



**HAL**  
open science

**FIABILITE DE DIODES LASER DE FORTE  
PUISSANCE 808 nm MICROASSEMBLEES POUR  
DES APPLICATIONS SPATIALES: Approche  
expérimentale et modélisations par éléments finis**

Othman Rehioui

► **To cite this version:**

Othman Rehioui. FIABILITE DE DIODES LASER DE FORTE PUISSANCE 808 nm MICROASSEMBLEES POUR DES APPLICATIONS SPATIALES: Approche expérimentale et modélisations par éléments finis. Electronique. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2011. Français. NNT: . tel-00674044

**HAL Id: tel-00674044**

**<https://theses.hal.science/tel-00674044>**

Submitted on 24 Feb 2012

**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

PRÉSENTÉE A

## L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

Par **Othman, REHIOUI**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : ELECTRONIQUE

### **FIABILITE DE DIODES LASER DE FORTE PUISSANCE 808 nm MICROASSEMBLEES POUR DES APPLICATIONS SPATIALES : Approche expérimentale et modélisations par éléments finis**

Directeur de recherche : Pr. BECHOU, Laurent

Soutenue le : 14 juin 2011

Devant la commission d'examen formée de :

M. BECHOU, Laurent	Professeur, Université de Bordeaux	Examineur
M. CASSIDY, Daniel T	Professeur, Université de McMaster (Canada)	Membre invité
M. FOUILLAT, Pascal	Professeur, Université de Bordeaux	Président du jury
M. GILARD, Olivier	Dr. Ingénieur, CNES (Toulouse)	Membre invité
M. KOHL, Andreas	Dr. Ingénieur, Quantel Laser (les Ulis-Paris)	Examineur
M. LANDESMAN, Jean-Pierre	Professeur, Université de Nantes	Rapporteur
M. MARIE, Xavier	Professeur, INSA Toulouse	Rapporteur
M. OUSTEN, Yves	Professeur, Université de Bordeaux	Examineur

# REMERCIEMENT

---

---

# TABLES DES MATIERE

---

<b>REMERCIEMENT</b>	<b>2</b>
<b>TABLES DES MATIERE</b>	<b>1</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>5</b>
<b>Chapitre I. Etat de l’art de la diode laser de puissance</b>	<b>11</b>
<b>I. Introduction</b>	<b>11</b>
<b>II. Diodes laser de puissance</b>	<b>12</b>
II.1. <i>Champs d'application</i>	12
II.2. <i>Marché des diodes lasers de puissance</i>	16
II.3. <i>Barrettes de diodes laser</i>	18
II.3.a. Description technologique	18
II.3.b. Etape de fabrication des barrettes de diodes laser	19
<b>III. Rappels sur le fonctionnement d’un laser à Semiconducteur</b>	<b>23</b>
III.1. <i>Laser à semiconducteur</i>	23
III.1.a. Mécanismes de recombinaison des porteurs	24
III.1.b. Oscillation laser	25
III.1.c. Courant de seuil	26
III.2. <i>Diode laser à hétérostructure</i>	27
III.3. <i>Diode laser à puits quantique</i>	28
III.4. <i>Etats des photons dans une diode laser</i>	29
<b>IV. Contraintes mécaniques dans les diodes laser</b>	<b>31</b>
IV.1. <i>Effet des contraintes mécaniques sur la structure de bandes</i>	31
IV.1.a. Contrainte hydrostatique	32
IV.1.b. Contrainte bi-axiale	33
IV.2. <i>Contraintes mécaniques intrinsèques</i>	34
IV.3. <i>Contraintes mécaniques extrinsèques</i>	34
IV.4. <i>Degré de polarisation : Définition et méthodologie de mesure</i>	37
IV.4.a. Mesure par électroluminescence	37
IV.4.b. Degré de polarisation de la photoluminescence	37
<b>V. Contexte et objectifs de la thèse</b>	<b>38</b>
<b>VI. Configuration des composants étudiés</b>	<b>41</b>
VI.1. <i>DLPs pour le régime quasi-continu</i>	42
VI.1.a. Mono barrette QCW	42
VI.1.b. Composant multi barrettes (Stack QCW)	43
VI.2. <i>DLPs pour le régime continu (CW)</i>	44
VI.3. <i>Conclusion</i>	45

---

<b>VII. REFERENCES</b> .....	<b>47</b>
<b>Chapitre II. Caractérisation émetteur par émetteur</b> .....	<b>49</b>
<b>I. Introduction</b> .....	<b>49</b>
<b>II. Synthèse bibliographique</b> .....	<b>49</b>
II.1. <i>Micro Photoluminescence (<math>\mu</math>PL)</i> .....	50
II.2. <i>Spectroscopie par photo-courant (PCS)</i> .....	52
II.3. <i>Synthèse</i> .....	54
<b>III. Caractérisation globale des diodes laser de puissance</b> .....	<b>54</b>
III.1. <i>Bancs de caractérisation globale des DLPs</i> .....	54
III.1.a. <i>Caractéristiques optiques</i> .....	55
III.1.b. <i>Paramètres électro-optiques</i> .....	56
III.2. <i>Contrôle visuel</i> .....	58
<b>IV. Caractérisation individualisée par émetteur</b> .....	<b>59</b>
IV.1. <i>Banc de caractérisation émetteur par émetteur</i> .....	59
IV.1.a. <i>Diagramme de rayonnement des émetteurs</i> .....	60
IV.1.b. <i>Description du banc de caractérisation</i> .....	61
IV.2. <i>Influence de la température et du courant sur les grandeurs électro-optiques</i> .....	65
IV.2.a. <i>Puissance optique des émetteurs</i> .....	65
IV.2.b. <i>Spectre optique</i> .....	66
IV.2.c. <i>Degré de polarisation</i> .....	69
IV.3. <i>Répétabilité des mesures</i> .....	73
IV.3.a. <i>Ecart-type des paramètres mesurés</i> .....	73
IV.3.b. <i>Conditions de mesures des barrettes</i> .....	75
IV.4. <i>Synthèse</i> .....	75
<b>V. Mesures initiales des composants</b> .....	<b>75</b>
V.1. <i>Mono-barrette QCW</i> .....	76
V.2. <i>Impact des contraintes d'assemblage en architecture empilée "Stack"</i> .....	77
V.2.a. <i>Stack QCW en mode TE</i> .....	77
V.2.b. <i>Stack QCW en mode TM</i> .....	80
V.3. <i>Mono barrette CW</i> .....	82
V.3.a. <i>Barrette CW en mode TE : report direct</i> .....	83
V.3.b. <i>Barrette CW en mode TE : report avec intermédiaire CuW</i> .....	84
V.3.c. <i>Impact du report direct sur la polarisation de Barrette TM</i> .....	85
<b>VI. Conclusion</b> .....	<b>87</b>
<b>VII. REFERENCES</b> .....	<b>89</b>
<b>Chapitre III. Modélisations thermiques et mécaniques des DLPs - Approche expérimentale</b> 91	
<b>I. Introduction</b> .....	<b>91</b>
<b>II. Conditions de modélisation</b> .....	<b>91</b>
II.1. <i>Définition du modèle</i> .....	92
II.2. <i>Conditions sur le maillage</i> .....	92

---

---

II.3.	<i>Conditions aux limites</i>	93
<b>III.</b>	<b>Modélisations thermiques</b>	<b>93</b>
III.1.	<i>Ecoulement thermique</i>	94
III.2.	<i>Simulation thermique du composant mono-barrette QCW</i>	95
III.2.a.	Description du modèle	95
III.2.b.	Etude de la réponse transitoire	97
III.3.	<i>Synthèse des simulations thermiques</i>	103
<b>IV.</b>	<b>Simulation mécanique de l'assemblage des composants QCW</b>	<b>103</b>
IV.1.	<i>Rappels théoriques</i>	104
IV.2.	<i>Impact du type de matériau des dissipateurs</i>	105
IV.2.a.	Description du modèle	106
IV.2.b.	Résultats de simulation	108
IV.3.	<i>Synthèse</i>	117
<b>V.</b>	<b>Evaluation et validation expérimentale des contraintes mécaniques</b>	<b>118</b>
V.1.	<i>Techniques de mesure des contraintes</i>	118
V.2.	<i>Résultats expérimentaux de la photoluminescence polarisée</i>	119
V.2.a.	Mono-barrette en régime QCW	119
V.2.b.	Mono-barrette en régime CW	121
V.3.	<i>Synthèse</i>	122
<b>VI.</b>	<b>Influence des contraintes mécaniques sur les paramètres électro-optiques</b>	<b>122</b>
VI.1.	<i>Description expérimental</i>	122
VI.2.	<i>Résultats expérimentaux</i>	123
VI.2.a.	Courbure de la barrette - "Smile"	124
VI.2.b.	Paramètres électro-optiques des émetteurs	125
VI.3.	<i>Synthèse</i>	128
<b>VII.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>128</b>
<b>VIII.</b>	<b>REFERENCES</b>	<b>130</b>
<b>Chapitre IV.</b>	<b>Evaluation de la fiabilité opérationnelle et optimisation des composants QCW</b>	<b>131</b>
<b>I.</b>	<b>Introduction</b>	<b>131</b>
<b>II.</b>	<b>Rappel sur les modes génériques de dégradation des diodes laser</b>	<b>132</b>
II.1.	<i>Mode de dégradation graduel</i>	132
II.2.	<i>Mode de dégradation rapide</i>	133
II.3.	<i>Mode de dégradation catastrophique</i>	134
<b>III.</b>	<b>Evaluation de la fiabilité des composants mono-barrette QCW</b>	<b>135</b>
III.1.	<i>Composant QCW en architecture "standard"</i>	135
III.1.a.	Description du banc de vieillissement	135
III.1.b.	Conditions du test de vieillissement	136
III.1.c.	Résultats de vieillissement accéléré en contraintes échelonnées	136
III.2.	<i>Méthodologie d'extraction d'un indicateur précoce de défaillance</i>	139
III.2.a.	Présentation de la méthodologie	139
III.2.b.	Application au composant QCW standard	141

---

---

III.2.c. Relation comportement (DOP, $\lambda_{\max}$ ) – mécanismes de défaillance-----	143
III.3. <i>Impact de l'optimisation technologique sur la fiabilité de la DLP</i> -----	146
III.3.a. Description du composant optimisé-----	146
III.3.b. Validation de la méthodologie de sélection-----	148
III.4. <i>Synthèse</i> -----	151
<b>IV. Optimisation et évaluation des Stacks QCW</b> -----	<b>151</b>
IV.1. <i>Description des Stacks QCW</i> -----	152
IV.1.a. Technologie des Stacks étudiés-----	152
IV.1.b. Influence des conditions de report utilisées-----	153
IV.2. <i>Analyse des résultats avant vieillissement</i> -----	159
IV.2.a. Répartition des signatures visuelles de dégradation prématurée -----	159
IV.2.b. Répartition des émetteurs dans le plan ( $\lambda_{\max}$ ,DOP) -----	160
IV.2.c. Caractéristiques ( $\lambda_{\max}$ ,DOP) globales des barrettes -----	160
IV.3. <i>Impact du vieillissement en configuration "Stack"</i> -----	161
IV.3.a. Conditions des tests de vieillissement -----	161
IV.3.b. Résultats de vieillissement des Stacks-----	161
IV.3.c. Analyse de l'impact du vieillissement accéléré -----	163
IV.4. <i>Synthèse des résultats</i> -----	169
<b>V. Mono-barrettes QCW à très forte puissance - 150W</b> -----	<b>170</b>
V.1. <i>Descriptif technologique des composants</i> -----	170
V.2. <i>Paramètres électro-optiques des émetteurs</i> -----	171
V.2.a. Variations des paramètres électro-optiques dans les composants-----	171
V.2.b. Répartition statistique dans le plan ( $\lambda_{\max}$ ,DOP) -----	172
V.3. <i>Résultats du test de vieillissement accéléré</i> -----	173
V.3.a. Description du banc de test -----	173
V.3.b. Analyse des courbes de vieillissement globales -----	173
V.3.c. Analyse des émetteurs de chaque barrette -----	174
<b>VI. Conclusion</b> -----	<b>176</b>
<b>VII. Références</b> -----	<b>178</b>
<b>Conclusion générale</b> -----	<b>179</b>
<b>Annexe - A : Données matériaux</b> -----	<b>180</b>
<b>Annexe - B : Champs proches des Stacks étudiés</b> -----	<b>181</b>
<b>Liste des publications</b> -----	<b>184</b>
<b>Résumé</b> -----	<b>185</b>

---

# Introduction générale

---

Les barrettes de diodes laser de puissance (DLP) d'une largeur typique d'1cm, étudiées dans cette thèse, sont commercialisées pour produire de la puissance optique cohérente dans le proche infrarouge (808nm). La barrette de DLP se présente comme une juxtaposition de plusieurs diodes laser élémentaires (appelées émetteurs) fonctionnant en parallèle. Le nombre, la largeur et le pas des émetteurs sont étroitement corrélés à l'application visée. Les performances de ces composants sont fortement dépendantes de l'architecture de la zone active de la diode laser, du processus de fabrication de la barrette et du packaging dans son ensemble. Les DLPs sont généralement utilisées en régime continu (CW) ou en régime pulsé (QCW) en fonction des applications.

Les domaines d'application de tels composants microassemblés sont essentiellement le pompage de laser solide, mais d'autres domaines d'application sont adressés comme le traitement des matériaux (Aluminium,...) par recuit thermique, leur usinage, le médical, le spatial... Dans le cadre de ce dernier environnement, l'augmentation des performances électro-optiques des DLPs est à l'origine de l'émergence et des progrès de nombreuses techniques de télédétection par voie Laser encore appelée Lidar, acronyme pour "détection et estimation de la distance par ondes lumineuses" (ou "*Light Detection and Ranging*"); domaine d'application visé par ces travaux de thèse menés en collaboration entre le Laboratoire IMS et la société Quantel Laser Diode.

Le Lidar spatial, a été proposée pour la première fois dans les années 60 [1], et il aurait été difficilement imaginable qu'il devienne un outil incontournable pour l'exploration terrestre et l'étude des planètes du système solaire. De manière identique aux radars électroniques, utilisant des impulsions radiofréquences, le Lidar émet des impulsions optiques interagissant avec les différents milieux traversés par la lumière. Une partie de cette onde est ensuite rétrodiffusée puis collectée par le télescope du Lidar. Ces systèmes acquièrent des données précises sur les autres objets du système solaire et peuvent même recueillir des données sur la météo martienne. A partir d'une orbite terrestre basse, le Lidar peut également analyser et quantifier le retrait des glaciers et le mouvement des nuages. Dans un futur proche, la technologie Lidar pourra générer un profil tridimensionnel des vents terrestres qui constituera, à court terme, un élément essentiel pour la météorologie et, à plus long terme, un contributeur fort pour les futurs modèles prévisionnels de changements climatiques.



Le premier Laser intégré au sein d'un Lidar spatial se basait sur un laser solide à rubis, mais depuis les années 1970, le Laser Nd: YAG pompé par DLP à 808nm, est devenu la source Laser privilégiée. Rappelons que le principe du pompage optique consiste à faire passer un système atomique de son état fondamental à son état excité par une source optique externe appelée "pompe". Le pompage par DLPs du Nd: YAG offre un net avantage par rapport au pompage par lampes-flash du fait de l'étroite largeur spectrale (~1,5nm) de l'émission laser des DLPs, qui est inférieure à la largeur de la bande d'absorption du cristal dopé. A partir de sa fréquence fondamentale (1064nm) et des raies obtenues par doublage (532nm), triplage (354,7nm) et quadruplage de fréquence (266nm), il peut détecter des particules libérées par des aérosols et des surfaces macroscopiques. Dans les domaines de la météorologie, de la géologie et même des études forestières, les systèmes Lidar aéroportés et spatiaux se complètent mutuellement en terme de temps de couverture au sol et de champ de vision.

De façon générale, un instrument destiné à fonctionner en environnement spatial doit démontrer, au sol, une durée de vie dépendante du profil de mission, intégrer une électronique de pilotage durcie aux radiations et doit être qualifié pour résister aux contraintes environnementales considérées comme sévères: fortes vibrations lors du lancement, amplitudes importantes de variation de température et ultravide. Les systèmes Lidar pour le spatial doivent obligatoirement démontrer des performances supérieures aux systèmes aéroportés ou au sol en raison de la différence d'altitude. En effet, les performances du Lidar diminuent avec l'inverse du carré de la distance entre l'instrument et la surface de la cible. Le Lidar aéroporté pourrait voler à 10km d'altitude mais les systèmes spatiaux sont mis en orbite à des altitudes s'étendant de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres. Compte tenu de la loi du carré inverse, les systèmes Lidar spatiaux doivent donc être  $10^3$  à  $10^4$  fois plus performants que ceux intégrés dans les systèmes aéroportés ou au sol. Dans ce contexte, le Lidar spatial doit émettre un faisceau plus énergétique (ex. 125-150mJ à 100Hz) nécessitant un pompage optique à 808nm en régime impulsif QCW (100Hz/200µs) effectué par plusieurs DLPs à une puissance optique globale de l'ordre de 10kW et régulée à une température de 25°C.

Les caractéristiques actuelles des barrettes de diodes laser sont le résultat de nombreuses innovations depuis l'avènement des premiers lasers, à homo-jonction p-n, obtenus en 1962 par Robert N. Hall. En particulier le passage au début des années 80, de laser à semi-conducteur avec des couches épaisses (qqz 100nm) à des diodes laser intégrant des couches ultra-minces de 5 à 30nm, a permis d'obtenir des performances record pour le courant de seuil, les rendements électro-optiques et la stabilité en température des composants. Dès lors, il est devenu possible de développer des barrettes de DLPs dont les caractéristiques sont toujours plus impressionnantes puisque le record actuel obtenu en laboratoire en terme de puissance délivrée par une barrette de DLP, d'1cm de largeur émettant à 940nm, avoisine 1 kW à 35°C en régime continu [2].

Néanmoins, la fiabilité opérationnelle des DLPs reste encore un facteur limitatif de leurs performances et de leur mise sur le marché. Une synthèse bibliographique montre que le travail d'analyse de la fiabilité des DLPs, utilisées en environnement spatial, se scinde en deux axes :

- d'une part, un travail peut être mené avec comme objectif d'augmenter la robustesse des performances électro-optiques des barrettes de DLPs
- d'autre part, on peut chercher à améliorer les règles de design du dispositif microassemblé et les conditions de report en vue d'accroître la durée de vie opérationnelle dans un contexte de fiabilité construite.

Notre travail de thèse se focalisera principalement sur ce second axe. en apportant, tout d'abord, des éléments probants permettant d'analyser et améliorer les caractéristiques électro-optiques des émetteurs de barrettes microassemblées. Notre démarche se poursuivra en discutant les résultats des tests de vieillissement accéléré avec comme objectif d'extraire un indicateur précoce de défaillance basé sur les caractéristiques électro-optiques initiales des émetteurs.

La dernière phase liée à la fabrication des DLPs regroupe l'ensemble des procédés de packaging et d'assemblage. Le travail décrit dans cette thèse a pour objectif de détailler certaines étapes du packaging, jugées comme critiques, des barrettes Laser. Nous essaierons de comprendre et d'optimiser les facteurs susceptibles de limiter les performances et surtout la fiabilité des DLPs. Cet effort requiert l'utilisation de techniques d'analyse physique permettant de qualifier ces procédés. A cet effet, nous proposerons une méthodologie originale qui permettra de caractériser individuellement chaque émetteur dans les barrettes et d'évaluer les contraintes mécaniques résiduelles présentes dans le semi-conducteur après les différentes étapes de report. Elle contribuera à pallier aux limitations des méthodologies basées sur une analyse globale des paramètres électro-optiques et souvent mises en défaut pour des interprétations approfondies des défaillances de diodes laser ne présentant pas de signatures de dégradation visuelles. Une nouvelle approche d'évaluation de la fiabilité des barrettes de diodes Laser assemblées, associée à une optimisation de leur report, sera ainsi présentée dans un objectif de garantir des durées de vie supérieures à  $4 \times 10^9$  tirs pour une puissance optique de 100W/barrette en régime QCW (100Hz/200 $\mu$ s) à 25°C.

