits qui nuisent au fonctionnement de l'écran. Une meilleure homogénéité d'émission d'un pixel à l'autre et des gains importants sur la luminance de l'écran sont attendus avec une optimisation du procédé de fabrication de micro-LED et l'utilisation d'un circuit électronique d'adressage adapté. Des micro-écrans bleus et verts à matrice active, à l'état de l'art mondial, ont été obtenus au cours de la thèse. Les performances obtenues sont bonnes et très encourageantes pour le développement futur des micro-écrans LED.

IV.6 Références

- [1] D. Zhu *et al.*, "The origin of the high diode-ideality factors in GaInN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 8, p. 081113, Feb. 2009.
- [2] J. M. Shah, Y.-L. Li, T. Gessmann, and E. F. Schubert, "Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors ($n \gg 2.0$) in AlGaIn/GaN p-n junction diodes," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 4, pp. 2627–2630, Jul. 2003.
- [3] A. Daami, "InGaIn/GaN μ LEDs for display applications. optical and electrical characteristics spread comprehension," presented at the The 2017 International conference on Solid State Devices and Materials, Sendai, Japon, 2017.
- [4] E. F. Schubert, *Light-emitting diodes*, 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2006.
- [5] T.-X. Lee, K.-F. Gao, W.-T. Chien, and C.-C. Sun, "Light extraction analysis of GaN-based light-emitting diodes with surface texture and/or patterned substrate," *Opt. Express*, vol. 15, no. 11, p. 6670, 2007.
- [6] C. Weisbuch, M. Piccardo, L. Martinelli, J. Iveland, J. Peretti, and J. S. Speck, "The efficiency challenge of nitride light-emitting diodes for lighting," *Phys. Status Solidi A*, vol. 212, no. 5, pp. 899–913, May 2015.
- [7] D.-S. Shin, D.-P. Han, J.-Y. Oh, and J.-I. Shim, "Study of droop phenomena in InGaIn-based blue and green light-emitting diodes by temperature-dependent electroluminescence," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 15, p. 153506, Apr. 2012.
- [8] D. S. Meyaard *et al.*, "Temperature dependent efficiency droop in GaInN light-emitting diodes with different current densities," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 8, p. 081106, Feb. 2012.
- [9] P. Tian *et al.*, "Temperature-dependent efficiency droop of blue InGaIn micro-light emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 17, p. 171107, Oct. 2014.
- [10] B. G. de Brugière *et al.*, "A 10 μ m pitch interconnection technology using micro tube insertion into Al-Cu for 3D applications," in *2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2011, pp. 1400–1406.
- [11] F. Marion, B. Goubault, A. Bedoin, and H. Ribot, "Aluminum to Aluminum bonding at room temperature," presented at the Proceedings of the 63th Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas 2013, pp. 146–153.

Conclusion générale

" GaN has no future "

Lors de son discours de réception du prix Nobel de physique 2014, Shuji Nakamura rappelle la position quasi-unanime de la communauté scientifique sur les LED à base de nitrure de gallium (GaN) au début des années 1990

Au cours de cette thèse, les principales caractéristiques électro-optiques de réseaux de micro-LED ont été étudiées. L'amélioration du rendement des LED à travers l'optimisation du procédé de fabrication a tout d'abord été étudiée. Trois études principales ont été menées en ce sens.

Tout d'abord, un défaut d'homogénéité d'émission à l'échelle du pixel fut analysé. Les résultats ont conclu à une étape de gravure qui dégradait les performances électriques du P-GaN et favorisait une apparition prématurée du droop. Une optimisation de la gravure permettant de connecter le plot d'hybridation au contact P a permis d'éliminer ce défaut.

D'autre part, l'importance d'une métallisation P optimisée, à travers l'ohmicité et la réflectivité du contact, a été mise en évidence. Une nouvelle métallisation, à base d'argent, a été caractérisée. Ces études ont permis d'optimiser le procédé de fabrication et d'améliorer la compréhension des étapes technologiques qui modifient au premier ordre les caractéristiques électro-optiques des LED obtenues. Un gain important a été obtenu sur les performances des diodes. En particulier, les courants de fuite à faible tension ont été supprimés et la densité de courant de seuil optique diminuée. Le rendement EQE des LED a été fortement amélioré, à faible et à forte densité de courant.

