

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>Chapitre 1. Diodes électroluminescentes : état de l’art des technologies GaN</b> . . . . .	<b>13</b>
1.1. Contexte économique actuel . . . . .	14
1.1.1. Marché global des LED . . . . .	14
1.1.2. Enjeux sociétaux et marché des LED GaN pour l’éclairage public . . . . .	17
1.2. Etat de l’art des LED à base de nitrure de gallium . . . . .	24
1.2.1. Les nitrures : de la structure wurtzite aux ingénieries de bandes . . . . .	24
1.2.1.1. Structure wurtzite et propriétés physiques des matériaux nitrure . . . . .	25
1.2.1.2. Ingénieries de bandes et structures de base . . . . .	26
1.2.1.3. Substrats et dopants usuels pour le nitrure de gallium . . . . .	30
1.2.2. Diodes électroluminescentes à base de GaN . . . . .	32
1.2.2.1. Etat de l’art des avancées technologiques des LED GaN « puce nue » . . . . .	32
1.2.2.2. Etat de l’art des assemblages de LED GaN . . . . .	38
1.2.2.3. Structures des LED GaN étudiées . . . . .	48
1.3. Positionnement, justification et objectifs de l’étude . . . . .	49
1.3.1. Positionnement et justification de l’étude . . . . .	49
1.3.2. Objectifs de l’étude . . . . .	53
1.4. Conclusion . . . . .	57

<b>Chapitre 2. Outils et méthodes d'analyse de LED encapsulées . . .</b>	<b>59</b>
2.1. Méthodologies de mesure de la température de jonction . . . . .	60
2.1.1. Méthode électrique . . . . .	62
2.1.1.1. Banc de mesures . . . . .	62
2.1.1.2. Principe de la méthode électrique et modèles associés . . . . .	63
2.1.2. Méthode optique . . . . .	66
2.1.3. Synthèse de la méthodologie et des paramètres thermiques . . . . .	67
2.2. Mécanismes et modèles électriques d'une LED . . . . .	69
2.2.1. Banc de mesures courant-tension $I(V)$ . . . . .	69
2.2.2. Phénomènes de transport électronique. . . . .	71
2.2.2.1. Effet thermoélectronique – ETE . . . . .	74
2.2.2.2. Effet tunnel assisté par effet thermique – ETT . . . . .	75
2.2.2.3. Effet tunnel – ET . . . . .	76
2.2.2.4. Paramètres électriques d'une LED GaN . . . . .	76
2.3. Mécanismes et modèles optiques d'une LED . . . . .	77
2.3.1. Banc de mesures de puissance optique . . . . .	77
2.3.2. Modèle de la puissance optique. . . . .	78
2.3.2.1. Principe de luminescence des matériaux semi-conducteurs. . . . .	80
2.3.2.2. Pertes par réflexion. . . . .	81
2.3.2.3. Pertes par absorption. . . . .	82
2.3.2.4. Puissance optique totale. . . . .	84
2.3.3. Banc de mesures spectrales . . . . .	85
2.3.4. Phénomènes de transitions électroniques d'une LED DH . . . . .	87
2.3.4.1. L'émission spontanée . . . . .	88
2.3.4.2. Le gain optique . . . . .	90
2.3.4.3. L'effet Stark. . . . .	90
2.3.5. Paramètres optiques d'une LED DH. . . . .	92
2.3.6. Phénomènes de transitions électroniques d'une LED MPQ . . . . .	94
2.3.7. Paramètres optiques d'une LED MPQ. . . . .	97
2.4. Caractérisations physicochimiques d'une LED. . . . .	97
2.4.1. Techniques de préparation d'échantillon . . . . .	99
2.4.1.1. Principe d'une microsection . . . . .	99
2.4.1.2. Préparation d'une LED « puce nue » . . . . .	101
2.4.2. Analyses nucléaires. . . . .	102
2.4.2.1. Spectroscopie de masse d'ions secondaires . . . . .	102
2.4.2.2. Analyse par diffusion Rutherford . . . . .	104
2.4.2.3. Résonance magnétique nucléaire proton . . . . .	106
2.4.2.4. Spectrométrie de masse (MALDI-TOF) . . . . .	108