Les caractéristiques électro-optiques et la fiabilité d'une barrette de DLP dépendent à la fois de la température de jonction, du courant d'injection et des contraintes mécaniques résiduelles. La maîtrise de ces paramètres est donc une condition fondamentale pour améliorer les performances de ces composants. Leur optimisation passe par l'usage de matériaux mécaniquement adaptés au type du semi-conducteur constituant la structure de la barrette et un processus d'assemblage adapté aux facteurs géométriques cette dernière. Ainsi, on cherchera à diminuer la résistance thermique et à atténuer les contraintes mécaniques résiduelles induites par le packaging. L'influence de ces contraintes a été largement abordée par plusieurs auteurs de référence [5-9] et elles sont à l'origine de

la dégradation des DLPs qui peut se présenter sous trois modes génériques : graduel, rapide, et catastrophique [3]. M. Fukuda a montré que la dégradation peut se produire dans la cavité ou au niveau des facettes et que chaque mode de dégradation présente sa propre signature et des défauts différents peuvent être associés à chacun de ces modes [4]. L'analyse physique des contraintes mécaniques résiduelles et des modes de dégradation nécessitent des techniques de caractérisation physique souvent très lourdes, complexes à mettre en œuvre et très coûteuses donc difficilement exploitables dans un contexte de qualification industrielle de composants.. Parmi ces techniques, citons par exemple la micro photoluminescence ( $\mu$ PL) [5], la spectroscopie par photo-courant (PCS) [6], le courant induit par faisceau laser (LBIC) [7], la microscopie par électroluminescence (ELM) [8] et la microscopie par photoluminescence (PLM) [9]. C'est la raison pour laquelle la possibilité de prédire de manière précoce les éventuelles dégradations à travers une technique industrialisable est une voie particulièrement prometteuse, susceptible d'éviter des études expérimentales systématiques à chaque saut technologique. En particulier, nous montrerons la relation entre les dégradations et les paramètres électro-optiques initiaux des émetteurs ainsi que leurs dérives dans le temps.

Dans ce contexte global, ce travail de thèse s'articulera autour de quatre grands chapitres :

- L'état de l'art établi dans le **premier chapitre** permettra d'appréhender les technologies liées à la diode laser de puissance : du semi-conducteur au composant assemblé. Le domaine de la diode laser requiert une bonne connaissance à la fois des principes physiques de fonctionnement d'un laser à semi-conducteur et des techniques utilisés pour l'assemblage des DLPs.
- Le **deuxième chapitre** s'attachera à décrire et à étudier la métrologie d'un banc dédié de caractérisations électro-optiques à l'échelle de l'émetteur individualisé. La synthèse bibliographique a permis d'analyser les enjeux liés au développement de cette nouvelle technique, qui offre la possibilité, pour un courant injecté dans la barrette, d'obtenir le profil des variations de la puissance optique émise, du spectre optique et du degré de polarisation le long de la barrette.
- Le **troisième chapitre** porte sur la modélisation de l'échauffement de la barrette assemblée ainsi que la modélisation mécanique des différentes étapes de réalisation des composants QCW mono-barrette. Notre démarche contribuera au développement de modèles 2D/3D permettant respectivement d'apporter des informations pertinentes sur les transferts de chaleur lors du fonctionnement en régime QCW et les contraintes mécaniques résiduelles générées lors du processus d'assemblage. Ces résultats seront mis en corrélation avec ceux obtenus au 4<sup>ème</sup> chapitre afin d'interpréter les signatures de défaillance mises en évidence après les tests de vieillissement accéléré. Ces contraintes mécaniques résiduelles seront évaluées au moyen de cartographies du

degré de polarisation (DOP) par les techniques d'électroluminescence et de photoluminescence; action menée en collaboration avec l'équipe de D.T. Cassidy (Université Mac Master, Canada) et d'autre part, nous évaluerons expérimentalement l'impact de contraintes mécaniques, appliquées au niveau de la barrette, sur les paramètres électro-optiques des émetteurs.

- Le **quatrième et dernier chapitre** est consacré à l'analyse des résultats de vieillissement de composants QCW, réalisés avec des dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ , de type mono-barrette et multi-barrette (Stack). La réalisation de ces composants nécessite de prédire au mieux leurs durée de vie ( $>4 \times 10^9$  tirs) afin de réduire les essais technologiques nécessaires pour obtenir des composants à haute fiabilité. L'objectif principal de ce chapitre résidera dans la mise en place d'une méthodologie originale de tri des émetteurs fiables et dans l'extraction d'un indicateur précoce de défaillance des DLPs QCW. Cette méthodologie sera appliquée à trois groupes de DLPs émettant à 808nm en mode TE. Le premier groupe, sur lequel se centre l'étude, sera le véhicule test constitué d'une barrette 100W de 25 émetteurs. L'autre groupe abordera le composant multi-barrettes ("Stack") constitué de plusieurs barrettes émettant à 808nm en QCW et qui sera utilisé pour le pompage optique de Laser solide (YAG) dans le cadre du projet ESA de Lidar spatial ATLID. Nous terminerons ce chapitre par l'application de cette méthodologie à des barrettes de forte puissance (150W) en régime QCW.
- Enfin, la conclusion effectuera une synthèse de l'ensemble des résultats et des perspectives de travail seront avancées.

---

## REFERENCES

---

- [1] G. Fiocco and L.D. Smullin, "*Optical echoes from moon*", Nature, Vol. 194, Issue: 4835, p. 1267 (1962).
- [2] Li, H. Chyr, I. Brown, D. Jin, X. Reinhardt, F. Towe, T. Nguyen, T. Srinivasan, R. Berube, and M. Miller, R. "*Ongoing development of high-efficiency and high-reliability laser diodes at Spectra-Physics*" , Proc. SPIE, Vol. 6456, p. 64560C-3 (2007).
- [3] J. Jiménez, "*Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes*", C. R. Physique, Vol. 4, pp. 663-673 (2003).
- [4] M. Fukuda ,"*Reliability and degradation of semiconductor lasers and LEDs*", Artech House, Boston, 1991.
- [5] Jean-Pierre Landesman, "*Micro-photoluminescence for the visualisation of defects, stress and temperature profiles in high-power III–V's devices*", Materials Science and Engineering B, V 91-92, pp. 55-61, (2002).
- [6] K. H. Herrmann, Hessa Al-Otaibi and J. W. Tomm, "*Photocurrent spectroscopy of QW GRIN laser structures*", Materials Science and Engineering B, V 74, Issues 1-3, pp. 61-65, (2000).
- [7] Tran Quoc Tien, Axel Gerhardt, Sandy Schwirzke-Schaaf, Jens W. Tomm, M. Pommiès, M. Avella, J. Jiménez, Myriam Oudart, and Julien Nagle, "*Screening of high-power diode laser bars by optical scanning*", Appl. Phys. Lett., p. 87, (2005).
- [8] R. Xia, E.C. Larkins, I.Harrison, S.R. A. Dods, A.V. Andrianov, J. Morgan, and J.P. Landesman "*The effect of mounting-induced strain and defect on the properties of AlGaAs 808 nm LDs*", Synthetic Metals, Vol. 127, pp. 255-259, (2002).
- [9] S. Bull1, A.V. Andrianov, I. Harrison, and E. C. Larkins "*The study of strain and defects in high power laser diodes by spectroscopically resolved photoluminescence microscopy*", Eur. Phys. J. Appl. Phys. 27, pp. 469-473, (2004).

# Chapitre I. Etat de l'art de la diode laser de puissance

---

## I. Introduction

Au cours de la dernière décennie, la puissance optique émise, et parallèlement la durée de vie pour une large gamme de laser à semi-conducteur de puissance, a été multipliée par dix, conduisant à des niveaux de puissance pouvant être supérieures à 400W par barrette en fonction de la longueur d'onde d'émission et de la technologie d'assemblage utilisée. Les longueurs d'onde disponibles sont de plus en plus exhaustives dans le rouge et l'infrarouge (de 650 à 2000nm). A moyen terme, on peut espérer voir apparaître des lasers émettant dans l'orange, et certainement à plus long terme, une couverture totale du spectre de l'ultraviolet (UV) à l'infrarouge (IR) en passant par le visible. Ces diodes gagnent en compacité et présentent des durées de vie de plus en plus étendues mais dont les distributions restent encore relativement peu resserrées. A ces niveaux de puissance, la bibliographie montre qu'une haute efficacité électro-optique est à présent obtenue afin de réduire les effets thermiques.

La fiabilité des diodes laser de puissance (DLPs) est devenue un paramètre crucial, d'autant plus que les lasers sont utilisés avec des profils de mission de très longues durées et en environnement parfois sévère (spatial). La fiabilité est considérée comme restant le facteur clé conditionnant l'usage universel des DLPs et l'augmentation des rendements de production industrielle. L'analyse de la dégradation électro-optique et physique de ces composants constitue donc un point majeur qui doit permettre d'optimiser les processus d'assemblage souvent critiques et d'accroître la robustesse des technologies émergentes.

Ce premier chapitre se focalise sur l'état de l'art des DLPs. Il fera l'objet d'une synthèse des différentes applications de la DLP et il permettra également de situer le marché mondial de ces dernières. Ensuite, une description des différents phénomènes physiques abordés dans la thèse sera réalisée en rappelant successivement et brièvement :

- le fonctionnement des lasers à semi-conducteur,
- l'impact des contraintes mécaniques sur la structure des bandes d'énergie des lasers à semi-conducteur III-V,

- la définition du degré de polarisation du rayonnement émis par les diodes laser.

Enfin, nous détaillerons la technologie des différents composants étudiés dans le cadre de la thèse en décrivant en particulier les techniques d'assemblage utilisées.

## **II. Diodes laser de puissance**

### **II.1. Champs d'application**

Les différentes applications des lasers à semi-conducteur peuvent être scindées en considérant deux paramètres : la longueur d'onde et la puissance optique émise. Par exemple, l'enregistrement optique (CD, CD-ROM, DVD, Blu-Ray...) nécessite des lasers émettant à de courtes longueurs d'onde afin d'obtenir un faible diamètre du faisceau pour augmenter la capacité de stockage. Les lasers utilisés dans le domaine des télécommunications regroupent à la fois la transmission d'informations (1300 à 1500nm) et le pompage des amplificateurs optiques (980 et 1480nm). Même si les ventes en Europe, pour ces applications, ont subi une baisse significative ces dernières années, elles constituent néanmoins la part la plus importante du marché actuel des lasers à semiconducteur.

Les DLPs sont utilisées dans différentes applications soit directement ou indirectement comme pompe de laser solide. Le Tableau I.1 présente la longueur d'onde d'émission et les secteurs d'application des DLPs associées [1]. On voit que les DLPs ont trouvé des nouvelles applications dans différents domaines comme le traitement des matériaux, la médecine et l'impression. Cette évolution dans les domaines d'application est principalement liée aux développements technologiques des cristaux laser et des lasers à fibre. C'est l'une des raisons qui a permis aux DLPs de prendre l'avantage comme source de pompage. On note également que la durée de vie des DLPs a joué un rôle significatif dans l'évolution de leurs applications, puisque la durée de vie de la plupart des DLPs s'étend à présent de 10000 à 30000h [2]. En comparaison, la durée de vie des lampes flash de pompage dépasse rarement les 1000h, et la durée de vie du colorant utilisé dans un laser pulsé est de l'ordre de la minute (10 millions de tirs  $\times$  500 $\mu$ s) [3].

$\lambda$ (nm)	Médical	DPSSL <sup>1</sup>	Impression	Traitement matériaux	Défense	Instrumentation	Avionique
630-635, 652, 668	✓						
670		✓					
689, 730	✓						
780 ( $\Delta\lambda \ll 1$ )					✓		
785, 792, 797		✓					
795 ( $\Delta\lambda \ll 1$ )	✓	✓				✓	
805, 808	✓	✓					
810 $\pm$ 10	✓			✓			
830			✓				
852, 868-885		✓			✓		
901		✓					
905						✓	
915	✓	✓					
940	✓	✓		✓			
968, 973-976	✓	✓					
980 $\pm$ 10	✓			✓			
1064	✓						
1330-1380	✓						
1450-1470	✓						
1530-1700	✓				✓		
1850-2200	✓	✓		✓			✓

Tableau I.1- Longueur d'onde d'émission et secteurs d'application des DLPs [1]

Les principales applications des DLPs adressent le traitement des matériaux, le pompage des lasers solides, l'impression laser et le médical. De manière générale, ces applications se répartissent de la façon suivante :

- Traitement des matériaux

L'assemblage des matériaux peut être effectué par la technique du soudage autogène, le brasage et le soudage des métaux. Cette application est essentiellement destinée à l'industrie automobile, basée sur le principe de l'absorption du rayonnement laser émis au niveau de la zone de contact des matériaux à joindre ou bien directement sur le joint utilisé pour l'assemblage, la conversion du rayonnement en chaleur va permettre la fusion de la zone irradiée qui va permettre de joindre, par solidification de la zone en fusion, les matériaux à assembler [4].

- Pompage des lasers solide (DPSSL<sup>1</sup>)

Les diodes laser de puissance émettant autour de 800nm sont principalement utilisées pour le pompage de matériaux laser avec des bandes d'absorption très fortes à cette longueur d'onde. Dans le cas des cristaux dopés avec des ions trivalents de terres rares, cette condition est particulièrement bien satisfaite pour l'ion Nd<sup>3+</sup>. D'autres ions tels que le Tm<sup>3+</sup> et l'Er<sup>3+</sup> nécessite une longueur d'onde autour de 790nm. L'erbium et un certain nombre de cristaux dopés à l'ytterbium sont excités à une longueur

<sup>1</sup> DPSSL : Diode Pumped Solid State Laser

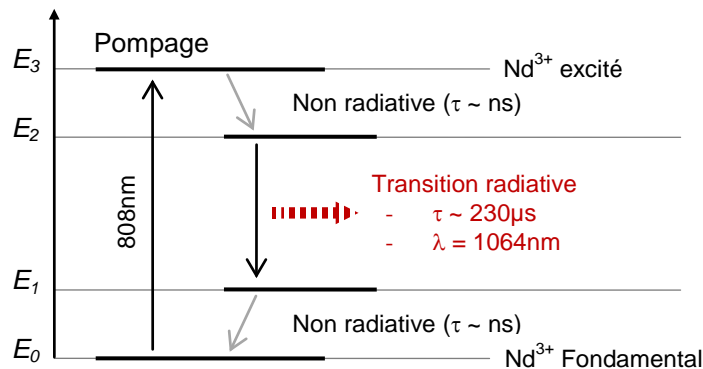


d'onde proche de 970nm. Avec des cristaux laser dopés :  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  ou  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$  et  $\text{Er}^{3+}$  des longueurs d'onde autour de 1, 2 et 3 $\mu\text{m}$  sont disponibles.

Le Nd:YAG reste le laser solide le plus exploité en industrie et il peut être utilisé suivant deux régimes de fonctionnement :

- En régime continu, à des niveaux de puissance de quelques dizaines de watts à plusieurs kilowatts, ce régime de fonctionnement privilégie les effets thermiques pour des applications comme la découpe (technique d'ablation), la soudure...
- En régime quasi-continu, quand les effets mécaniques sont privilégiés pour des applications comme le perçage de céramique, le nettoyage de surface...

L'inversion de population pour ce laser nécessite un pompage à quatre niveaux (Figure I.1). La courte durée de vie sur le niveau métastable  $E_3$ , entraîne une rapide relaxation non radiative vers le niveau intermédiaire  $E_2$ . La relaxation radiative se produit vers le niveau intermédiaire  $E_1$ , métastable, sur lequel la relaxation non radiative se fait vers le niveau fondamental.



**Figure I.1 - Principe de l'inversion de population dans un laser à quatre niveaux (Nd:YAG)**

Le pompage optique peut être réalisé à l'aide de lampes flashs ou par diodes laser à semiconducteur. La distribution spectrale des lampes étant très large par rapport à la bande d'absorption du laser solide (très étroite - Figure I.2), ce pompage induit un faible rendement de conversion du laser. Pour exemple, sur une fraction allant de 25 à 50% du rayonnement émis par la lampe, seul quelques pour-cent sont absorbés par le matériau laser. C'est l'une des raisons pour laquelle les diodes lasers émettant à 808nm, remplacent les lampes flash utilisées pour le pompage optique du Nd:YAG [5] ; le rendement de conversion étant de l'ordre de 30 à 85% suivant la configuration de la cavité laser. Le rendement électrique des diodes étant lui-même bien supérieur à celui des lampes, l'efficacité globale est 100 fois supérieure à celle d'un laser Nd:YAG conventionnelle (pompé par lampes). La consommation électrique est considérablement réduite et le refroidissement par eau ne devient alors plus indispensable [6].

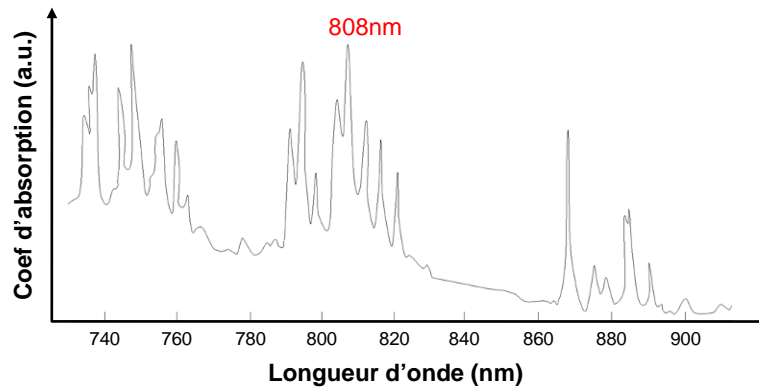


Figure I.2 - Spectre d'absorption du Nd:YAG à température ambiante

- L'impression laser

Actuellement, les systèmes d'impression laser industriels à très haute résolution sont constitués d'une tête d'impression laser contenant un certain nombre de mono-diodes. Dans ce cas, la tête d'impression est composée de diodes laser couplées à des fibres optiques qui sont alignées et disposées sur une ligne de quelques centimètres avec un pas de quelques centaines de micron. L'inconvénient de cette configuration est la dimension spatiale qui est relativement importante, la complexité de la fabrication et les coûts engendrés. De plus, les coûts associés à l'utilisation d'un très grand nombre de mono-diodes laser couplées à des fibres optiques peuvent devenir rapidement inabordables. Donc l'une des solutions rentable et efficace est l'utilisation des barrettes de DLPs. En effet, le développement de barrettes adressables au niveau émetteur a apporté d'énormes avantages à l'industrie de l'impression laser puisqu'elles ont permis la réduction de la taille de la tête d'impression et sa complexité et ceci en garantissant une meilleure qualité d'impression et une plus grande vitesse d'impression en augmentant la fiabilité du système d'impression [7].

- Médical

Les diodes laser de puissance sont beaucoup utilisées dans des applications thérapeutiques, dans la gamme 630-690nm. Parmi les applications les plus importantes, on trouve le traitement du cancer par la thérapie photo-dynamique (PDT), le traitement de la dégénérescence maculaire et de la rétinopathie diabétique par photo-coagulation ainsi que de la prévention secondaire de l'infection dentaire par désinfection photo-dynamique [8]. Les diodes laser trouvent également des applications en cosmétique, dans la gamme 800-1000nm, comme l'épilation, le rajeunissement de la peau et l'élimination des varices. Cette gamme de longueur d'onde est également utilisée pour des soins dentaires et la chirurgie dentaire.