Enfin, le cross-talk optique a été analysé et des solutions ont été proposées pour le réduire. Un nouveau procédé de fabrication, marqué par une gravure complète du GaN, a permis de valider la suppression du cross-talk. Une dégradation du rendement des LED est cependant observée, et attribuée principalement à une dégradation des bords de pixels. Un important travail d'optimisation du procédé de fabrication permettant d'obtenir une suppression du cross-talk et une amélioration de l'extraction lumineuse des LED reste à mener.

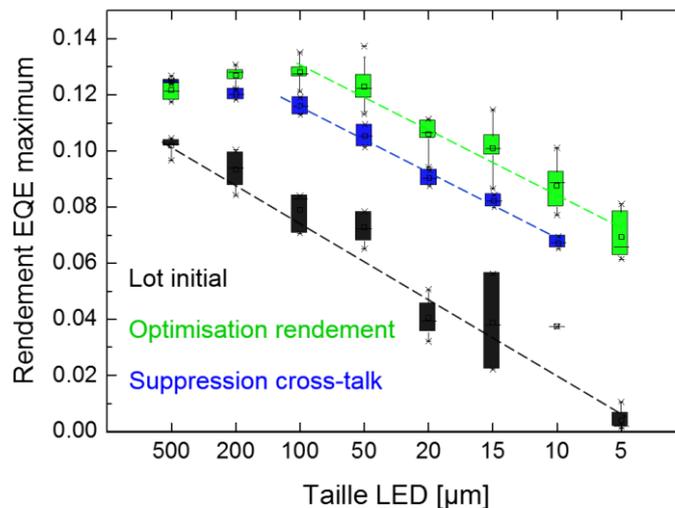
Dans un deuxième temps, l'effet de la taille des LED sur leurs caractéristiques électro-optiques a été analysé. Les courbes de densité de courant en fonction de la tension sont quasi-indépendantes de la taille des diodes et montrent la qualité de notre procédé de fabrication. En revanche, les performances optiques varient fortement avec la taille des diodes. En particulier, plus une diode est petite, plus le seuil optique est décalé vers des tensions et densités de courant élevées. A forte densité de courant, la baisse du rendement, appelée *droop*, limite le rendement des LED indépendamment de leur taille. En conséquence de ces deux effets, le rendement maximum baisse au fur et à mesure que la taille des diodes diminue. De plus, le maximum du rendement est atteint à une densité de courant plus élevée.

Cette baisse du rendement a été étudiée en fonction de la taille des diodes pour les différents lots testés. L'extraction des paramètres du modèle ABC a permis de mettre en évidence un effet périmétrique sur le coefficient de recombinaisons SRH. Un nouveau modèle a été proposé, tenant compte de la géométrie des LED :

$$IQE = \frac{B \cdot n^2}{A \cdot \frac{P}{S} \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3}$$

L'utilisation de ce nouveau modèle permet d'ajuster efficacement les courbes de rendement EQE expérimentales, et de simuler, en première approximation, le rendement de micro-LED de dimension inférieure à 5 µm.

La figure ci-dessous résume le rendement EQE maximum obtenu en fonction de la taille des LED pour les principaux lots caractérisés au cours de cette thèse.



Les études menées ont ainsi permis d'améliorer fortement le rendement et de supprimer le cross-talk optique. Cependant, la baisse du rendement maximum avec la taille des LED est quasi-indépendante du procédé de fabrication utilisé. En d'autres termes, l'efficacité globale a été améliorée, mais la baisse du rendement due à la miniaturisation de la LED est inchangée. Il s'agit ici d'un axe d'étude majeur dans la réalisation de micro-LED haute performance.