2.4.3. Analyses électroniques . . . . .	110
2.4.3.1. Analyse par rayons X induits par faisceaux de particules . . .	111
2.4.3.2. Microscopie électronique à balayage . . . . .	112
2.4.3.3. Spectroscopie électronique à rayons X . . . . .	114
2.4.4. Analyses optiques . . . . .	115
2.4.4.1. Réflexion totale atténuée . . . . .	115
2.4.4.2. Spectroscopie Raman . . . . .	116
2.4.4.3. Spectre de fluorescence . . . . .	118
2.4.4.4. Diffraction à rayons X . . . . .	119
2.4.5. Analyse en température : calorimétrie différentielle à balayage . . .	121
2.4.6. Synthèse des analyses physicochimiques . . . . .	122
2.5. Conclusion . . . . .	124

### Chapitre 3. Méthodologie d'analyse de défaillance

<b>de LED bleues . . . . .</b>	<b>127</b>
3.1. Profil de mission et vieillissement . . . . .	128
3.1.1. Définition du composant . . . . .	128
3.1.2. Contraintes environnementales et facteurs d'accélération . . . . .	129
3.2. Campagne de vieillissement . . . . .	130
3.2.1. Cahier des charges des vieillissements accélérés . . . . .	130
3.2.2. Campagne de vieillissement . . . . .	131
3.2.2.1. Banc de mesures électriques et optiques : aspects métrologiques . . . . .	131
3.2.2.2. Analyses électro-optiques : vérification des paramètres électriques et optiques donnés par le fabricant . . . . .	134
3.2.2.3. Analyses de la structure et des matériaux du composant encapsulé . . . . .	134
3.3. Caractérisations initiales des LED : aspects électriques et optiques . . .	135
3.3.1. Description technologique des LED . . . . .	135
3.3.1.1. LED à multipuits quantiques (MPQ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ . . . . .	135
3.3.1.2. Structure du boîtier d'encapsulation . . . . .	136
3.3.2. Extraction des paramètres électro-optiques des LED . . . . .	139
3.3.2.1. Modèles électriques équivalents des LED et valeurs typiques . . . . .	139
3.3.2.2. Modèles optiques des LED et valeurs typiques . . . . .	139
3.4. Application de la méthodologie sur les LED à faible puissance . . . . .	150
3.4.1. Impact des vieillissements sur la puissance optique . . . . .	150
3.4.2. Signatures électriques de défaillance . . . . .	151

3.4.3. Signatures optiques de défaillance . . . . .	153
3.4.4. Confirmation des mécanismes de défaillance : analyses physicochimiques . . . . .	154
3.5. Synthèse des résultats et conclusion . . . . .	164

**Chapitre 4. Intégration de la méthodologie dès la conception d'un composant . . . . . 167**

4.1. Profil de mission pour l'éclairage public . . . . .	168
4.1.1. Contexte et objectifs du projet . . . . .	169
4.1.2. Exigences et contraintes environnementales dans l'éclairage public . . . . .	170
4.1.3. Technologies étudiées . . . . .	172
4.2. Campagne de vieillissement et description des composants . . . . .	173
4.2.1. Cahier des charges de la campagne de vieillissement. . . . .	173
4.2.2. Description technologique des LED . . . . .	174
4.2.2.1. LED de puissance à structure MPQ InGaN/GaN . . . . .	174
4.2.2.2. Structure et procédés d'assemblage . . . . .	175
4.3. Analyses physiques de défaillance . . . . .	177
4.3.1. Localisation des zones dégradées : signatures de défaillance électro-optiques et thermiques . . . . .	177
4.3.1.1. Signatures optiques et thermiques des LED sans luminophore. . . . .	179
4.3.1.2. Signatures optiques et thermiques des LED avec luminophore . . . . .	184
4.3.2. Validation des mécanismes de défaillance par l'exploitation des analyses physicochimiques. . . . .	196
4.3.2.1. Analyse de fluorescence de l'huile silicone sans luminophore. . . . .	196
4.3.2.2. Analyse de fluorescence et diffraction X de l'huile silicone avec luminophore . . . . .	206
4.3.3. Solutions technologiques . . . . .	214
4.4. Synthèse des résultats et conclusion . . . . .	215

**Conclusion. . . . . 217**

**Bibliographie . . . . . 223**

**Index . . . . . 235**