## II.2. Marché des diodes lasers de puissance

Le marché des lasers à semi-conducteur a connu ces dernières années une progression importante et rapide pour atteindre en 2002, plus de 49% du revenu global des systèmes laser. Les prévisions de croissance annoncent une augmentation annuelle de 7% jusqu'en 2009 [1].

Le marché mondial de la DLP peut être décrit comme un oligopole<sup>2</sup>, une industrie de plusieurs membres mais contrôlée par quelques-uns. Il se compose d'au moins 25 entreprises mondiales qui sont souvent en compétition pour une petite partie du marché de la diode laser. En Janvier 2005, le leader mondiale d'étude de marché en photonique "Strategies Unlimited" (Mountain View, CA) a rapporté que le marché de la diode laser représentait environ 225Md\$. Les 25 principales entreprises sont situées en Amérique du Nord, en Europe et en Asie comme présentée en Figure I.3 avec en particulier : Coherent (Santa Clara, CA), Dilas Diodenlaser (Mayence, Allemagne), JDS Uniphase (JDSU, San Jose, CA), Jenoptik Laser Diode (JOLD; Iéna, Allemagne) et Spectra-Physics, division de Newport (Mountain View, CA)... Il existe des différences stratégiques entre les industriels d'Amérique du Nord et leurs homologues Européens, s'observant au niveau de la chaîne d'approvisionnement, de la technologie des produits et des marchés mondiaux [9].

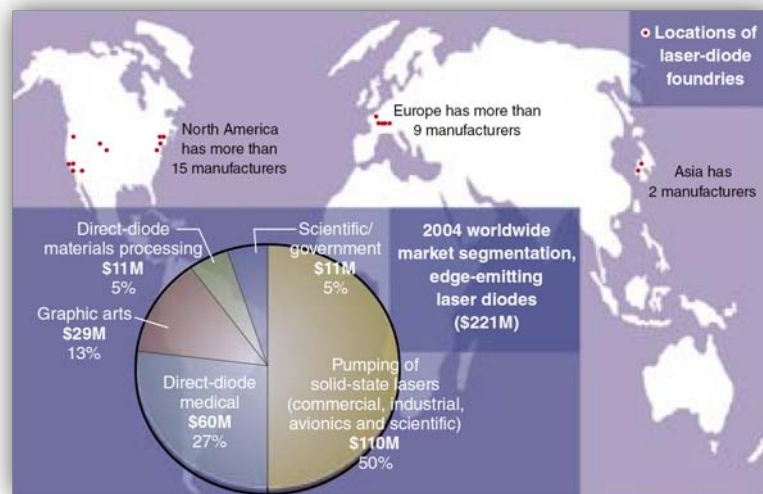


Figure I.3 - Localisation des différentes fonderies de diodes laser et segmentation du marché mondial de la diode laser [9]

Les fournisseurs européens de DLPs, particulièrement Dilas, JOLD et Quantel Laser Diodes (QLD : ex Thales Laser Diodes - TLD) concentrent leur travail sur une approche « back end » qui adresse plus particulièrement la partie assemblage. Historiquement, les fournisseurs européens ont tendance à voir l'intégration verticale comme un facteur non critique dans la chaîne d'approvisionnement. Dans ce cas précis, les processus de croissance épitaxiale des diodes laser sont

<sup>2</sup> Une situation d'oligopole se rencontre lorsqu'il existe un nombre très faible de vendeurs et un nombre important de clients acheteurs.

externalisés et les barrettes nues sont considérées comme un produit à part entière qu'ils achètent, assemblent et commercialisent.

Un contraste radical apparaît avec l'approche des fournisseurs nord-américains qui apprécient, pour la plupart, l'intégration verticale et les avantages du contrôle de toute la chaîne d'approvisionnement. Cette dernière démarre avec les processus de la croissance épitaxiale et se termine par la phase de packaging. Les nord-américains sont convaincus que le processus de l'épitaxie est une étape très critique dans leur chaîne d'approvisionnement, car elle permet une meilleure ingénierie et optimisation de la structure interne des diodes laser, améliorant ainsi la production des diodes laser en termes de perte internes, d'efficacité externe et de performances électro-optiques. L'épitaxie permet également la personnalisation de la fabrication avec la possibilité d'ajustement de longueurs d'onde : ex. 797-808nm, 825, 880, 1470nm et au-delà. En revanche, les fournisseurs européens focalisent leurs efforts en particulier sur deux longueurs d'onde d'intérêt :

- La source à 808nm est utilisée comme pompe de laser solide type Nd:YAG (Grenat d'Yttrium et d'Aluminium dopé Néodyme) et Nd:YVO<sub>4</sub> (ortho-Vanadate d'Yttrium dopé Néodyme).
- La source à 940nm est utilisée comme source de pompage du Yb:YAG (YAG dopé Ytterbium).

Le marché mondial est principalement dicté par la faible puissance optique des lasers pompés par DLPs et les besoins en application militaire. Par contre, à présent, ce marché se partage en deux grands axes :

- le marché européen qui a atteint sa maturité, dans sa forme actuelle, dans les années 1990 en raison de l'appui financier du gouvernement allemand. Les industriels européens tels que Dilas, JOLD et OSS (OSRAM Opto Semiconductor, actuellement filiale de Siemens et ex. Siemens Opto Semiconductor) ont engagé la production à grande échelle des DLPs émettant à 808 et 940nm pour approvisionner les besoins de l'industrie automobile et les besoins du marché des Etats-Unis.
- le marché américain qui a évolué avec une très faible intervention du gouvernement des États-Unis et qui a été dynamisé :
  - dans les années 1980, par la commercialisation de laser pompé par DLPs émettant à 795 et 808nm,
  - dans le milieu des années 1990, par l'industrie de l'impression laser (825nm),
  - dans la fin les années 1990, par la dermatologie (810nm).

Ces deux marchés coexistent grâce à des politiques de recherche différentes :

- Aux Etats-Unis

La recherche aux Etats-Unis s'axe principalement sur les trois points clés suivants :

- l'innovation en ouvrant en permanence de nouveaux marchés,
- la concurrence des entreprises pour améliorer, développer et produire des structures épitaxiale émettant vers de nouvelles longueurs d'onde,
- fabriquer des DLPs à haute fiabilité pour les longueurs d'onde préexistantes.

Le principal objectif est de trouver de nouvelles applications aux technologies récentes en créant de nouveaux marchés et tout en exploitant les technologies déjà existantes.

- En Europe

La stratégie de recherche s'est principalement orientée vers le développement de techniques de report à très faible impédance thermique; cette dernière est un paramètre fondamental de la performance des DLPs pour des enjeux de haute fiabilité. L'objectif est de produire des DLPs fiables pour une forte utilisation dans l'industrie automobile comme pompes multi-kilowatt de laser solide ou comme source directe de chaleur pour le soudage des métaux, l'usinage de l'aluminium et les plastiques [9].

Actuellement les DLPs n'ont pas leur potentiel d'innovation et toutes leurs possibilités. Le paragraphe suivant s'attache à décrire la barrette de DLPs et les principales étapes de sa fabrication.

## **II.3. Barrettes de diodes laser**

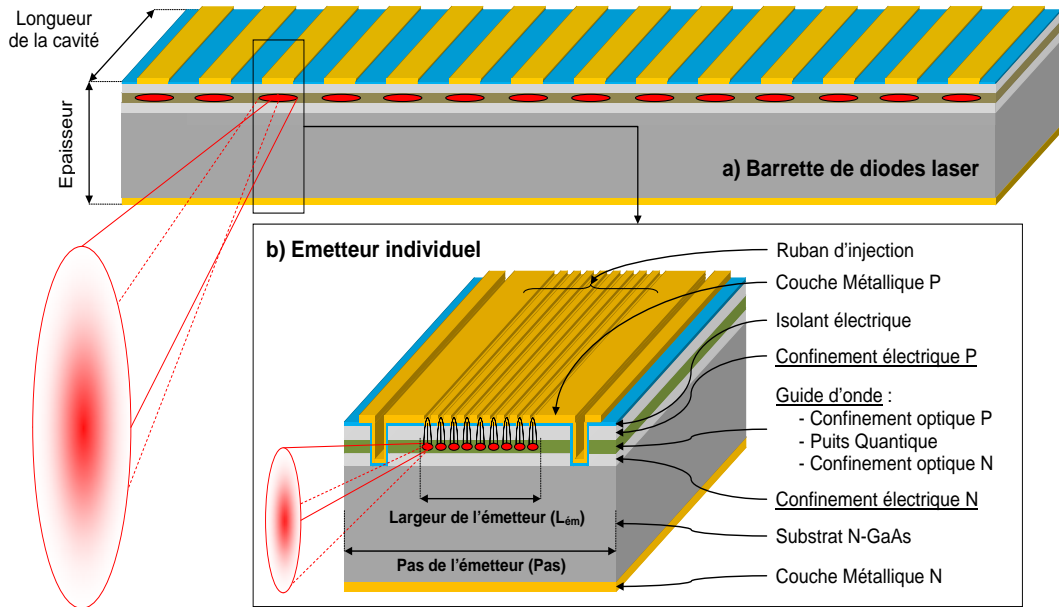
### **II.3.a. Description technologique**

Les barrettes de DLPs correspondent à une juxtaposition horizontale de plusieurs diodes laser élémentaires, appelées émetteurs alimentés en parallèle (Figure I.4). Ces barrettes ont une largeur typique de 10mm pour une longueur de la cavité laser s'étendant de 600 $\mu$ m à 3mm. Le nombre d'émetteurs au sein de la barrette dépend principalement du mode de fonctionnement, soit en continu (CW), soit en quasi continu (QCW).

Le pourcentage de la zone dédiée à l'injection de courant dans la couche active varie également selon le régime de fonctionnement, ainsi les barrettes sont caractérisées par un taux de remplissage (fill factor: ff.) qui correspond au rapport de la largeur d'un émetteur sur le pas des émetteurs de la barrette :

- dans le cas du régime CW, les émetteurs sont relativement éloignés afin qu'une forte puissance thermique puisse être dissipée ( $ff. \leq 50\%$ ).
- Pour le QCW : les émetteurs peuvent être spatialement beaucoup plus rapprochés ( $ff. \geq 50\%$ ).

La Figure I.4-a schématise la géométrie d'une barrette de diode laser et l'architecture d'un émetteur individuel est représentée en Figure I.4-b.



- Processus d'épitaxie

L'avènement de l'épitaxie en phase liquide (LPE - Liquid Phase Epitaxie) dans le début des années 1970 a permis la réalisation de structures à double hétérojonction et l'exploitation de diodes laser CW à base du composé GaAs/AlGaAs. Les progrès dans les technologies de la croissance épitaxiale comme l'épitaxie par jet moléculaire (MBE - molecular beam epitaxy) et l'épitaxie en phase vapeur métal-organique (MOVPE - Metal Organic Vapor Phase Epitaxie) ont permis le développement des lasers à puits quantiques qui sont à la base de la commercialisation des DLPs.

Dans l'industrie III-V, deux techniques d'épitaxie prédominent la fabrication des DLPs à l'échelle multi-plaques :

- la MBE et sa variante la GSMBE (Gaz Source MBE),
- la MOVPE, également appelé MOCVD (Metal Organic Chemical Vapour Deposition).

Actuellement les barrettes de DLPs sont réalisées sur des substrats 3" à cause du rendement de fabrication faible des substrats 2" qui fournit environ 120 barrettes d'1cm de longueur contre 300 barrettes sur les plaques 3". Cette évolution du diamètre du substrat est nécessaire pour la réduction des coûts de production. Pour des applications spécifiques et pour les mono puces les substrats 2" restent toujours utilisés par contre le diamètre 4" trouve encore une utilisation limitée [10].

La zone active des diodes laser est obtenue à l'aide d'un empilement de couches réalisée par épitaxie (Figure I.4-b). L'écart relatif entre la maille cristalline du substrat (ex. GaAs) et celle d'une couche épitaxiale doit être très faible, typiquement :  $\Delta a/a < 10^{-3}$ , avec "a" représentant le paramètre de maille cristalline du substrat. La Figure I.5 présente l'énergie de la bande interdite en fonction du paramètre de maille de différents matériaux semiconducteurs. Les matériaux cristallins ayant le même paramètre de maille (ex. GaAs et AlAs) permettent de faire croître des alliages ternaires (ex.  $Al_xGa_{1-x}As$ ) ou quaternaires (ex. AlInGaAs) en accord de maille avec un substrat GaAs.

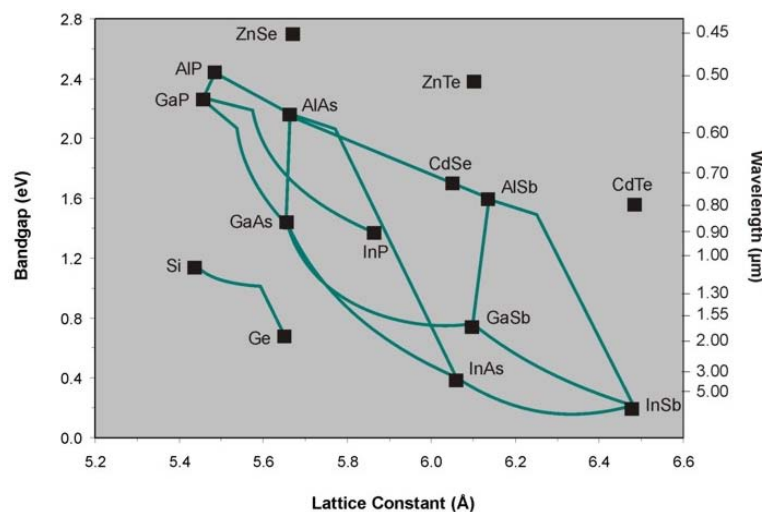


Figure I.5 - Energie de la bande interdite et longueur d'onde correspondante en fonction du paramètre de maille de matériaux semiconducteurs [11]

Les matériaux à semi-conducteurs de type III-V permettent également de couvrir une gamme de longueur d'onde importante qui s'étend de 0.4 à 3 $\mu$ m. La Figure I.6 synthétise le spectre couvert et des différentes associations de matériaux réalisables.

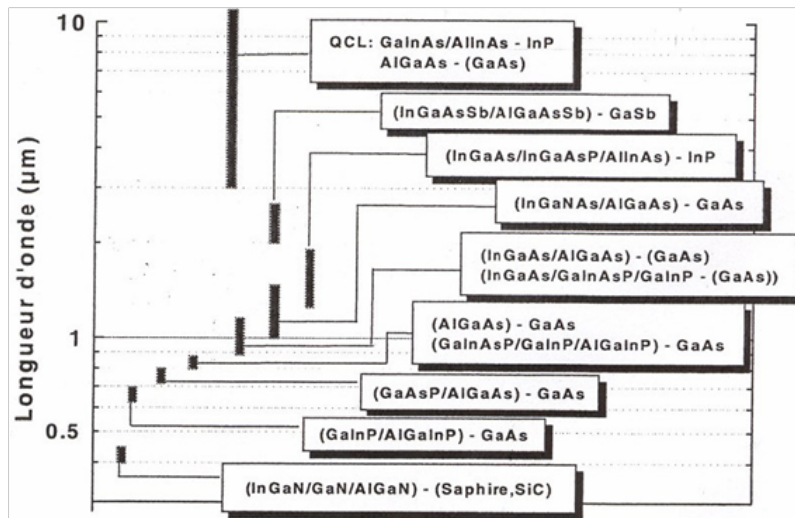


Figure I.6 - Longueurs d'onde accessibles en fonction des matériaux semi-conducteurs III-V utilisés [12]

- Diffusion ou implantation des impuretés

Le silicium est le plus souvent utilisé pour le dopage type N des matériaux III-V des DLPs fabriqués dans les réacteurs MBE et MOVPE. Le dopage type P des matériaux III-V réalisé par MBE est obtenu avec le Béryllium.

- Description synthétique des étapes intermédiaires de micro-lithographie

Dans le cas des DLPs, la technique de photolithographie permet de réaliser une structure multi-rubans sur chaque émetteur et détermine le nombre et la largeur de chaque émetteur. En effet, l'émission d'un émetteur n'est pas continue. Elle est composée d'une succession de sources lasers indépendantes (rubans lasers) dont la largeur est définie par réouverture d'un matériau isolant, ex. le nitrure de silicium. Il existe d'autres structures où l'émetteur est constitué d'un seul ruban relativement large (qq 100 $\mu$ m). Alors que l'usage de multi-rubans est une solution aux phénomènes liés à la filamentation du courant, qui produit des effets indésirables bien identifiés dans les lasers à semi-conducteur [13]. Les structures multi-rubans permettent le guidage des lignes de courant rendant ainsi l'injection du courant plus homogène au sein de la zone active.

- Dépôt de métallisations coté P

Un dépôt de couches métalliques coté P de la plaque est réalisé et suivi d'un recuit. Une réouverture de la métallisation est réalisée entre les émetteurs pour assurer une isolation électrique entre deux émetteurs successifs et permettre un éventuel clivage en mono-émetteur.

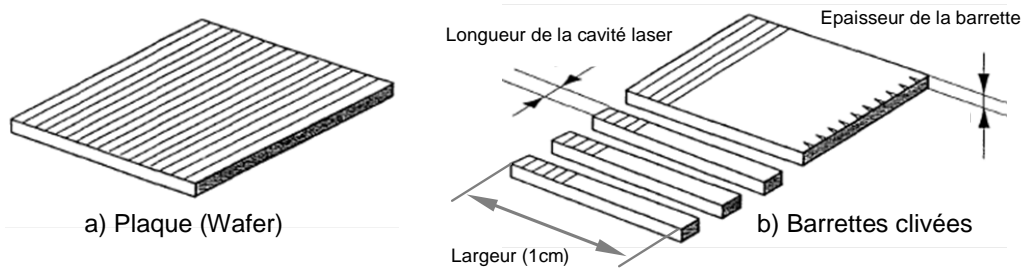
- Amincissement de la plaque



Les étapes décrites précédemment sont réalisées sur un substrat (ex. GaAs) d'une épaisseur très importante (ex. de l'ordre de  $420\mu\text{m}$  pour un substrat GaAs). Un amincissement en face arrière de la plaque est réalisé pour obtenir l'épaisseur finale de la barrette laser, généralement entre  $100$  à  $140\mu\text{m}$ . Cette étape est suivie par le dépôt de couches métalliques suivi d'un recuit pour réaliser le contact ohmique côté N. La plaque est ainsi préparée pour l'étape suivante : le clivage.

- Clivage de la plaque en barrettes

Après le procédé pleine-plaque correspondant aux diverses étapes de fabrication précédentes, le clivage intervient et consiste à découper la plaque en morceau et en barrettes. La première étape du clivage consiste à rayer au moyen d'une pointe diamant la plaque, créant ainsi une zone d'amorce, cette opération est nommée "scribing". Ensuite, une pression est exercée à l'aide d'une lame diamant sur la face opposée à l'amorce jusqu'à rupture en barrettes individuelles.



**Figure I.7 - Caractéristiques du clivage d'un a) morceau d'une plaque de diodes laser en b) barrette**

- Traitement des miroirs

Le traitement des faces clivées est nécessaire à la fois pour protéger les facettes contre l'oxydation et pour moduler le taux de réflexion des miroirs dans le but d'optimiser la puissance optique émise. Sachant que le clivage assure une réflectivité naturelle de l'ordre de 31%. Le dépôt de couches minces diélectriques sur les faces clivées, va diminuer la réflectivité de la face émissive et va augmenter celle de la face arrière :

- Une réflectivité maximum  $R_{\text{max}}$  qui peut aller jusqu'à 96% est obtenu par un empilement de couches de matériaux d'indice optique élevé et faible. Souvent le choix se porte un empilement successif d'un certain nombre de bi-couches d'alumine et de silicium ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ ).
- Une réflectivité minimum  $R_{\text{min}}$ , comprise entre 5 et 10%, est obtenue avec une mono couche d'alumine.