Enfin, les courbes de rendement montrent deux domaines très différents, ce qui implique une conséquence importante sur le fonctionnement des micro-LED. A faible densité de courant, donc pour des applications faible luminance, la taille des diodes impacte très fortement leur rendement. En revanche à forte densité de courant, pour des applications très haute luminance, le rendement est quasi-indépendant de la taille des diodes.

Le troisième axe de recherche porte sur l'étude des diodes en tant que réseau bidimensionnel permettant la formation d'images. Les caractéristiques de micro-LED pixellisées au pas de 10 μm ont été présentées. Les résultats obtenus montrent que les propriétés électro-optiques de micro-LED en matrice sont semblables aux micro-LED unitaires. Des luminances de l'ordre de 10^4 cd/m^2 à 10^5 cd/m^2 , nécessaires pour adresser les nouveaux marchés haute luminance, sont obtenues pour des tensions de l'ordre de 4 V et des courants de l'ordre de 1 μA à 10 μA . Le maximum du rendement, obtenu pour des tensions de l'ordre de 5 V, est en moyenne de 6,5%.

Par ailleurs, des mesures de dispersion ont été réalisées, au niveau de l'épithaxie et du procédé de fabrication. Les résultats montrent une dispersion modérée, tant au niveau du procédé de fabrication qu'à l'échelle de l'épithaxie. La dispersion à grande échelle semble principalement due à l'inhomogénéité de l'épithaxie, tandis qu'à petite échelle, elle est attribuée au procédé de matriçage. L'étude des effets de dispersion est sans doute un axe de recherches important pour la réalisation d'écrans présentant une très bonne qualité d'images. D'autre part, le taux de fonctionnalité obtenu est de l'ordre de 99,9% et dénote la maîtrise de notre procédé de fabrication.

Enfin, les micro-écrans LED réalisés au cours de cette thèse ont été étudiés. La faible luminance obtenue est principalement attribuée aux défauts de fabrication et à un circuit d'adressage non-optimisé. Malgré ces défauts, nous avons obtenu et caractérisé des micro-écrans LED fonctionnels, bleus et verts, à l'état de l'art mondial présentant de bonnes qualités d'image.

Ces travaux de thèse permettent par ailleurs d'identifier les principales voies d'amélioration envisagées dans l'optique de la réalisation de micro-écrans LED à matrice active pour des applications haute luminance.

La principale étude à mener concerne l'étude des bords de pixel. Ils agissent comme des centres de recombinaison non-radiatifs et dégradent fortement le rendement des micro-LED, principalement à faible densité de courant. Deux solutions sont alors envisagées. La première consiste à améliorer la passivation de la jonction pour réduire le nombre de recombinaisons non-radiatives. La seconde vise à empêcher les porteurs d'atteindre les bords de pixel, avec par exemple des contacts n'occupant qu'une partie de la surface du pixel, ou une modification des propriétés électriques de la LED sur sa périphérie pour que les porteurs n'atteignent pas les bords de pixel.

La deuxième voie d'amélioration du rendement concerne l'optimisation de l'extraction lumineuse. Nous avons vu qu'elle constitue le principal frein au rendement des LED. Plus particulièrement, la gestion du compromis entre extraction lumineuse et cross-talk optique deviendra une problématique de plus en plus importante à mesure que la densité de pixels augmente. Des outils de simulation plus adaptés que la méthode du tracé de rayons semblent nécessaires, en particulier pour les micro-LED de dimension proche ou inférieure au micromètre.

Par ailleurs, il serait intéressant de décorrélérer précisément les principales composantes du rendement EQE en fonction de la taille des diodes. Le développement de nouvelles méthodes d'analyse permettant de déterminer l'injection, le rendement IQE et l'extraction lumineuse pour chaque taille de diode constituerait une avancée importante vers une meilleure compréhension des phénomènes physiques en jeu.