Ce traitement constitue la dernière étape réalisée sur la barrette laser avant les étapes d'assemblage et de caractérisation.

### III. Rappels sur le fonctionnement d'un laser à Semiconducteur

#### III.1. Laser à semiconducteur

De manière générale, un dispositif LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations) est constitué d'une cavité optique résonante contenant un milieu amplificateur autour d'une longueur d'onde (Figure I.8). Le milieu amplificateur reçoit une énergie extérieure appelée énergie de pompe qui fait transiter une partie de ses électrons de l'état fondamental à un état excité. Lorsque le signal de pompe dépasse un seuil, la densité de population de l'état excité est supérieure à celle de l'état fondamental et l'inversion de population est réalisée. Cette inversion de population peut être obtenue par pompage optique mais dans le cadre d'un laser à semiconducteur, le pompage est électrique. La désexcitation des électrons se traduit par des recombinaisons radiatives, en premier lieu régies par l'émission spontanée puis amplifiées par l'émission stimulée. L'émission stimulée signifie qu'un photon reçu par le milieu amplificateur vient stimuler la transition d'un électron excité vers son niveau fondamental. Cette transition génère un photon de même énergie et cohérent en phase. Ce phénomène d'amplification de lumière est assisté par les oscillations dans la cavité résonante.

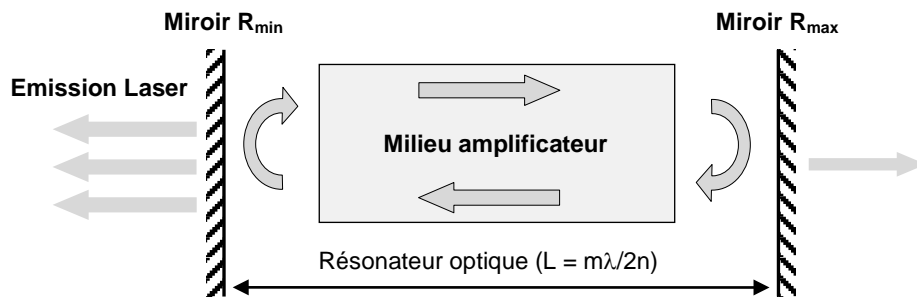


Figure I.8 - Schéma de principe d'un dispositif laser

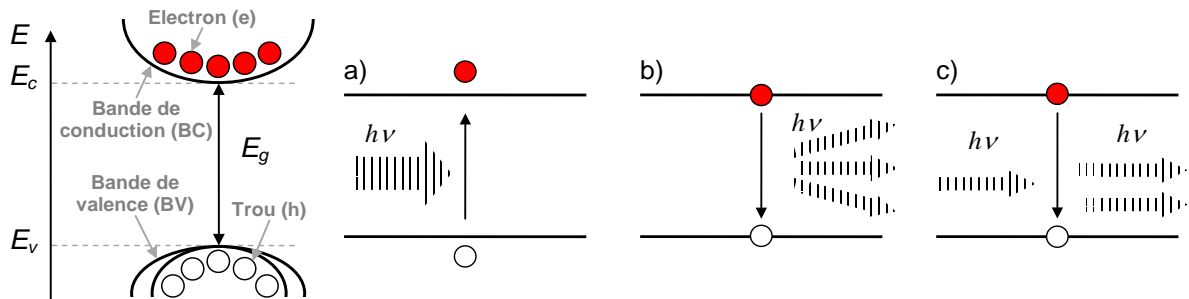
Les deux miroirs distants d'une longueur  $L$  assurent les allers et retours des photons dans la cavité qui génèrent par émission stimulée des photons cohérents : c'est l'effet laser. Cependant, ce dernier est obtenu sous deux conditions :

- La première condition concerne le gain du milieu amplificateur. Il doit compenser les pertes internes du matériau  $\alpha_i$  et les pertes du résonateur, liées aux réflectivités  $R_{min}$  et  $R_{max}$  des miroirs. Il doit dépasser sa valeur seuil  $g_{th}$  définie par l'équation E- 1.
- La seconde condition laser repose sur la phase. L'aller-retour d'un photon dans la cavité doit introduire un déphasage multiple entier de  $2\pi$ . Cela signifie que la longueur  $L$  de la cavité doit être un multiple entier de  $\lambda/2n$ .

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_{min} R_{max}} \quad \text{E- 1}$$

La structure des lasers à semiconducteurs regroupe les deux sous-ensembles d'un laser solide, le même dispositif sert à la fois de milieu amplificateur et de résonateur. Les principales interactions électron-photon dans un semiconducteur sont représentées par la Figure I.3 et on peut dissocier [14]:

- l'absorption : un photon incident cède son énergie à un électron de la bande de valence (BV) et le fait "monter" dans la bande de conduction (BC), créant une paire électron-trou, c'est un processus de génération radiative,
- l'émission spontanée : un électron "redescend" spontanément sur un état libre de la BV, annihilant une paire électron-trou, c'est un processus de recombinaison radiative,
- l'émission stimulée : un photon incident induit la recombinaison radiative d'une paire électron-trou. Le photon émis est de même phase et même direction que le photon incident. C'est le mécanisme proposé par A. Einstein en 1917 par lequel le rayonnement peut être amplifié et qui est exploité dans tout type de structure Laser.



**Figure I.9 – Rappel sur les transitions inter-bandes dans un semiconducteur à gap direct et processus a) d'absorption, b) d'émission spontanée et c) d'émission stimulée dans un laser à semiconducteur**

Cependant, les recombinaisons radiatives stimulées dans les lasers à semi-conducteur ne sont pas les seules recombinaisons se produisant au sein de la cavité.

### III.1.a. Mécanismes de recombinaison des porteurs

Les porteurs injectés dans les lasers à semi-conducteur sont consommés au travers de différents processus de recombinaisons [14] :

- Recombinaisons radiatives : la recombinaison des porteurs se fait par émission spontanée. le taux de recombinaison radiative est directement proportionnel à la densité des porteurs dans la bande de conduction et à la bande de valence.

$$R_{rad} = B n p = B N^2 \quad \text{E- 2}$$

où, B est le coefficient de recombinaison radiative ou bi-moléculaire, n est la densité d'électrons dans la bande de conduction et p la densité de trous dans la bande de valence.

- Recombinaisons "Shockley-Read-Hall" ou SRH : Recombinaisons non radiatives des porteurs sur des défauts dont les niveaux d'énergie sont localisés dans la bande interdite. Les porteurs

sont piégés par un défaut, la recombinaison ne met en jeu qu'un porteur libre, le mécanisme est donc directement proportionnel à la densité de porteurs AN.

$$R_{SRH} = A \frac{np - n_i^2}{\tau_n(p + n_i) + \tau_p(n + n_i)} = AN \quad \text{E- 3}$$

où, A correspond au coefficient de recombinaison linéaire ou non radiatif.

- Recombinaisons Auger : c'est une transition d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence, bien souvent entre deux valeurs différentes de vecteur d'onde. Dans ce processus, deux électrons et un trou interviennent, le taux de recombinaisons est donc proportionnel au cube de la densité de porteurs ( $N^3$ ).

$$R_{Aug} = C_n n(p^2 - n_i^2) + C_p p(n^2 - n_i^2) = CN^3 \quad \text{E- 4}$$

où C est le coefficient Auger.

Le taux de recombinaison total R(N) prenant en compte l'ensemble des mécanismes est défini par :

$$R(N) = A_{nr}N + BN^2 + CN^3 \quad \text{E- 5}$$

### III.1.b. Oscillation laser

Une diode laser de longueur L (ex. Figure I.4-b), dont les réflectivités en amplitude des miroirs à l'entrée et en sortie sont respectivement  $r_{\min}$  et  $r_{\max}$ , et dont le milieu amplificateur comporte un gain  $g$  et des pertes internes  $\alpha_i$ . Cette structure est un guide d'ondes, la couche active possède un indice optique ( $n_2$ ) supérieur à l'indice ( $n_1$ ) des couches de confinement (Figure I.4-b), les ondes électromagnétiques sont donc piégées dans la partie d'indice supérieur. La proportion de l'énergie qui est effectivement présente dans la zone amplificatrice est par définition le facteur de confinement ( $\Gamma$ ). Il est donné par l'équation E- 6 et doit être pris en compte dans le calcul de l'amplification de l'onde.

$$\Gamma = \frac{\int_{-d/2}^{+d/2} \int_{-W/2}^{+W/2} |E(x, y)|^2 dx dy}{\int \int_{x, y} |E(x, y)|^2 dx dy} \quad \text{E- 6}$$

où d est l'épaisseur de la zone active, W la largeur du ruban et E le champ électromagnétique.

Après N aller-retour dans la cavité Fabry-Pérot, l'onde à l'entrée de vecteur d'onde ( $k_0=2\pi/\lambda_0$ ) prend la forme donnée par l'équation E- 7 [14].

$$E = E_0 \frac{e^{i\omega t}}{1 - r_{\min} r_{\max} e^{(\Gamma g - \alpha)L} e^{2ikL n_{eff}}} \quad \text{E- 7}$$

Le champ électromagnétique devient divergent lorsque le dénominateur de l'équation E- 7 s'annule, c'est la condition d'oscillation laser. Il faut donc remplir deux conditions pour obtenir une oscillation laser :

- Condition sur le gain

Le gain du milieu amplificateur doit compenser les diverses pertes de la cavité (facteur de transmission des miroirs, pertes internes...), ceci est représenté par :

$$r_{min} r_{max} e^{(\Gamma g - \alpha_i)L} = 1 \quad \text{E- 8}$$

Il existe donc un seuil de gain,  $g_{th}$ , au-dessus duquel le milieu se met à osciller spontanément. Ce seuil est donné par E- 9.

$$g_{th} = \frac{1}{\Gamma} \left( \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_{min} R_{max}} \right) = \frac{1}{\Gamma} (\alpha_i + \alpha_m) \quad \text{E- 9}$$

où,  $R_{min}$  et  $R_{max}$  sont les réflectivités des miroirs en intensité ( $R_i = r_i^2$ ),  $\alpha_m$  définit les pertes miroirs (exprimées en  $cm^{-1}$ ) et  $\alpha_i$  définit les pertes internes dans la cavité laser.

- Condition sur la phase

La condition sur la phase se traduit par l'annulation du dénominateur de l'équation E- 7, elle est donnée par :

$$e^{2ikLn_{eff}} = 1 \quad \text{E- 10}$$

Les modes amplifiés sélectionnés satisfont à la relation :

$$\nu_m = m \frac{c}{2n_{eff}L} \quad \text{E- 11}$$

où,  $\nu_m$  est la fréquence du mode amplifié,  $n_{eff}$  est l'indice effectif du guide et  $c$  est la célérité de la lumière dans le vide.

### III.1.c. Courant de seuil

En pratique, l'oscillation laser est obtenue à partir d'un courant supérieur à une valeur minimale appelé courant de seuil  $I_{th}$ . Le courant injecté compense exactement la recombinaison radiative spontanée en supposant que la recombinaison non-radiative est négligeable.

$$I_{th} = qBn_s^2(L \times l \times d) \quad \text{E- 12}$$

où,  $n_s$  est la densité d'électrons au seuil, voisine de  $10^{18} cm^{-3}$ , le produit  $(L \times l \times d)$  est le volume de la zone active.

Le courant de seuil est une fonction rapidement croissante dépendante de la température de jonction  $T_j$  caractérisée par le paramètre empirique  $T_0$  ayant la dimension d'une température et défini par :

$$I_{th} = I_{thr} e^{\frac{T_j - T_r}{T_0}} \quad \text{E- 13}$$

où,  $I_{thr}$  est le courant de seuil a la température  $T_r$ .

Lorsqu'on augmente le courant d'injection ( $I$ ) dans la diode, le courant de seuil augmente et si  $I_{th}$  augmente plus vite que  $I$ , la puissance émise décroît.  $T_0$  est principalement une caractéristique des

matériaux semi-conducteurs utilisés : pour l'AlGaAs, on a  $T_0 \approx 150K$ , et pour l'InGaAsP on a  $T_0 \approx 70K$ . Il en résulte que cet effet est beaucoup plus prononcé pour les composants à base du matériau InP.

### III.2. Diode laser à hétérostructure

Le laser à semiconducteur a connu un essor commercial important avec la mise au point de la double hétérojonction, créant une double barrière de potentiel pour les porteurs minoritaires injectés [15]. Le confinement de porteurs qui en résulte, conduit alors à une grande facilité d'inversion de population. La différence de potentiel appliquée doit juste excéder la hauteur de la bande interdite de la structure et la diode laser peut fonctionner à température ambiante. La largeur de la zone d'inversion de population est fixée lors de la fabrication et correspond à l'épaisseur de la couche active. Elle ne dépend pas de la différence de potentiel, le contrôle du fonctionnement de la diode laser en est donc fortement simplifié. Un des grands avantages de la structure à double hétérojonction, est le guidage optique qu'elle offre naturellement. En effet, les indices de réfraction des couches à grand bande interdite sont plus faibles que celui de la couche confinée à petit gap. La zone active est également un guide d'onde. Il s'en suit que même les photons émis en dehors de l'axe de la cavité peuvent être guidés et donc être également amplifiés pour participer au rayonnement laser.

Dans les années 70, Alferov [15] a proposé la première amélioration du courant de seuil des lasers à semiconducteurs à travers la double hétérostructure. Le diagramme énergétique et la variation de l'indice de réfraction d'une telle structure sont schématisés dans la Figure I.10. Le matériau de la couche active est non dopé et il est confiné par deux couches dopées respectivement N et P. L'énergie de la bande interdite des couches de confinement est supérieure à l'énergie des photons générés dans la couche active pour éviter leur absorption et assurer un confinement du champ électromagnétique. Lorsque la diode est polarisée en directe, la jonction PiN apporte un maximum de porteurs dans la couche active (i) et le confinement augmente la probabilité de recombinaisons. Ce double confinement (photons et porteurs) entraîne un bon recouvrement entre le mode optique et la zone d'injection des porteurs. Le paramètre, évaluant ce taux de recouvrement, est appelé le facteur de confinement [16].

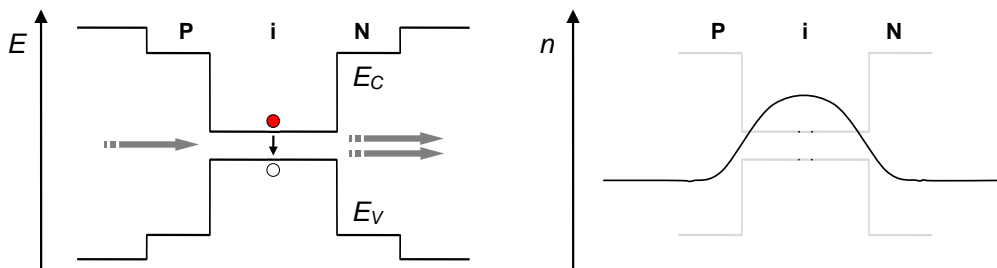
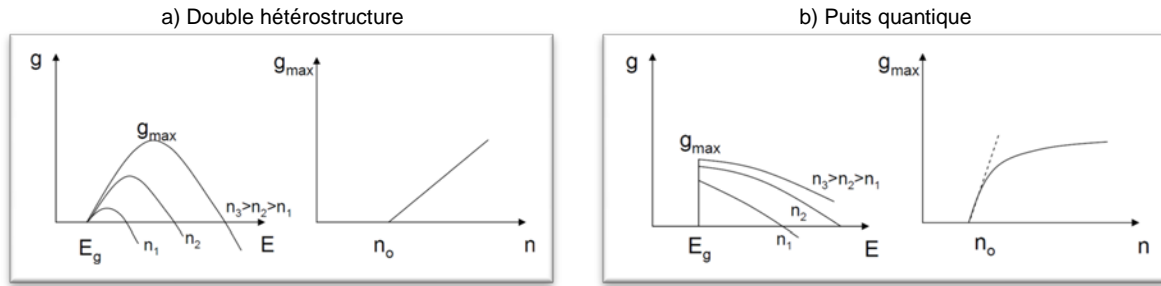


Figure I.10 - Diagramme d'énergie et profil de l'indice de réfraction d'une double hétérojonction

Cependant, pour ce type de structure, le maximum du gain n'est pas situé exactement au gap et donc une partie de l'inversion de population est inutile (Figure I.11-a). L'utilisation d'un puits quantique permet d'amener le maximum du gain au gap (Figure I.11-b) pour ajuster le nombre d'états

utiles à l'inversion de population. Les laboratoires américains Bell ont été les premiers à démontrer la diminution du courant de seuil des lasers grâce à une structure à puits quantique [24].



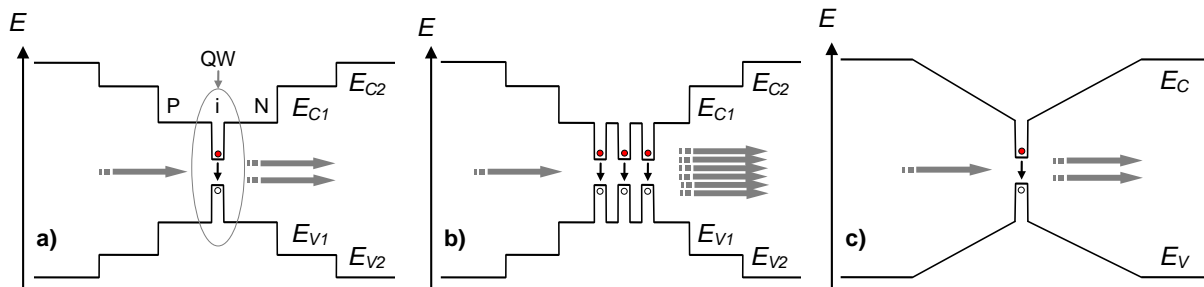
**Figure I.11 - Courbe de répartition du gain en énergie  $g(E)$  et courbe du maximum du gain en fonction de la quantité de porteurs  $g(n)$  pour a) une double hétérostructure et pour b) un structure à puits quantique**

### III.3. Diode laser à puits quantique

L'efficacité des diodes laser a été améliorée grâce à la possibilité de fabrication de couches actives minces d'une épaisseur allant de 4 à 20nm, ce qui a permis l'industrialisation de diodes laser à simple puits quantique (QW). Ce dernier modifie la densité des porteurs dans les niveaux d'énergie disponibles, il en résulte un large spectre du gain optique (Figure I.11). Un puits quantique est caractérisé par un faible potentiel d'énergie des porteurs et la recombinaison électron-trou devient plus facile, se traduisant par un courant de seuil laser plus faible. Il semble que pour augmenter la densité de porteurs pour un courant donné il n'y ait pas de limite inférieure : plus réduite sera la couche active et plus faible sera le seuil laser ( $E-12$ ). En revanche, il est clair que la capacité d'une couche mince à guider les photons diminue quand l'épaisseur de la couche guide optique devient trop faible devant la longueur d'onde optique. Alors qu'une couche de 10nm est un parfait "entonnoir" à électrons, une onde électromagnétique de longueur d'onde  $1\mu\text{m}$  dans le vide est très mal guidée par une telle couche ; le mode électromagnétique guidé s'élargit en s'évanescant totalement dans les couches voisines. Cette dissymétrie vient du fait que la longueur d'onde des photons est beaucoup plus grande que la longueur d'onde de De-Broglie des électrons. Comme la longueur d'onde représente fondamentalement la distance typique en dessous de laquelle le champ électromagnétique refuse de varier de manière trop importante, suivant les équations de Maxwell, il est impossible de comprimer une onde sur une distance plus faible que la longueur d'onde. D'où l'idée d'une structure à confinement séparé (SCH), dans laquelle une couche centrale a pour but de confiner les électrons et d'autres couches, plus larges, sont optimisées de manière séparée pour optimiser le guide d'onde optique. Le type de structure à confinement séparé, toujours largement utilisé dans les diodes lasers actuelles, est représenté sur la Figure I.12.