D'autre part, la réduction du taux de diodes non-fonctionnelles est une problématique importante. Un meilleur contrôle du procédé de fabrication doit permettre d'améliorer le fonctionnement de l'écran. La dernière voie d'amélioration concerne l'adressage électronique de l'écran. Une électronique optimisée devrait permettre d'améliorer les résultats obtenus (sur la luminance et l'homogénéité d'émission). En revanche, des questions restent posées sur la faisabilité d'une électronique permettant de drainer des courants élevés sur des surfaces réduites, et sur le budget thermique de l'ensemble.

A l'issue de cette thèse, nous pouvons identifier différentes perspectives à plus long terme dans le domaine des micro-écrans LED.

La diminution du pas de pixellisation est une tendance importante. Elle doit permettre de diminuer la taille de l'écran (à définition constante) ou d'adresser de nouveaux marchés (réalité virtuelle, systèmes multi-vues, etc.). Pour cela un travail important de recherches est à mener, tant sur le réseau de LED que le circuit électronique d'adressage. En particulier, la baisse du rendement avec la miniaturisation du pixel apparaît comme une contrainte fondamentale à résoudre.

La réalisation d'écran couleur est une étape importante vers une possible industrialisation des micro-écrans LED. Pour cela, la conversion de la couleur est une solution en cours d'étude. Une lumière bleue incidente de haute énergie peut être convertie en lumière verte ou rouge. L'utilisation de phosphores, quantum-dots ou de puits quantiques est à l'étude. Ces solutions doivent cependant

pouvoir être pixellisées à un faible pas de pixellisation, et supporter des puissances optiques importantes. De plus, la question du rendement de conversion de ces structures ainsi que de leur durée de vie reste posée.

Enfin, l'amélioration des épitaxies est une voie importante, voire primordiale, pour le développement des micro-écrans LED. Les principales attentes concernent l'homogénéité des performances électro-optiques à l'échelle du wafer (rendement IQE, longueur d'onde d'émission, résistance de contact, etc.), la réduction du droop, grâce par exemple à des plans de croissance non-polaires, et enfin la gestion de la couleur. La réalisation de LED rouges, vertes et bleues sur une même épitaxie constituerait un graal en vue de la réalisation de micro-écrans LED couleur.

Les recherches à mener sur les LED GaN sont encore nombreuses, mais les perspectives pour la réalisation d'écrans et de micro-écrans LED sont très encourageantes. Les prototypes obtenus au cours de cette thèse démontrent la faisabilité de l'utilisation de réseaux de micro-LED pour la réalisation de micro-écrans. Après leur adoption massive pour l'éclairage, les LED GaN semblent aujourd'hui promises à un bel avenir dans le domaine des écrans.

Liste des publications de l'auteur

Publications :

Electro-optical size-dependance investigation in GaN micro-LED devices, Daami *et al.*, *SID Symp. Dig. Tech.* – to be published (2018)

High-resolution, active-matrix, 10 μm pixel-pitch GaN LED microdisplays for augmented reality applications, Templier *et al.*, *Proceedings of SPIE* 10556 (2018)

Schockley-Read-Hall and Auger non-radiative recombination in GaN based LEDs : A size effect study, Olivier *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 111, 022104 (2017)

Influence of size-reduction on the performances of GaN-based micro-LEDs for display application, Olivier *et al.*, *J. Lumin.* 191, 112-116 (2017)

Investigation and improvement of 10 μm pixel-pitch GaN-based micro-LED arrays with very high brightness, Olivier *et al.*, *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 48, 353-356 (2017)

Processing and characterization of high-resolution GaN/InGaN LED arrays at 10 micron pitch for micro display application, Dupré *et al.*, *Proceedings of SPIE* 10104 (2017)

GaN-based emissive microdisplays : a very promising technology for compact, ultra-high brightness display systems, Templier *et al.*, *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 47, 1013-1016 (2016)

Conférences scientifiques :

Investigation and improvement of 10 μm pixel-pitch LEDs micro-LED arrays with very high brightness, Olivier *et al.*, SID 2017, Los Angeles, présentation orale