Par conséquent, les diodes laser à puits quantique sont caractérisées par un fort rendement de conversion, un meilleur confinement du faisceau de sortie et la possibilité d'émettre sur une variété de longueurs d'onde en fonction du matériau et l'épaisseur du puits quantique.

Les diodes laser à puits quantique sont des structures plus complexes qui font appel à de l'ingénierie de structure de bandes. Deux couches de bande interdite et d'indice intermédiaire servent de guide d'onde, leur épaisseur est optimisée pour obtenir un bon guide d'onde en tenant éventuellement compte de la densité de puissance optique pas trop grande que l'on souhaite pour limiter les effets thermiques dus à la réabsorption. La couche centrale, de gap minimal, peut être maintenant aussi petite que l'on veut pour accroître la densité d'électrons. Dans des structures telles que celles de la Figure I.12-a et -b, présentant des discontinuités de bande interdite en dehors de la couche active centrale, des électrons et des trous peuvent éventuellement rester piégés dans des petits puits de potentiel triangulaires formés sous champ par ces discontinuités. De cette remarque, résulte la structure à indice graduel (GRINSCH - GRaded INDEX Separate Confinement Heterostructure), montrée sur la Figure I.12-c. Pour réaliser ce type de potentiel graduel, c'est la concentration de l'alliage  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  qui varie continûment lors de la croissance. En épitaxie par jets moléculaires (MBE) par exemple, ceci peut être obtenu en imposant une rampe de température à l'une des sources d'un des éléments de l'alliage dans le bâti d'épitaxie, la variation de température modifiant la proportion d'atomes émis pendant le dépôt et donc incorporés dans la couche épitaxie. D'une manière générale, les progrès des structures laser ont très largement reposé sur l'amélioration de la qualité de la croissance des matériaux (pureté, contrôle du dopage, qualité des interfaces, reprise d'épitaxie...).



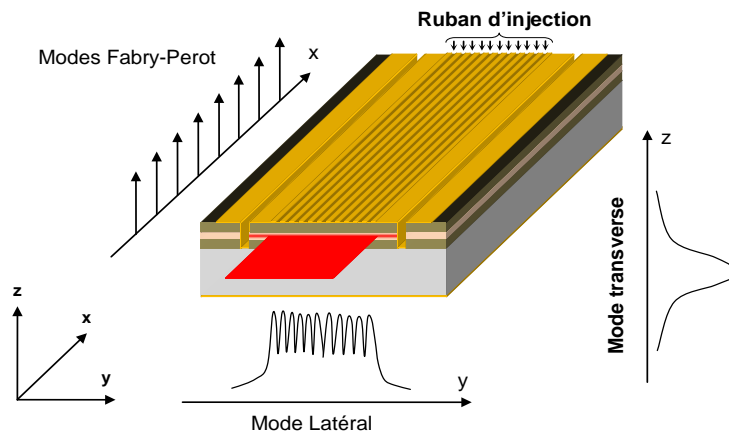
**Figure I.12 - Diagrammes d'énergie de la structure d'une diode laser à : a) hétérostructure à confinement séparé (SCH) ou à simple puits quantique (SQW), b) multi-puits quantique (MQW) et c) hétérostructure à gradient d'indice et à confinement séparé (Grinsch)**

### III.4. États des photons dans une diode laser

La Figure I.13 décrit un exemple de ruban à guidage par le gain, où le matériau de la couche active est conservé sur toute la surface du dispositif mais l'injection du courant est limitée à la région du ruban (Chapitre 1 - § II.3.b). Il en résulte que la densité d'électrons injectée et le gain sont maximum au centre du ruban qui est représentée par la partie imaginaire de l'indice de réfraction alors que la partie réelle de l'indice présente un minimum. La structure est donc anti-guidante ce qui induit des pertes à la propagation qui doivent être compensées par le gain. La largeur d'un ruban élémentaire est de l'ordre de quelques microns pour obtenir un fonctionnement stable sur le mode fondamental transverse.



Une diode laser à double hétérostructure de longueur  $L$  représente un guide d'onde à guidage par l'indice puisque ce guide actif dispose d'un indice optique ( $n_2$ ) supérieur à l'indice optique ( $n_1$ ) des couches de confinement. Les ondes électromagnétiques sont piégées dans la partie d'indice supérieur, c'est-à-dire la région amplificatrice. Ce type de guide d'onde est susceptible de supporter plusieurs modes transverses. La géométrie parallélépipédique d'une diode laser permet, en première approximation, une factorisation des champs électromagnétiques en leur variation selon les divers axes. A chacun de ceux-ci est affectée une structure de modes optiques très différenciée suivant l'axe considéré [17].



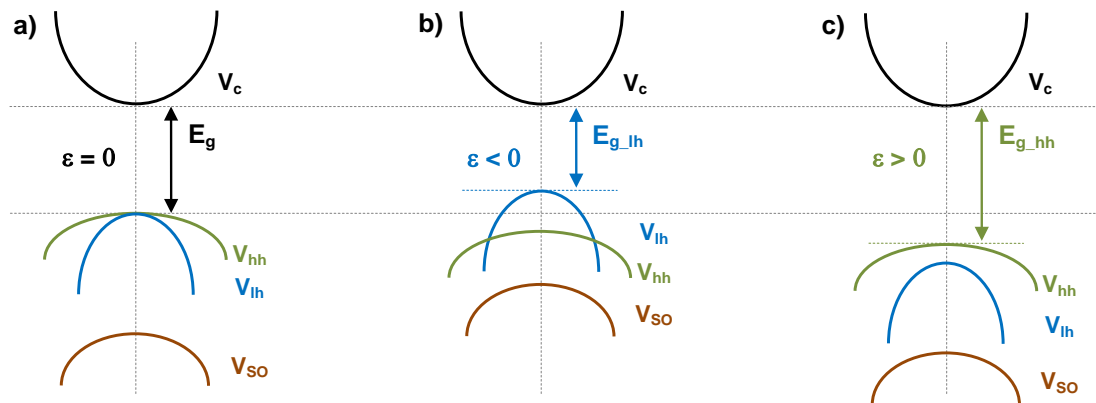
## IV. Contraintes mécaniques dans les diodes laser

### IV.1. Effet des contraintes mécaniques sur la structure de bandes

L'application d'une contrainte mécanique modifie la structure de bande d'énergie des matériaux semiconducteurs [18]. Cette contrainte peut se décomposer en deux parties :

- Contrainte hydrostatique modifiant l'écart entre la bande de conduction et la bande de valence.
- Contrainte en cisaillement levant la dégénérescence entre les sous-bandes de trous lourds ("heavy-holes" ou hh) et celles des trous légers ("light-holes" ou lh).

La position relative des sous-bandes de trous est différente selon le type de contrainte appliquée : en tension ou en compression. La Figure I.14 montre les variations de l'énergie des bandes interdites d'un matériau contraint ( $\varepsilon \neq 0$ ) et non contraint ( $\varepsilon = 0$ ). L'effet des contraintes domine, en particulier, sur la bande des trous légers qui se trouve fortement affectée par rapport aux autres bandes de la "Γ-valley" dans les matériaux à bande interdite directe.



**Figure I.14 - Représentation schématique de la structure de bande d'un matériau a) non contraint, soumis à une contrainte bi-axiale b) en tension, et c) en compression**

La contrainte en compression induit une diminution du niveau d'énergie des trous légers «  $E_{lh}$  » dans la bande de valence et augmente le niveau d'énergie des trous lourds «  $E_{hh}$  » contrairement à la contrainte en tension. Il est ainsi possible de gérer le type de transitions e-lh ou e-hh en fonction du type de la contrainte à laquelle est soumis le matériau de la couche active.

La contrainte modifie également la hauteur de la bande interdite «  $E_g$  » du matériau. L'étude de cette variation est réalisée en diagonalisant l'hamiltonien de Pikus et Bir ( $H_{PB}$ ) donné par E- 14 [19].

$$H_{PB} = \begin{bmatrix} F - E & H & I & 0 \\ H^* & G - E & 0 & I \\ I^* & 0 & G - E & -H \\ 0 & I^* & -H^* & F - H \end{bmatrix} \quad \text{E- 14}$$

où,  $F, G, H, I$  sont donnés par E- 15 et  $H^*, I^*$  sont respectivement les conjugués de  $H, I$ .

$$\begin{cases} F = \frac{1+m}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + m\varepsilon_{zz} \\ G = \frac{F}{3} + \frac{2}{3}[m(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + l\varepsilon_{zz}] \\ H = \frac{1}{3}n(\varepsilon_{yz} + i\varepsilon_{xz}) \\ I = \frac{1}{\sqrt{12}}[(1-m)(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + 2in\varepsilon_{xz}] \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} l = a_v + 2b \\ m = a_v - b \\ n = d\sqrt{3} \end{cases} \quad \text{E- 15}$$

où,  $\varepsilon_{ij}$  est l'élément du tenseur de déformation et  $l, m, n$  correspondent au rapport du déplacement en énergie de la bande considérée sur la déformation. Ils sont définis à partir des potentiels de déformation  $a_v, b, d$  qui sont respectivement les potentiels de déformation hydrostatique, de déformation de cisaillement et le second potentiel de déformation de cisaillement.

La diagonalisation de l'hamiltonien conduit à deux valeurs propres deux fois dégénérées, permettant d'obtenir la variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la contrainte dans le cas des sous-bandes de trous lourds (hh) et de trous légers (lh).

$$\begin{aligned} \left. \frac{dE_g}{d\sigma} \right]_{hh} &= a_v(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + A \\ \left. \frac{dE_g}{d\sigma} \right]_{lh} &= a_v(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) - A \end{aligned} \quad \text{E- 16}$$

avec  $A = d^2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{xz}^2 + \varepsilon_{yz}^2) + b^2(\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 - \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}))$

#### IV.1.a. Contrainte hydrostatique

Une contrainte est dite hydrostatique si les forces qui s'appliquent sur un volume ne modifient pas la symétrie. La Figure I.15 schématise l'effet d'une contrainte hydrostatique qui modifie le volume  $V_1$  en  $V_2$  en réduisant les dimensions  $x, y, z$  sans en affecter la symétrie intrinsèque.

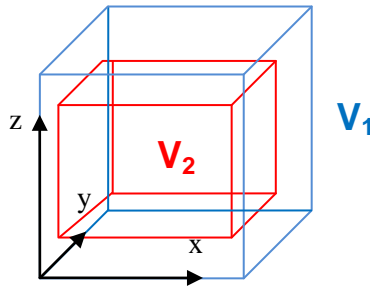


Figure I.15 - Représentation schématique de la contrainte hydrostatique

Dans ce cas, tous les termes non diagonaux du tenseur des déformations  $\varepsilon_{ij} = 0$  avec  $i \neq j$  sont nuls et les termes diagonaux sont égaux,  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_j$  avec  $i = j$  ( $A=0$  dans l'équation E- 16). L'hamiltonien se trouve sous une forme diagonale et il ne modifie que l'écart énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction. Dans ce cas, la contrainte est assimilée à un scalaire. La relation E- 16 devient alors l'équation E- 17.

$$\left. \frac{dE_g}{d\sigma} \right]_{hh} = a_v(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) = 3a_v\varepsilon_{xx} \quad \text{E- 17}$$

#### IV.1.b. Contrainte bi-axiale

Une contrainte est dite bi-axiale quand la force appliquée dans deux directions de l'espace x et y est identique et de sens opposé dans la direction z. La Figure I.16 schématise l'effet d'une contrainte bi-axiale qui modifie le volume  $V_1$  en  $V_3$ , la structure passe d'un système cubique à une structure tétraogonale, en augmentant la dimension suivant z et en réduisant les dimensions suivant x et y.

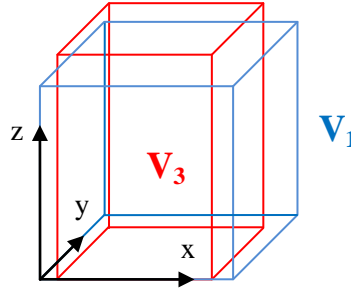


Figure I.16 - Représentation schématique de la contrainte bi-axiale

L'hamiltonien est également diagonal, mais ce type de contrainte fait lever la dégénérescence des bandes de trous lourds et légers puisque  $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$  et  $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0$ . La relation E- 16 devient E- 18.

$$\left. \frac{dE_g}{d\sigma} \right]_{hh, lh} = a_v(2\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) + \sqrt{b^2(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz})} \quad \text{E- 18}$$

Connaissant la valeur des déformations,  $(\varepsilon_{ij})$  il devient ainsi possible de calculer la dépendance de l'énergie de la bande interdite  $E_g$ , pour n'importe quel type de symétrie du tenseur des contraintes.

La distribution du stress mécanique dans les couches épitaxiées a été largement étudiée [20,21]. Par exemple, G.H. Olsen et al. s'est particulièrement intéressé aux diodes laser à hétérostructure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  et il a montré que la fiabilité des diodes laser augmente lorsque le puits quantique est en compression [20]. Dans le cas d'une zone active  $\text{AlGaAs}$ , la contrainte mécanique en compression augmente avec la fraction d'Aluminium et permet une forte diminution des dislocations dans la structure, appelées défauts de type DLDs ("Dark Line Defects").

Dans les DLPs commerciales, le puits quantique peut être contraint soit en tension, soit en compression, en fonction de sa composition. Par exemple, pour les DLPs émettant à 808nm qui font

l'objet de notre étude, les différents matériaux constituant le puits quantique et l'hétérostructure sont listés dans le Tableau I.3.

Puits quantique	Hétérostructure	Contrainte	Courant de seuil
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$	Non contraint	$J_{\text{th}0}$
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{Al}_y\text{As}$	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{Al}_y\text{As}/\text{GaAs}$	En compression	$J_{\text{th}} > J_{\text{th}0}$
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y/\text{GaAs}$	En tension	$J_{\text{th}} < J_{\text{th}0}$

**Tableau I.3 – Principales hétérostructures de diodes laser sur substrat GaAs émettant à 808nm**

## IV.2. Contraintes mécaniques intrinsèques

Dans la conception des lasers à semi-conducteurs, l'introduction de contraintes mécaniques dans la zone active est largement utilisée. Les contraintes induites modifient le gap, la bande de valence et les constantes du matériau. A ce stade de la conception, les caractéristiques d'émission peuvent être modifiées : la longueur d'onde centrale, polarisation de la lumière et les caractéristiques du faisceau.

Les contraintes mécaniques intrinsèques sont souvent générées pendant le processus de fabrication des diodes laser, elles se distinguent comme suit :

- Contrainte bi-axiale introduite dans l'hétérostructure pendant le processus d'épitaxie. La zone active et/ou les couches de confinement proches sont en désadaptation de maille par rapport aux autres couches et au substrat.
- Contraintes locales introduites lors des étapes de traitement de la plaque, comme le dépôt de couche d'isolation électrique, les couches de métallisation et la définition de la zone active (ruban d'injection). Ces contraintes localisées permettent la sélectivité des modifications des caractéristiques d'émission laser, y compris la contrainte pour modifier l'indice de guidage optique latéral par effet photo-élastique [22].

La superposition de ce type de contraintes mécaniques, indépendamment des contraintes induites intentionnellement, est généralement utilisée pour adapter les caractéristiques électro-optiques des diodes laser.

## IV.3. Contraintes mécaniques extrinsèques

Les contraintes extrinsèques dans les diodes laser de puissance sont principalement induites pendant les processus d'assemblage. Compte tenu des dimensions géométriques des barrettes (1cm de large et 1,2mm de cavité), ces contraintes sont très importantes et peuvent affecter la durée de vie du composant [23]. Le report d'une barrette de diodes laser de puissance sur son dissipateur induit des contraintes mécaniques essentiellement liées à la différence existant entre le coefficient d'expansion thermique (CTE) du substrat GaAs et du dissipateur thermique utilisé, qui est généralement à base de cuivre.

L'utilisation d'une brasure plus ou moins ductile va atténuer une partie du stress mécanique induit par le processus d'assemblage, ce type de brasure est choisi pour sa ductilité et compense les différences de CTE des matériaux à assembler. Mais, même avec des matériaux très tendres, comme l'indium, se caractérisant par une faible limite d'élasticité, l'accumulation de petites zones mécaniquement stressées sur l'ensemble de la barrette n'est pas négligeable et génère une concentration de contraintes au centre de la barrette [24]. Par contre, le report à l'indium représente un problème majeur dans les DLPs. En effet, le fonctionnement des DLPs et plus précisément la densité de courant injectée est à l'origine du phénomène d'électro-migration de l'Indium. Après plusieurs milliers d'heures de fonctionnement, des analyses métallurgiques ont permis de détecter la croissance de composés intermétalliques, de type AuIn et AuIn<sub>2</sub>, issus d'une réaction entre la brasure et les couches de métallisation (Au) présentes à la fois sur la barrette et sur l'embase [25].

En revanche, les joints AuSn utilisés pour le report des barrettes sur un intermédiaire en CuW, sont moins ductiles et d'une épaisseur très faible (5µm) de façon à atténuer les contraintes mécaniques résiduelles liées à la brasure. Toutes les contraintes mécaniques résultant de la désadaptation du CTE entre le dissipateur et le substrat GaAs sont directement transférées à la barrette. L'usage d'un intermédiaire mécaniquement adapté au substrat atténue fortement les contraintes mécaniques résiduelles dans la barrette [36]. Par contre, la fiabilité des joints AuSn est grande; l'AuSn est bien adapté à un fonctionnement à haute température (~125°C) et il est souvent utilisé pour les applications spatiales et militaires. Il ne montre aucune dégradation significative pendant les chocs mécaniques et le seuil de la densité de courant responsable du phénomène d'électro-migration est très élevée [26]. Sans l'usage d'un intermédiaire avec un CTE très proche de GaAs ( $6,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ), la solidification de la brasure AuSn pendant le processus de report va induire des contraintes mécaniques dans la barrette initiant ainsi la dégradation rapide du composant. Dans le cas où l'AuSn est utilisé pour braser directement des barrettes GaAs sur embase en cuivre, la barrette peut se fissurer pendant le processus de solidification de la brasure [27]. Néanmoins, l'utilisation de l'AuSn reste un compromis entre les caractéristiques mécanique du dissipateur d'un côté et la résistance thermique du composant de l'autre. Ceci est dû à la faible conductivité thermique des matériaux à base de cuivre adapté mécaniquement aux substrats GaAs.

Pour les deux techniques de brasage l'indium et l'AuSn, la brasure se présente sous une préforme ou un dépôt par évaporation sur le dissipateur. Les préformes AuSn sont disponibles avec une épaisseur inférieure à 20µm, alors que les préformes indium sont limitées à 20µm d'épaisseur.

Les facteurs à l'origine de l'augmentation du stress mécanique dans la brasure située entre la barrette et le dissipateur thermique, sont :

- la température,
- le régime et la durée de fonctionnement,

- la qualité et la pureté des métallisations de la barrette,
- l'alignement géométrique de la barrette lors du report,
- les conditions ambiantes pendant le brasage (température, atmosphère, ...),
- la force d'appui appliquée sur la barrette pendant le brasage et les forces de serrage des vis utilisée pour finaliser le composant.

Ces paramètres doivent donc être parfaitement adaptés et optimisés pour les différents processus de fabrication. Outre les paramètres généraux, la barrette reste un élément très fragile, nécessitant des précautions de manipulation très importantes lors du processus de fabrication, afin de d'anticiper les défauts et les pollutions. Par exemple, pour certaines barrettes, le nettoyage de la facette miroir n'est pas réalisable sans dégradations de la passivation, en raison des matériaux utilisés par le fabricant pour la passivation des facettes miroirs. Par conséquent, il faut éviter les points suivants :

- la contamination ou les chocs mécaniques causés lors de la manipulation des barrettes,
- les émanations de résidus provenant de la brasure (solvants organiques),
- l'application de flux sur les surfaces à joindre pour améliorer la mouillabilité.

L'inhomogénéité de la brasure le long de la barrette et l'apparition de bulles de brasures est le résultat de l'échec de l'assemblage qui peut être du à un mauvais parallélisme de la barrette et l'axe de montage. Ces défauts peuvent conduire à une dégradation de la résistance thermique et provoquer des zones fragiles dans la brasure qui est due à la formation d'intermétalliques entre la brasure et la couche de métallisation de la barrette, ceci se traduit par un manque de brasure. Ce type de défauts induit une inhomogénéité des contraintes mécaniques le long de la barrette et accélère la dégradation du composant.

La Figure I.17 schématise un exemple de la courbure de la barrette après les étapes d'assemblage, cette courbure est facilement obtenue au moyen de la mesure de la courbure géométrique (ou Smile) de la barrette. On peut en déduire que les couches constituant la barrette peuvent être impactées suivant deux directions : en tension et/ou en compression, en pratique le type de contraintes n'est pas homogène le long de la barrette.

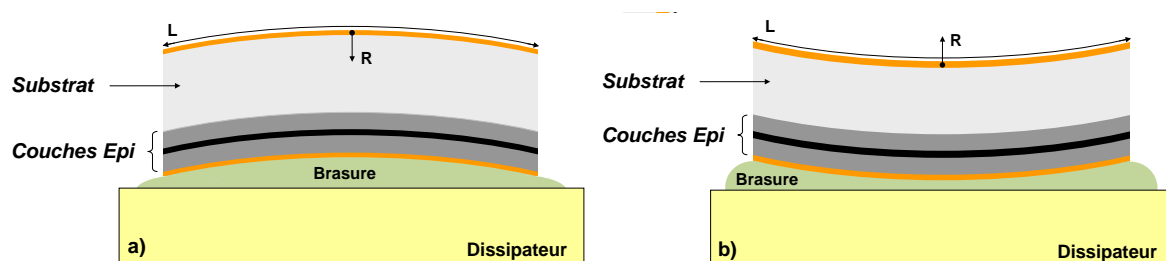


Figure I.17 - Représentation de la courbure de la barrette de diode laser liée au processus d'assemblage (effet de "smile")

## IV.4. Degré de polarisation : Définition et méthodologie de mesure

### IV.4.a. Mesure par électroluminescence

Dans les diodes laser à hétérostructure, la polarisation du gain spectral est liée à la probabilité de transition des états hh et lh, et détermine le type du mode d'émission [28]. Les lasers à semi-conducteurs III-V, ayant une structure cristalline cubique zinc-blende (ex. GaAs, InP), possèdent des propriétés électro-optiques linéaires et les modes de la cavité laser sont polarisés linéairement suivant deux états de polarisation :

- Le premier correspond au mode polarisé transversal électrique (TE); les transitions électrons-trous lourds (e-hh) contribuent fortement sur gain et son vecteur champ électrique est orienté suivant le plan des couches d'épitaxies (horizontalement).
- Le second est lié au mode polarisé transversal magnétique (TM); la probabilité de transition électrons-trou légers (e-lh) est beaucoup plus grande que les transitions e-hh et son vecteur champ électrique est orienté perpendiculairement au plan des couches d'épitaxies (verticalement).

De manière générale, le degré de polarisation est défini par la relation E- 19 et correspond à la différence du taux de polarisation du rayonnement émis suivant les modes TE et TM.

$$DOP = \frac{I_{TE}}{I_{TE} + I_{TM}} - \frac{I_{TM}}{I_{TE} + I_{TM}} = \frac{I_{TE} - I_{TM}}{I_{TE} + I_{TM}} \quad \text{E- 19}$$

où,  $I_{TE}$  et  $I_{TM}$  représentent respectivement l'intensité du rayonnement émis suivant les modes TE et TM.

Dans une hétérostructure à puits quantique non contraint, le rayonnement émis est essentiellement suivant le mode TE. Cependant, la polarisation du rayonnement émis dans une hétérostructure à puits quantique est influencée par :

- l'orientation cristalline des matériaux semi-conducteurs,
- la forme géométrique de la zone active,
- les dimensions de la zone active [2-6],
- la présence de contraintes mécaniques internes et/ou externes [7-10].

La méthode de mesure du DOP du rayonnement émis par les DLPs à l'échelle de l'émetteur individuel sera détaillée dans le chapitre 2.

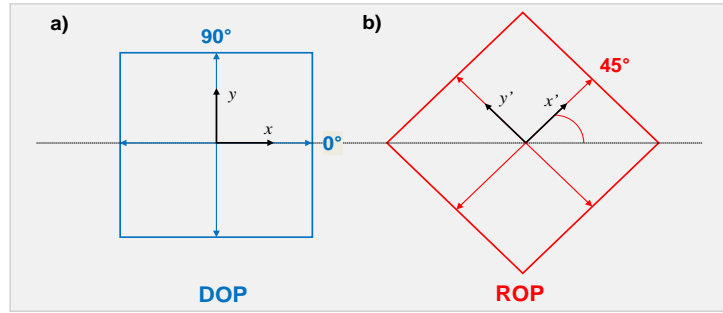
### IV.4.b. Degré de polarisation de la photoluminescence

Une technique de caractérisation des contraintes mécaniques au niveau de la facette d'émission des DLPs réside dans la mesure du degré de polarisation de la photoluminescence induite. Dans ce domaine, l'équipe de D.T. Cassidy de l'Université McMaster (Canada) a proposé une méthode permettant d'identifier le type et l'intensité de la contrainte en se basant sur la mesure de la polarisation



de la photoluminescence [29]. Cette méthode s'applique sur un matériau isotrope et comme l'illustre la Figure I.18, elle se décompose en deux grandes parties [29] :

- la première partie correspond au degré de polarisation à  $90^\circ$  de la photoluminescence (DOP-PL) qui est proportionnelle à la différence des composantes de la déformation selon deux directions orthogonales [30],
- la seconde partie correspond au degré de polarisation à  $45^\circ$  de la photoluminescence (ROP-PL) qui est proportionnel à la déformation en cisaillement dans le plan (110).



**Figure I.18 - Configuration de mesure de la polarisation de la photoluminescence**

- Le DOP de la photoluminescence (DOP-PL) d'un matériau isotrope est donné par E- 20.

$$DOP - PL = \frac{I_{TE} - I_{TM}}{I_{TE} + I_{TM}} = -C_\varepsilon (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) = -C_\varepsilon \frac{1 + \nu}{E} (\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) \quad \text{E- 20}$$

où,  $I_{TE}$  et  $I_{TM}$  représentent respectivement l'intensité de la photoluminescence aux positions suivantes du polariseur :  $0^\circ$  et  $90^\circ$  (voir Figure I.18-a),  $C_\varepsilon$  est une constante positive qui dépend du matériau étudié (GaAs ou InP).

- Le ROP de la photoluminescence (ROP-PL) d'un matériau isotrope est donné par E- 21.

$$ROP - PL = \frac{I'_{TE} - I'_{TM}}{I'_{TE} + I'_{TM}} = 2C_\varepsilon \varepsilon_{xz} = C_\varepsilon \frac{1}{G_{xz}} \sigma_{xy} \quad \text{E- 21}$$

où,  $I'_{TE}$  et  $I'_{TM}$  sont respectivement l'intensité de la photoluminescence aux angles du polariseur suivants :  $45^\circ$  et  $45+90^\circ$  (voir Figure I.18-b). Les constantes d'élasticité et les coefficients de poisson des matériaux à base d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  utilisée dans E- 21 ont été déterminées par M. Krieger et al [31].

## V. Contexte et objectifs de la thèse

Un des éléments majeurs du cahier des charges, auquel doit répondre l'industrie spatiale, réside dans l'application de normes très strictes en termes de qualité et de traçabilité. En effet, le challenge est de concevoir des dispositifs et des instruments de mesure extrêmement fiables pouvant fonctionner pendant une longue durée en évitant toute maintenance.

Les barrettes de DLPs empilées (ou Stacks) sont utilisés dans plusieurs programmes pour le spatial comme source de pompage des lasers solides, essentiellement les lasers Nd:YAG qui nécessite une pompe à 808nm fonctionnant en régime QCW (typiquement : durée de l'impulsion électrique : 50 à 200µs / fréquence : 10 à 100Hz) à une puissance crête de 100W par barrette. Ces composants représentent une partie majeure (~40%) du coût de l'instrument laser. La fiabilité et les performances constituent un point critique pour ces diodes de pompe en particulier pour un fonctionnement dans un satellite, en effet la défaillance occasionne un arrêt définitif de l'instrument laser.

Dans le Tableau I.4, nous avons répertorié les différentes missions spatiales dans lesquelles on trouve un instrument intégrant une composante à base de Laser.

Mission (Agence)	Pompes	Laser	Date	Durée de vie
Apollo (NASA)	Lampe Flash	Q-switched ruby laser	1971	4 jours
LITE (NASA)	Lampe Flash	Q-switched Nd:YAG	1994	220h
CLEMENTINE (NASA)	Diodes Laser	frequency-doubled Nd:YAG	1994	3 mois
SLA (NASA)	Diodes Laser	Q-switched Nd:YAG	1996	80h
MOLA (NASA)	Diodes Laser	Nd:YAG	1996	687 jours
GLAS (NASA-Goddard)	Diodes Laser		2003	1,13×10 <sup>9</sup> Tirs
CALIPSO (NASA-CNES)	Diodes Laser	Nd:YAG	2006	3×10 <sup>9</sup> Tirs
SELENE (JAXA)	Diodes Laser	Nd Cr:YAG	2007	A ce jour
ADM-Aeolus (ESA)	Diodes Laser	Nd:YAG, tripled	2011	xxx
ALADIN	Diodes Laser	Nd:YAG, tripled	2011	xxx

**Tableau I.4 – Liste des missions spatiales dans lesquelles on trouve un instrument intégrant une composante à base de Laser**

Les tests de qualification des diodes laser de puissance pour le spatial est toujours en phase de standardisation. En revanche, dans un récent rapport interne de la NASA, rédigé par M.N. Ott et son équipe [32], on peut néanmoins connaître les différents tests de qualification que la NASA utilise en interne pour qualifier les barrettes de DLPs empilées "Stacks" émettant à 808nm pour le spatial.

Dans le cadre du programme spatial d'observation de la Terre appelé "Planète vivante » [33], l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a planifié de mettre en orbite des instruments de mesure à base de laser solide pompé par des diodes de puissance (DPSSL). Parmi ces missions, "EarthCARE" (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) portera son attention sur les nuages, les minuscules particules de l'atmosphère – les aérosols – et leur influence sur le rayonnement atmosphérique. EarthCARE établira notamment des profils verticaux des aérosols naturels et issus de l'homme, enregistrera la répartition de l'eau et de la glace et leur transport par les nuages, et étudiera les interrelations entre les nuages et les pluies, ainsi que leur effet sur le rayonnement. Il sera possible d'en déduire des profils du réchauffement atmosphérique et du refroidissement par les nuages, à partir de la combinaison des aérosols mesurés et des éléments nuageux.

"EarthCARE" contribuera ainsi à une meilleure compréhension de notre climat et fournira de précieuses données pour les recherches dans ce domaine et pour les modèles numériques de prévision des phénomènes météorologiques. Pesant environ 1,7 tonne, le satellite doit être lancé en 2013. "EarthCARE" passera trois ans à prendre des mesures à partir d'une orbite polaire (97° d'inclinaison), à une altitude d'environ 400 km.

Astrium Allemagne est responsable de la gestion industrielle "d'EarthCARE", ainsi que des activités d'intégration et d'essais. Astrium UK fournit, pour sa part, la plate-forme satellitaire. Le satellite est équipé de quatre instruments – deux senseurs passifs et deux actifs –, qui fourniront un ensemble de données unique, dans le cadre d'une seule mission satellitaire. Astrium France fournit l'instrument laser actif ATLID, et Surrey Satellite Technology Ltd., filiale de Astrium, fournit l'imageur multi-spectral (MSI).

le programme ALADIN dans lequel l'instrument laser est appelé l'ATmospheric backscattered LIDar (ATLID) dans lequel l'émission ultra-violet du transmetteur du Lidar est issue d'un laser Nd :YAG triplé en fréquence et pompé par Stacks QCW émettant à 808nm en mode TE. Ces derniers restent un élément clé dans les lasers solide pompés par diodes (DPSSLs).

Dans le cadre d'un précédent programme nommé "ADM-Aeolus" (lancement reporté à 2013), l'étude de la fiabilité du laser a montré que les Stacks QCW émettant à 808nm sont suffisamment fiables pour répondre aux exigences du profil d'une telle mission [34]. Ces Stacks ont été fabriqués par Quantel Laser Diodes suivant une précédente technologie d'empilement et seront utilisés pour la première fois dans le concept du LIDAR ALADIN en intégrant une nouvelle technologie d'empilement des barrettes. Cependant, l'industrialisation de cette dernière est récente et l'utilisation de ces composants dans le domaine spatial nécessite de poursuivre l'évaluation de leur fiabilité et de rendre reproductible les processus de fabrication et de caractérisation. Pour cela, le cahier des charges proposé par Quantel Laser Diodes dans ce programme se base sur :

- La définition et la conception d'une technologie de Stacks QCW émettant à 808nm avec une durée de vie très importante ( $> 10 \times 10^9$  tirs) démontré expérimentalement par des tests de vieillissement menés au sol.
- La maîtrise d'un processus de fabrication reproductible; ceci devant être démontré par la validation des contrôles appropriés, de traçabilité et des critères d'acceptation.

Ce programme va permettre de durcir la conception des Stacks QCW et de valider les processus de fabrication sachant que la technologie des Stacks QCW émettant à 808nm de Quantel Laser Diodes a montré auparavant une forte robustesse pour les conditions spécifiques de l'environnement spatial : vibrations mécaniques, chocs thermiques et radiations [34].

Cette thèse s'inscrit donc dans ce contexte avec pour principal objectif l'analyse de défaillance non destructive des diodes laser de puissance destinées au LIDAR « ATLID/Earth Care » à travers la

mise en place d'une technique de caractérisation électro-optique basée sur l'émission laser de chaque émetteur de la barrette.

Cette technique sera aussi appliquée à d'autres types de composants réalisés par Quantel Laser Diodes dans une optique identique à celle accomplie sur les composants destinés au spatial. Le travail de recherche sera focalisé sur les objectifs suivants :

- Mettre en place un banc de caractérisation électro-optique, modulable aux différents types de barrettes de diodes laser, permettant de collecter le rayonnement émis par chaque émetteur et de mesurer les paramètres électro-optiques suivants :
  - la puissance optique émise à un courant donné,
  - le spectre optique d'émission stimulée,
  - le degré de polarisation,
- Evaluer l'assemblage des barrettes par des simulations thermomécaniques et thermiques.
- Mettre en place un critère pertinent de défaillance des DLPs pour les composants QCW destinés à un fonctionnement visant de très longues durées de vie (>10ans).
- Proposer et valider une méthodologie de caractérisation des DLPs qui intervient juste après les étapes d'assemblage, cette méthodologie permettant alors d'évaluer les étapes critiques de l'assemblage en terme de contraintes mécaniques induites lors du processus d'assemblage. La validité de la méthodologie sera argumentée par les résultats obtenus au travers des tests de vieillissement en courant à température constante (25°C).

Le paragraphe suivant sera consacré à la description des composants étudiés et des différents types d'assemblage utilisés.

## **VI. Configuration des composants étudiés**

Le processus d'assemblage des barrettes de diodes laser de puissance est très important pour leur fonctionnement à très forte puissance non seulement d'un point de vue technique mais aussi d'un point de vue économique. Techniquement, la qualité de l'assemblage est critique et influence fortement les caractéristiques électro-optiques de la barrette, tels que la puissance optique émise, la longueur d'onde centrale, la polarisation du faisceau émis et la durée de vie. Economiquement, les processus d'assemblage, le contrôle de la qualité et les mesures électro-optiques contribuent fortement à la production des diodes laser de puissance. En raison d'un certain nombre de normes qui doivent être satisfaites en termes de tolérance, précision, sous-préparation des composants, contrôle du processus de report conduisent à la nécessité d'équipements spécialisés et des opérateurs expérimentés. Ce qui mène à un processus de fabrication qui peut dépasser 50% du coût total de la production d'une DLP.

Comme pour les autres composants électroniques ou optoélectroniques, l'assemblage des barrettes de diode laser de puissance doit satisfaire aux conditions suivantes :

- la stabilité mécanique des montages de report
- la manipulation manuelle,
- les contacts électriques sur les côtés n et p,
- le refroidissement du composant pour dissiper la chaleur produite et stabiliser la température de fonctionnement.

Les composants étudiés appartiennent à trois groupes de DLP à refroidissement passif :

- mono-barrette QCW,
- multi-barrettes QCW appelé "Stack QCW",
- mono-barrette CW.

Nous avons listé dans le Tableau I.5 les différents composants que nous allons aborder dans la suite de ce mémoire. L'intérêt de ce nombre de composant est la possibilité d'évaluer des DLPs montés avec différents processus d'assemblage au niveau barrette. Pour cela, le processus initialement utilisé est appelé "standard" et les nouveaux processus seront nommés "optimisés".

L'optimisation est obtenue au moyen de la caractérisation émetteur par émetteur. Le but est d'améliorer les performances des composants en termes de caractéristiques électro-optiques et leur fiabilité à travers la définition de critère de défaillance obtenue par l'analyse des résultats de vieillissement des composants et le suivi dans le temps des paramètres électro-optiques des émetteurs le long des barrettes.

Composant	Nombre de bar/composant	Nombre de Composants	Régime	Nombre d'émetteurs/Bar	Assemblage
<b>Mono barrette QCW</b>	1	5	QCW	25	Standard et optimisé
<b>Stack QCW</b>	3	1		25	Standard et optimisé
	4	1		optimisé	
	6	2		Standard et optimisé	
<b>Embase H</b>	1	4	CW	19	Standard

**Tableau I.5 - Type et caractéristiques des composants étudiés**

La partie suivante est consacrée aux principales étapes de report nécessaire pour la réalisation de chaque type de composant étudié. Nous avons négligé les étapes de câblage car ces étapes interviennent pour finaliser le composant et n'affecte pas la partie semiconducteur du composant.

## **VI.1. DLPs pour le régime quasi-continu**

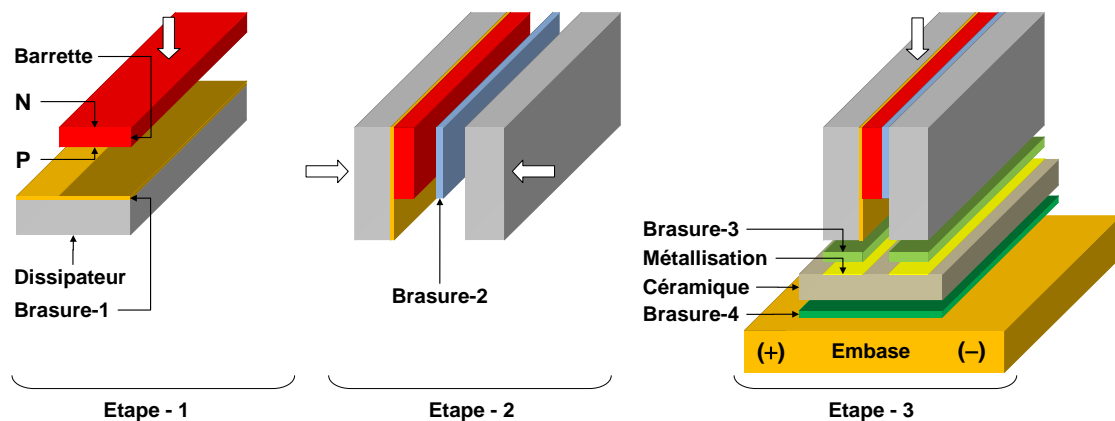
### **VI.1.a. Mono barrette QCW**

Le composant mono barrette QCW ou véhicule test est un composant constitué d'une seul barrette dans une configuration Stack (Figure I.19). Ce composant contient une barrette prise en sandwich entre deux dissipateurs en cuivre tungstène ( $Cu_{10}W_{90}$ ).