Influence of size-reduction on the performances of GaN-based LEDs, Olivier *et al.*, E-MRS 2016, Lille, présentation poster

Extraction lumineuse dans un réseau 2D de micro-LED, Olivier, JNRDM 2016, Toulouse, présentation orale

Résumé

Le domaine des écrans est en pleine mutation. De nouvelles technologies d'écrans (principalement LCD et OLED) ont remplacé l'écran à tube cathodique du XX^e siècle et ouvrent la voie vers de nouvelles fonctionnalités (écran 3D, flexible, transparent). Depuis quelques années, un genre particulier d'écran fait l'objet de nombreuses recherches, notamment pour adresser de nouveaux marchés tels que la réalité augmentée : les micro-écrans. Pour cela, les contraintes technologiques sont fortes. L'écran doit être miniature (quelques millimètres de diagonale) tout en permettant une qualité d'image semblable aux écrans traditionnels. Il doit aussi être compact, économe en énergie et très lumineux. Une nouvelle technologie d'écran est à l'étude depuis quelques années et doit permettre d'atteindre ces spécifications. Il s'agit des micro-écrans LED, constitués d'un réseau de LED micrométriques, dans lequel chaque diode constitue un pixel de l'image. L'objectif de cette thèse est d'étudier les spécificités des matrices de LED en nitrure de gallium (GaN) en vue de leur utilisation dans des micro-écrans.

Les recherches menées au cours de cette thèse portent sur trois axes d'étude. Le premier concerne l'optimisation du rendement à travers l'étude du procédé de matricage d'une épitaxie LED. Les améliorations apportées ont permis d'augmenter le rendement d'un facteur 10 sur les micro-LED. Le deuxième axe de travail concerne l'étude des effets de taille. La réduction de la taille des LED entraîne une forte baisse du rendement maximum. Les études menées ont permis de conclure à des recombinaisons non-radiatives sur les bords de pixel. Le troisième axe de recherche porte sur l'étude des micro-LED en tant que réseau bidimensionnel permettant la formation d'images. Les principales sources d'inhomogénéité et de dispersion ont été étudiées. Des solutions ont été proposées pour éliminer le cross-talk optique et améliorer l'extraction lumineuse, principal frein au rendement de nos micro-LED. Enfin, des micro-écrans LED fonctionnels, bleus et verts, à l'état de l'art mondial ont été obtenus et caractérisés au cours de cette thèse.

Abstract

The display industry is facing a fast transformation. New technologies (mainly LCD and OLED) have faded-out the cathode ray tube of the 20th century and lead to new applications (3D, flexible and transparent displays). A very particular type of display has recently emerged to address new markets, such as augmented reality: micro-displays. They can be defined as having a diagonal of around 1 inch or less. One important goal of these micro-displays is to deliver the same image quality as conventional, larger-size displays. Strong challenges arise in terms of definition, compactness, consumption and brightness. To address these, LED micro-displays are currently being studied. In a LED micro-display, a 2D-array of micro-LEDs is fabricated, where each LED acts as a single pixel of a whole image. The main objective of this thesis work is to study the specifics of gallium nitride (GaN) micro-LEDs arrays for micro-display applications.

Our investigations have been carried out focusing on three major areas of study. Increasing LED efficiency through the study of our fabrication process was the first goal. By improving P metal and enhancing P-GaN electrical performances, we were able to increase efficiency of micro-LED by a factor of 10. The influence of size-reduction on the performances of LEDs have then been thoroughly investigated. As LED size decreases, its maximum efficiency drops. Non-radiative recombination occurring at the edges of the LED were found to be the main origin. We have then studied LEDs, not as a single diode, but as a dense 2D array of micro-LEDs allowing image display, and optical and electrical spread have been investigated. Furthermore, optical cross-talk has been studied and fabrication was changed to address this issue. New structures have also been suggested to improve light extraction efficiency, which is one of the main hindrance towards high-efficiency micro-LEDs. Finally, state-of-the-art active matrix micro-LED displays have been obtained and characterized during the course of this thesis work.