Figure I.19 - Image MEB d'un composant mono barrette QCW

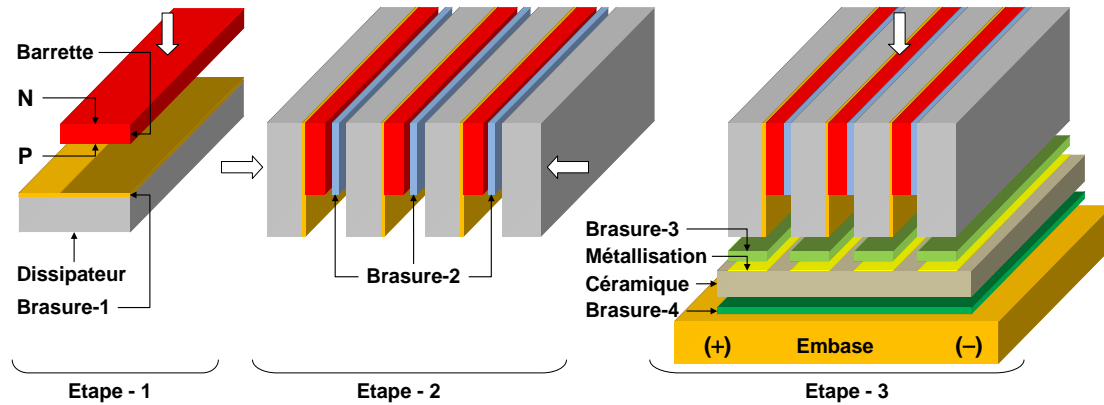
Les principales étapes de fabrication sont représentées par la Figure I.20 et se décomposent en trois étapes :

- Etape 1 : cette étape consiste au report du coté P de la barrette sur son dissipateur. La brasure est déposée par évaporation sur une face du dissipateur, son épaisseur initiale ne dépasse pas  $5\mu\text{m}$  et l'épaisseur du dissipateur dépend de la mission; elle peut varier de  $170$  à  $3000\mu\text{m}$ . l'élément ainsi réalisé est appelé SEB (Single Element Bar).
- Etape 2 : cette étape correspond à la mise en sandwich de la barrette à l'aide d'un dissipateur du même matériau que celui utilisé dans le SEB. Le coté N de la barrette est ainsi brasé au moyen d'une préforme de brasure sur un dissipateur.
- Etape 3 : le composant final est réalisé en brasant les dissipateurs sur une céramique métallisée au moyen de préformes de brasure. La céramique est brasée en même temps sur l'embase (en cuivre par exemple).



- le nombre de barrette pour moduler la puissance optique émise, le Stack pouvant comprendre 2 à 18 barrettes,
- le pas optique ou le pas des barrettes qui dépend fortement de l'épaisseur du dissipateur thermique.

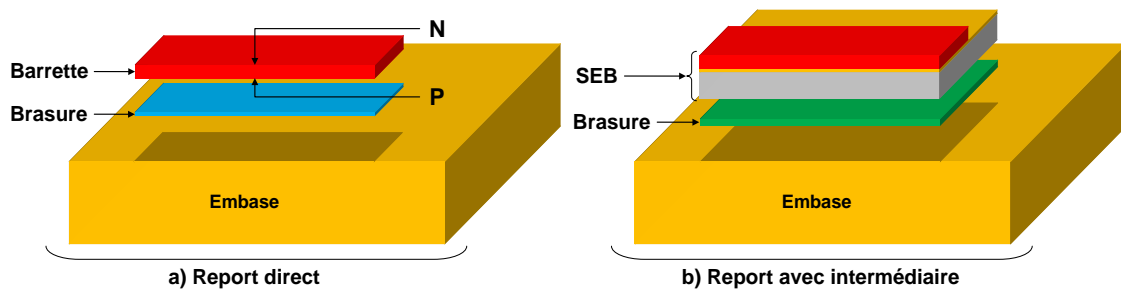
Les différentes étapes de réalisation des Stacks sont données dans la Figure I.21, elles sont quasi-identiques à celle décrite précédemment pour le composant mono barrette (Figure I.20). La seule différence réside dans l'étape 2, où plusieurs SEBs sont assemblés en même temps.



**Figure I.23 - Image d'une DLP pour le régime CW (appelé embase H)**

Ces composants sont réalisés suivant deux techniques d'assemblage. Ils se différencient par l'addition d'un intermédiaire  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  entre la barrette et l'embase en cuivre (Figure I.23) ce qui mène à une configuration SEB sur embase en cuivre :

- Report direct : brasage direct de la barrette sur l'embase en cuivre au moyen d'une préforme de brasure tendre.
- Report avec intermédiaire : brasage du SEB sur l'embase en cuivre au moyen d'une préforme de brasure tendre.





constante. L'analyse de défaillance et de préférence à travers une technique non destructive constitue un objectif préalable à la détermination des limites de fonctionnement de ces composants.

Ce chapitre s'est focalisé sur la compréhension de l'aspect diode laser de puissance dans un contexte industriel pour permettre le développement de méthodologies spécifiques destinées à l'analyse de défaillance et à l'optimisation de DLPs actuelles. Notre étude s'est plus particulièrement focalisée sur une technologie de barrette à maturité commerciale et sur une technologie de barrette en émergence, utilisée principalement comme sources de pompage de laser solides à 808nm. L'évolution des structures de diode laser à forte puissance impose donc, une constante progression et adaptation des techniques d'assemblage, alors que, les technologies des barrettes émettant dans le visible et l'infra rouge lointain restent en phase de développement ou en phase de mûrissement.

La dernière partie de ce chapitre décrit, dans un premier temps, les contraintes mécaniques dans les diodes laser de puissance en exposant l'influence et l'origine des contraintes mécaniques intrinsèques et extrinsèques dans les DLPs et l'impact des contraintes mécaniques sur la polarisation du rayonnement émis. Dans un deuxième temps, nous avons présenté une technique de caractérisation des contraintes mécaniques au niveau de la facette d'émission des DLPs en mesurant le degré de polarisation de la photoluminescence. Dans ce domaine, l'équipe de D.T. Cassidy de l'Université McMaster (Canada) a proposé une méthode permettant d'identifier le type et l'intensité de la contrainte en se basant sur la mesure de la polarisation de la photoluminescence [29]. Les résultats obtenus au moyen de cette technique, sur des dispositifs mono-barrette CW et QCW, sont présentés et analysés dans le chapitre III.

La suite du mémoire décrit le banc de caractérisation émetteur par émetteur développé dans le cadre de cette étude et le choix des conditions de mesure pour l'étude de la fiabilité des barrettes au niveau émetteur individuel. La caractérisation émetteur par émetteur possède un fort potentiel d'analyse et détient l'avantage d'être peu coûteuse et rapide par rapport à la majorité des autres techniques. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la recherche d'une méthodologie permettant d'obtenir un critère de défaillance précoce, afin de pouvoir optimiser le processus de report des DLPs garantissant une durée de vie étendue en conditions opérationnelles.

---

## VII. REFERENCES

- [1] Jörg Neukum, "*Innovation enriches high-power diodes laser market*" Technology Tutorials, Optics.org (2008).
- [2] J. Diaz, H.J. Yi, M. Razeghi, G.T. Burnham, "*Long-term reliability of Al-free InGaAsP/GaAs ( $\lambda = 808$  nm) lasers at high-power high-temperature operation*" Appl. Phys. Lett. 71 (21), pp. 3042-3044, (1997).
- [3] Donald G. Herzog, "*Application of semiconductor Laser Diode arrays*" Quantum Electronics, IEEE Journal of Vol. 9 (6), p. 673, (1973).
- [4] Wolfgang Horn "*Welding and Soldering with High Power Diode Lasers*" 62nd Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding, (IIW 2009).
- [5] A. Cosentino, A. Mondello, A. Sapia, A. D'Ottavi, M. Brotini, E. Nava, E. Stucchi, F. Trespidi, C. Mariottini, P. Wazen, N. Falletto, and M. Fruit, "*All-Solid Laser Transmitter for Space Based LIDAR Applications*" 22<sup>nd</sup> International Laser Radar Conference, (ILRC 2004).
- [6] M.K. Reed, W.J. Kozlovsky, R.L. Byer, G.L. Harnagel, and P.S. Cross, "*Diode-laser-array-pumped neodymium slab oscillators*" Optics Letters, Vol.13 N°3, (1988).
- [7] Stephen P. Najda, and John H. Marsh, "*Laser printing: Laser arrays transform printing*" Nature Photonics 1, pp. 387 – 389, (2007).
- [8] Rudolf Steiner, "*New laser technology and future applications*" Medical Laser Application, Volume 21, Issue 2, pp. 131-140, (2006).
- [9] Merrill M. Apter, "*Geographic trends will shift in global laser-diode market*", June 2005 issue of LASER FOCUS WORLD.
- [10] D.F. Welch, "*A brief history of high power semiconductor lasers*", IEEE, J. Selected Topics Quantum Electron. 6, p. 1470, (2000).
- [11] Lattice Parameter and Band gap Data ([www.veeco.com](http://www.veeco.com))
- [12] Safa O. Kasap and Peter Capper, "*Springer handbook of electronic and photonic materials*" Springer, 2006.
- [13] Marciantie, J.R., Agrawal, G.P., "*Beam filamentation and its control in high-power semiconductor lasers*" Proc. SPIE Physics and Simulation of Optoelectronic Devices VI, Vol. 3283, pp. 302-313. (1998).
- [14] Rosencher, E., Vinter, B, "*Optoélectronique*", Enseignement de la physique, Editions Masson, ISBN 2-225-82935-7, 2000.
- [15] Zh.I. Alferov, "*Classical heterostructures paved the way*", III-Vs Review ° Vol. 11, No. 1, 1998.
- [16] V. Berger, "*Principes physiques des lasers à semiconducteurs*", EDP Sciences 2002, DOI 10.1051/bib-sfo:2002056.
- [17] Arnaud Fily, "*Modèles pour Diodes Laser de Puissance*", Thèse de doctorat, Université Paris 11, (1998).
- [18] T.S. Moise, L.J. Guido, and R.C. Barker "*Strain-induced heavy-hole-to-light-hole energy splitting in (111)B pseudomorphic InGaAs quantum wells*", Physical Review B, Vol. 47, pp. 6758-6761 (1993).
- [19] G. E. Pickus, G. L. Bir "*Effect of deformation on the hole energy spectrum of germanium and silicon*", Sov. Phys. Solid state 1, p. 1502 (1960).
- [20] G.H Olsen and M. Ettenberg "*Calculated stresses in multilayered heteroepitaxial structures*", J. Appl. Phys. Vol. 45 N° 6 p. (1977).

- 
- [21] Beanland, R. , Dunstan, D.J. and, Goodhew, P.J. "*Plastic relaxation and relaxed buffer layers for semiconductor epitaxy*", Advances in Physics Vol. 45, Issue 2, , pp. 87-146, (1996)
- [22] P.A.Kirkby, P.R.Selway, and L.D.Westbrook "*Photoelastic waveguides and their effect on stripe-geometry GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As lasers*", J. Appl. Phys., Vol. 50, pp. 4567-4579 (1979).
- [23] M.L. Biermann, S. Duran, J.W. Tomm, A. Gerhardt and D. Lorenzen, "*Dependence on intrinsic strain of packaging induced strain in Quantum Well Laser diodes*", CLEO (2004).
- [24] Bachmann, Friedrich; Loosen, Peter; Poprawe, Reinhart (Eds.) "*High Power Diode Lasers Technology and Applications*", Chapitre 3: Boucke, Konstantin "*Packaging of Diode Laser Bars*" p 75. Series: Springer, Series in Optical Sciences, Vol. 128 (2007).
- [25] Frederick Felt, "*Laser Diode Destructive Physical Analysis Report for CALIPSO*", Goddard Space Flight Center, Report N° Q30275EV, QSS, (2003).
- [26] Xingsheng Liu, Ronald W. Davis, Lawrence C. Hughes, Michael H. Rasmussen, Rajaram Bhat, Chung-En Zah, and Jim Stradling, "*Study on the reliability of indium solder die bonding of high power semiconductor lasers*" J. Appl. Phys. 100, p. 013104, (2006).
- [27] Y.C. Liu, J.W.R. Teo, S.K. Tung, and K.H. Lam, "*High-temperature creep and hardness of eutectic 80Au/20Sn solder*", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 448, Issues 1-2, pp. 340-343 (2008).
- [28] M. Levy, Y. Berk, and Y. Karni, "*Effect of compressive and tensile strain on the performance of 808 nm QW High Power Laser diodes*", Proc. of SPIE, Vol. 6104, p. 61040B-1, (2006).
- [29] Daniel T. Cassidy, S. K. K. Lam, B. Lakshmi, and Douglas M. Bruce, "*Strain mapping by measurement of the degree of polarization of photoluminescence*", Applied Optics Vol. 43, N° 9 March 2004.
- [30] P.D. Colbourne and D.T. Cassidy, "*Imaging of stresses in GaAs diode lasers using polarization-resolved photoluminescence*", IEEE J. Quantum Electron. 29, pp. 62-68. (1993).
- [31] M. Krieger, H. Sigg, N. Herres, K. Bachem, and K. Köhler, "*Elastic constants and Poisson ratio in the system AlAs-GaAs*", Appl. Phys. Lett. Vol. 66 (6), p. 682, (1995).
- [32] Niels Eegholm, Muniz Engineering, Melanie Ott, Mark Stephen, Henning Leidecker, Jeannette Plante, "*High Power Laser Diode Array Qualification and Guidelines for Space Flight Environments*" NASA Parts and Packaging Program, (2006).
- [33] Hélière, A., Armandillo, E., Durand, Y., Culoma, A., and Meynard, R., "*LIDAR Instruments for ESA Earth Observation Missions*" Proceedings of the 22nd International Laser Radar Conference - ILRC (2004).
- [34] "*Critical laser components stand the test of time for ESA's wind mission Aeolus*" ESA News, 07 October 2007.
- [35] Yves Sainte marie, "*Impact des contraintes locales induites par le process et le packaging des diodes lasers de puissance sur la fiabilité de ces composants*" Thèse de doctorat, Spécialité : Sciences des matériaux, Université de Nantes (2004).
- [36] Martin, E., Landesman, J.P., Hirtz, J.P., Fily, A. "*Microphotoluminescence mapping of packaging-induced stress distribution in high-power AlGaAs laser diodes*" Appl. Phys. Lett. 75 (17), pp. 2521-2523, (1999).

# Chapitre II. Caractérisation émetteur par émetteur

---

## I. Introduction

L'objectif principal de ce travail de thèse se focalise sur la mise en place d'un banc de caractérisation électro-optique qui doit permettre de caractériser individuellement chaque émetteur présent dans une barrette de diodes laser de puissance (DLP) microassemblée afin d'évaluer l'impact des contraintes d'assemblage sur la fiabilité opérationnelle des barrettes.

Dans ce second chapitre, une synthèse bibliographique aborde les principales techniques physiques non destructives pour l'analyse des contraintes mécaniques résiduelles induites par le processus d'assemblage ainsi que les caractéristiques électro-optiques essentielles d'une DLP. Par la suite, le développement du banc de caractérisation électro-optique des barrettes au niveau émetteur sera décrit et les conditions de mesure des barrettes au niveau émetteur seront déterminées à partir d'une analyse fine de résultats expérimentaux obtenus pour différents courants en régime QCW et à plusieurs températures. Enfin, nous exposerons les caractérisations initiales effectuées sur les différents composants qui seront utilisés dans les chapitres suivants pour évaluer la fiabilité des différentes configurations de DLPs.

## II. Synthèse bibliographie

Une synthèse bibliographique exhaustive permet de montrer qu'il existe une variété de techniques expérimentales non destructives pour la caractérisation des contraintes résiduelles et des défauts dans les barrettes de DLPs. Parmi ces techniques, citons par exemple :

- la micro photoluminescence ( $\mu$ PL) [1],
- la spectroscopie par photo-courant (PCS) [2],
- le courant induit par faisceau laser (LBIC) [3],
- la microscopie par électroluminescence (ELM) [4],
- la microscopie par photoluminescence (PLM) [5].

Le Tableau I.1 résume les principaux paramètres physiques mesurés et le type de paramètre auquel chaque technique est sensible [6]. Ces techniques ont été mises au point pour étudier l'effet des

contraintes mécaniques induites par les processus d'assemblage et l'impact de défauts sur les performances électro-optiques des barrettes. Le profil des contraintes mécaniques résiduelles a été obtenu par la technique de  $\mu$ PL au moyen d'un balayage linéaire de la barrette. Les défauts cristallins ont été observés à l'aide de la microscopie par photoluminescence et les images d'ELM.

Les résultats expérimentaux obtenus par ces techniques ont montré que les défauts cristallins, à l'origine des recombinaisons non radiatives, sont régulièrement initiés après la phase du report et se propagent lorsque la contrainte mécanique augmente dans la barrette jusqu'à atteindre un point critique, dégradant alors le rendement électro-optique externe et par conséquent la dégradation des émetteurs puis au final de la barrette [8].

Technique	Symbole	Paramètre mesuré	Sensibilité	Réf.
Micro Photoluminescence	$\mu$ PL	Bande interdite ( $E_g$ ) du substrat et des couches de la zone active	Contraintes mécaniques résiduelles	[5]
Courant induit par faisceau laser	LBIC	Absorption des sous-bandes du puits quantique	- Défaut - Décalage d'absorption	[7]
Spectroscopie par photo-courant	PCS	- Transitions dans le puits quantique - $E_g$ des couches de confinement	Contrainte induite par l'assemblage	[6]
Microscopie par photoluminescence	PLM	- Défauts cristallins - Impuretés	- Centres de recombinaisons non radiatives	[9]
Microscopie par électroluminescence	ELM	- Défauts cristallins - $P_{out}$ relative des émetteurs - $I_{th}$ et $\eta_{ext}$ relatifs des émetteurs	- Centres de recombinaisons non radiatives - Température - $\Delta E_g$ - Pertes internes	[8]
Spectroscopie en champ proche	NFS	- Défauts cristallins - $\Delta\lambda/\Delta I$	- Zones de recombinaisons non radiatives - Température - Modification de la séparation du quasi-niveau de fermi	[7]

**Tableau I.1 - Techniques de caractérisation physique de défauts dans les barrettes de DLPs [6]**

Dans les paragraphes suivants, nous allons exposer le principe général des techniques de micro photoluminescence et de spectroscopie par photo-courant ainsi que des exemples de résultats expérimentaux adressés par notre synthèse bibliographique.

## II.1. Micro Photoluminescence ( $\mu$ PL)

Cette technique se base sur le phénomène de recombinaison radiative (par émission spontanée). L'excitation des électrons de la bande de valence est obtenue par un faisceau laser d'une longueur d'onde bien définie. Cette technique est largement décrite dans différents articles et ouvrages de référence [8-12] et elle est très utilisée pour évaluer la qualité globale des semi-conducteurs. Les informations qu'elle peut fournir sur les matériaux semi-conducteurs et sur les hétérostructures sont les suivantes :

- l'épaisseur des puits quantiques [9-10],
- la composition d'alliage III-V, comme par exemple l' $Al_xGa_{1-x}As$  [11],
- l'identification des défauts et des impuretés [9],

- la qualité des interfaces [12],
- l'évaluation des contraintes mécaniques dans les couches épitaxiées [13].

Dans les travaux de J.P. Landesman [13] et dans la thèse de Y. Sainte-Marie [14], cette technique a été appliquée sur des barrettes de DLPs émettant à 808nm et destinées à un fonctionnement en régime continu encore appelé CW pour une puissance optique de 40W. L'objectif était d'analyser le profil des contraintes mécaniques résiduelles le long de la barrette. Cette analyse a été réalisée sur des barrettes reportées P-down en utilisant deux processus d'assemblage, la description du processus d'assemblage est donnée dans le chapitre I, rappelons que :

- le premier processus consiste en un report direct sur une embase en cuivre : le CTE du cuivre est six fois plus élevé que celui de GaAs.
- le deuxième se base sur le report avec un intermédiaire en cuivre-tungstène ( $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ ) sur une embase en cuivre : le CTE du  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  est égal à celui de GaAs.

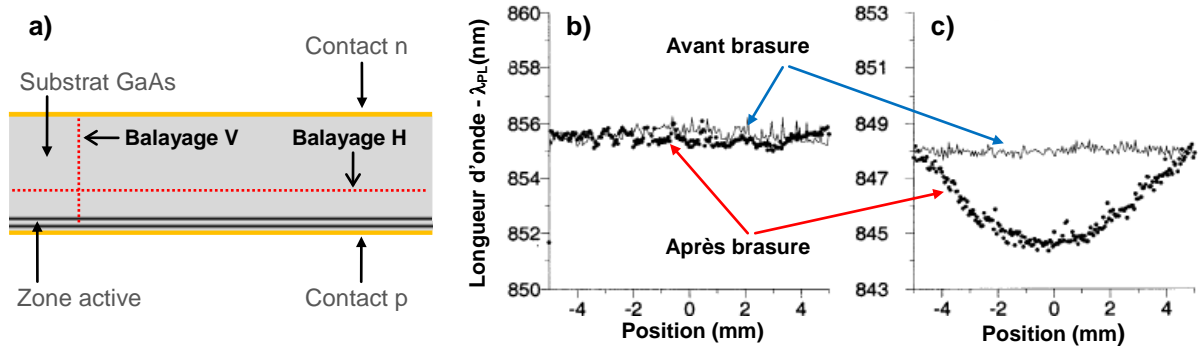
Les données utilisées pour l'interprétation des résultats correspondent à des lignes de balayage (horizontales, H ou verticales, V) révélant la longueur d'onde de la  $\mu\text{PL}$  et représentées dans la Figure I.1-a. Ces lignes peuvent être verticales ou horizontales. Le décalage du pic de la technique  $\mu\text{PL}$  ( $\lambda_{\text{PL}}$ ) en fonction de la contrainte hydrostatique dans un matériau GaAs est donné par E- 1 [14].

$$\left. \frac{d\lambda_{\text{PL}}}{dP} \right|_{\text{GaAs}} = -0,07 \frac{\text{nm}}{\text{MPa}} \quad \text{E- 22}$$

Dans cet exemple, la ligne de balayage est horizontale et elle est située au centre du substrat GaAs. Le profil des contraintes mécaniques résiduelles peut être évalué en comparant les résultats expérimentaux avant et après assemblage des barrettes. Les Figure I.1-b et 1-c illustrent cette comparaison [13]. Il a été montré que :

- les contraintes résiduelles induites par le report de la barrette avec intermédiaire en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  sont très faibles et montrent un profil uniforme le long de la barrette.
- le report direct de la barrette sur l'embase en cuivre induit d'importantes contraintes mécaniques en compression non uniformes avec un maximum au centre de la barrette.

Le report de la barrette avec un intermédiaire en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  atténue et homogénéise les contraintes mécaniques générées par le processus d'assemblage, contrairement au report direct sur embase en cuivre qui induit des contraintes mécaniques en compression non homogène le long de la barrette.



**Figure I.1 - a) Représentation de la ligne de balayage  $\mu$ PL verticale (V) et horizontale (H) [5] ; Profil des contraintes mécaniques suivant la ligne de balayage H dans une barrette brasée avec : b) AuSn sur intermédiaire en CuW et c) Indium sur embase en Cuivre [13]**

## II.2. Spectroscopie par photo-courant (PCS)

Le principe de cette technique correspond à l'utilisation de la diode laser comme photodiode mais non polarisée [15], le courant ainsi photo généré est collecté par les contacts électriques de la DLP. La source d'excitation peut être une lampe halogène dont le spectre est résolu avec un monochromateur [16]. En lumière polarisée la PCS peut au moins identifier, dans un puits quantique, les transitions bande à bande<sup>3</sup> du type  $hh_1-e_1$  et  $lh_1-e_1$  [17-18].

La barrette, d'1cm de large, présentée dans cette partie dispose d'une structure à puits quantique (In)GaAlAs/AlGaAs/GaAs émettant à 808nm et destinée à un fonctionnement en régime CW. Elle est constituée de 25 émetteurs au pas de 400 $\mu$ m. Les canaux d'isolation optique sont gravés dans les couches d'épitaxie et ont une profondeur de 4,5 $\mu$ m. La distance entre les canaux limitant deux émetteurs voisins est de 90 $\mu$ m. La largeur de la zone d'isolation électrique (non métallisée) des émetteurs est de 50 $\mu$ m. La barrette est reportée P-down, directement avec une brasure Indium sur embase en cuivre [19].

Les Figures I.2-a et 2-b illustrent respectivement les énergies de transitions  $lh_1-e_1$  et  $hh_1-e_1$  dans le puits quantique. M.L. Biermann précise que dans la partie de la barrette comprise entre 4 et 5mm (voir Figure I.2), correspondant aux émetteurs situés au centre de la barrette, l'analyse des spectres de la PCS a été limitée par l'augmentation du bruit. Ce constat a été aussi appliqué à la partie comprise entre 9 et 10mm. Dans ces zones, les données de la PCS sont inexploitable [19]. Pour les autres zones exploitables de la barrette, les résultats expérimentaux de la PCS montrent :

- un fort décalage des transitions  $lh_1-e_1$  et  $hh_1-e_1$  vers les faibles longueurs d'onde a été obtenu au niveau du centre de chaque émetteur ; ce décalage augmentant en se rapprochant du centre de la barrette.

<sup>3</sup> Rappelons que les transitions  $hh_1-e_1$  et  $lh_1-e_1$  correspondent respectivement aux recombinaisons électrons-trous lourds et électrons-trous légers (voir chapitre 1).

- un décalage additionnel, vers les faibles longueurs d'onde, des transitions bande à bande a été mesuré dans la zone d'isolation électrique des émetteurs.

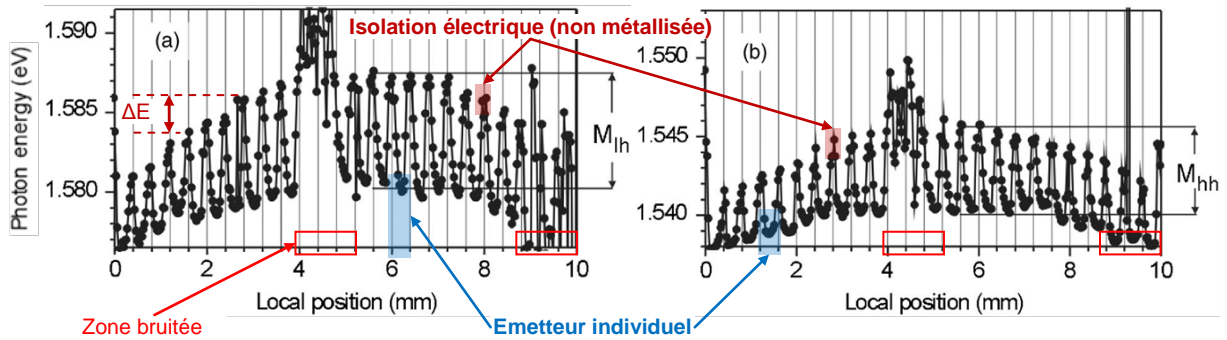


Figure I.2 - Position spectrale des transitions  $lh_1-e_1$  et  $hh_1-e_1$  le long de la zone active de la barrette d'après [19]

En supposant que les extrémités de la barrette sont non contraintes ( $\varepsilon = 0\%$ ), l'évolution spectrale ( $\Delta E$ ) de la PCS mesurée peut être convertie en déformation mécanique ( $\varepsilon$ ) par l'intermédiaire du coefficient  $\Delta E / \Delta \varepsilon$ . Ces derniers ont été calculés théoriquement et validés expérimentalement par M.L. Biermann [17], dans une structure identique à celle illustrée dans cet exemple. Les variations du coefficient  $\Delta E / \Delta \varepsilon$ , en fonction de la déformation intrinsèque appliquée le long de la direction (110), sont listées dans le Tableau I.2 [17].

La déformation mécanique résiduelle ( $\varepsilon$ ) en compression peut aussi être estimée par  $\varepsilon = \Delta \alpha \times \Delta T$ . En effet, il a été montré que la différence de dilatation thermique liée à la désadaptation des coefficients d'expansion thermique ou CTE ( $\alpha$ ) du matériau GaAs ( $\alpha_{\text{GaAs}} = 6 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) et de l'embase en cuivre ( $\alpha_{\text{Cu}} = 16 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) est à l'origine de la contrainte en compression. La géométrie particulière de la barrette est prédéfinie par le plan de clivage de la plaque (110) et il en résulte une déformation principalement uniaxiale le long de la direction (110).

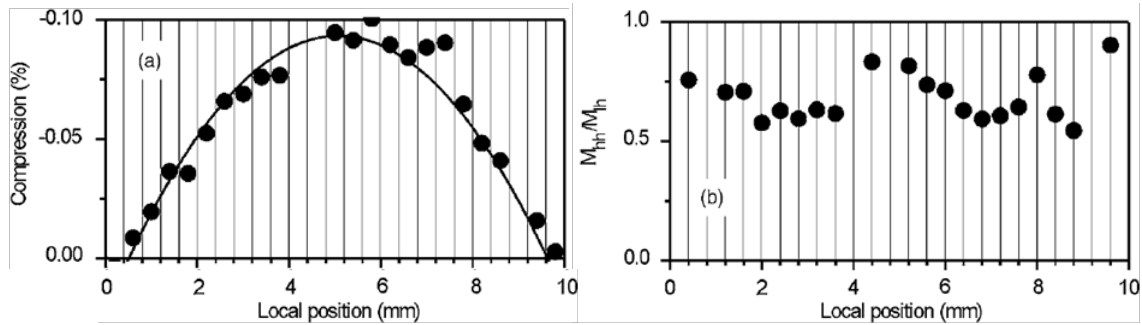
Pendant le processus d'assemblage, et plus précisément lors du refroidissement de la brasure indium ( $T_s = 157^\circ\text{C}$ ) à la température ambiante ( $T_a$ ), la déformation uniaxiale résiduelle calculée avec la formule  $\varepsilon = \Delta \alpha \times \Delta T$  est de l'ordre de  $\varepsilon(110) \approx -0,13\%$  avec  $\Delta T \approx T_s - T_a$  [19].

Déformation appliquée		0,0% (pas de contraintes)		-0,45% (en compression)		+0,45% (en tension)	
		Bulk $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$	QW	Bulk $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$	QW	Bulk $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$	QW
Compression	$hh_1-e_1$	-1,18	-1,86	-2,05	-2,12	-3,52	-0,672
	$lh_1-e_1$	-7,29	-6,22	-6,22	-5,69	-5,13	-7,32
Tension	$hh_1-e_1$	-1,42	-3,94	-3,85	-3,24	-2,43	-1,56
	$lh_1-e_1$	-7,29	-4,33	-4,65	-4,83	-6,47	-6,88

Tableau I.2 - Coefficients  $\Delta E / \Delta \varepsilon$  (eV) en fonction de la déformation intrinsèque appliquée le long de la direction (110) dans les différents matériaux de la structure de la barrette d'après [17]



La Figure I.3-a représente la déformation mécanique calculée à partir du Tableau I.2 dans le centre de chaque émetteur. Le profil de la déformation est non uniforme et présente un maximum de compression au centre de la barrette ( $\sim -0,1\%$ ).



**Figure I.3 - a) Déformations mécaniques dans la zone active de la barrette suivant la direction (110), calculée à partir du Tableau I.2 et b) rapport de modulation ( $M_{hh}/M_{lh}$ ) des énergies de transitions  $hh_1-e_1$  et  $lh_1-e_1$  dans la zone active de la barrette**

La comparaison du centre de l'émetteur et de la zone d'isolation électrique non métallisée montre que la variation de l'énergie des transitions  $lh_1-e_1$  ( $M_{lh}$ ) est plus importante que celle des transitions  $hh_1-e_1$  ( $M_{hh}$ ), comme l'indique la Figure I.3-a. Ces variations augmentent en se rapprochant du centre de la barrette. L'évolution du rapport  $M_{hh}/M_{lh}$  en fonction de la position, présenté en Figure I.3-b, est quasiment constant ( $\sim 0,7$ ) le long de la barrette. Ce résultat confirme que les déformations mécaniques résiduelles sont en compression, ce qui induit l'existence de déformations en tension susceptibles de lever la dégénérescence des sous-bandes de valences ( $hh_1$  et  $lh_1$ ) conduisant ainsi à de grandes variations des ratios  $M_{hh}/M_{lh}$  [17].

### II.3. Synthèse

L'étude bibliographique s'est focalisée sur deux des principales techniques d'analyse des contraintes mécaniques résiduelles dans les barrettes de DLPs que sont la  $\mu$ PL et la PCS. Dans le cas des barrettes reportées directement sur cuivre, ces deux techniques ont mis en évidence la présence d'une importante contrainte mécanique en compression non uniforme avec un maximum au centre de la barrette. Pour réduire les contraintes mécaniques résiduelles, il a été montré que le positionnement d'un intermédiaire entre la barrette et l'embase en cuivre, mécaniquement adapté au matériau GaAs, permet d'atténuer et d'uniformiser le profil des contraintes mécaniques résiduelles.

## III. Caractérisation globale des diodes laser de puissance

### III.1. Bancs de caractérisation globale des DLPs

Les caractéristiques électro-optiques permettent de déterminer les performances mais également de valider les étapes de fabrication des DLPs. La Figure I.4 schématise les différents bancs de caractérisation électro-optique des DLPs avec un double objectif :

- Caractériser le rayonnement émis en champ proche et en champ lointain.
- Extraire les caractéristiques électro-optiques suivantes : puissance optique émise en fonction du courant (P-I), courant-tension (I-V) et spectre optique (L- $\lambda$ ).

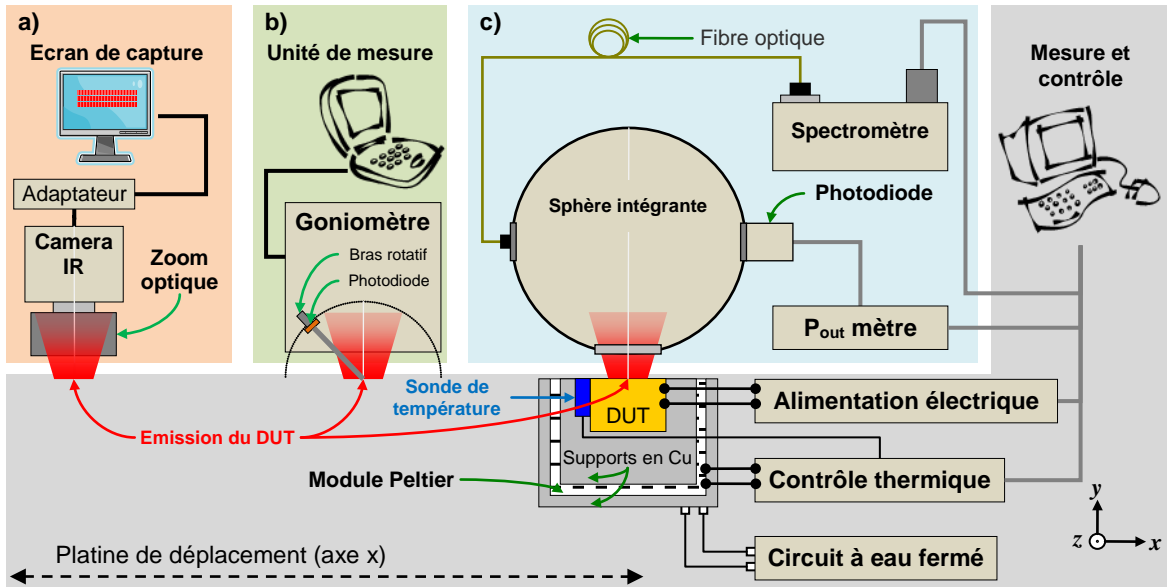


Figure I.4 - Schéma descriptif des différents bancs de caractérisation globale des DLPs : a) champ proche, b) diagramme de rayonnement et c) principaux paramètres électro-optiques

### III.1.a. Caractéristiques optiques

#### III.1.a.1. Champ proche

Le champ proche est issu de la répartition de l'intensité lumineuse émise par l'ensemble des émetteurs constituant la barrette de DLP dans le plan du miroir de sortie de la cavité. Le schéma descriptif de cette mesure est décrit dans la Figure I.4-a. Le composant est alimenté en courant, au-dessus de seuil laser, pour capturer, au moyen d'un système vidéo, l'image des faisceaux issus de tous les émetteurs. La Figure I.5 présente une image du champ proche obtenu sur un composant du type Stack QCW constitué d'un empilement de 4 barrettes chacune composée de 25 émetteurs d'une largeur de  $200\mu\text{m}$  avec un pas de  $400\mu\text{m}$ . Cette caractéristique permet de valider le fonctionnement de tous les émetteurs de manière qualitative et d'identifier très rapidement les émetteurs dégradés.

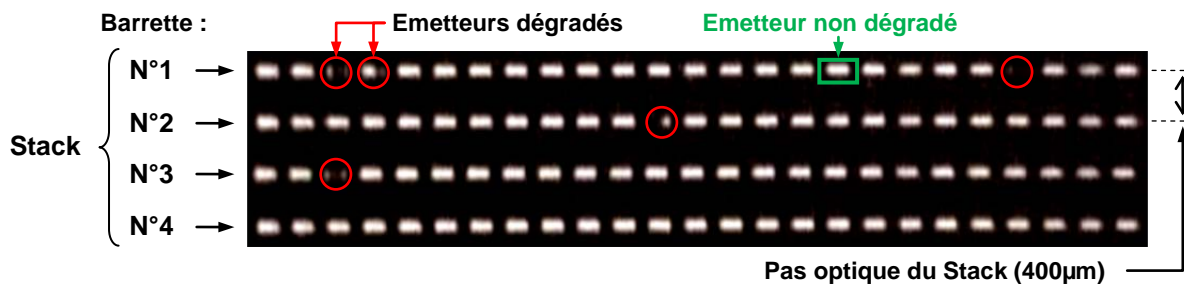


Figure I.5 - Cartographie spatiale du champ proche au-dessus du seuil laser d'un Stack de 4 barrettes QCW au pas optique de  $400\mu\text{m}$

### III.1.a.2. Champ lointain

Le champ lointain ou diagramme de rayonnement ( $P-\theta$ ) correspond à la transformée de Fourier du champ proche. Cela signifie que le rapport des largeurs du faisceau est inversé par rapport à celui de la surface d'émission (Figure I.6). La mesure est réalisée à l'aide d'une photodiode placée sur un bras rotatif motorisé (Figure I.3-b). Les valeurs typiques de champ lointain à  $1/e^2$  sont :  $80^\circ$  pour la direction  $\theta_{\perp}$  (axe rapide ou "fast axis") et  $12^\circ$  pour  $\theta_{\parallel}$  (axe lent ou "slow axis").

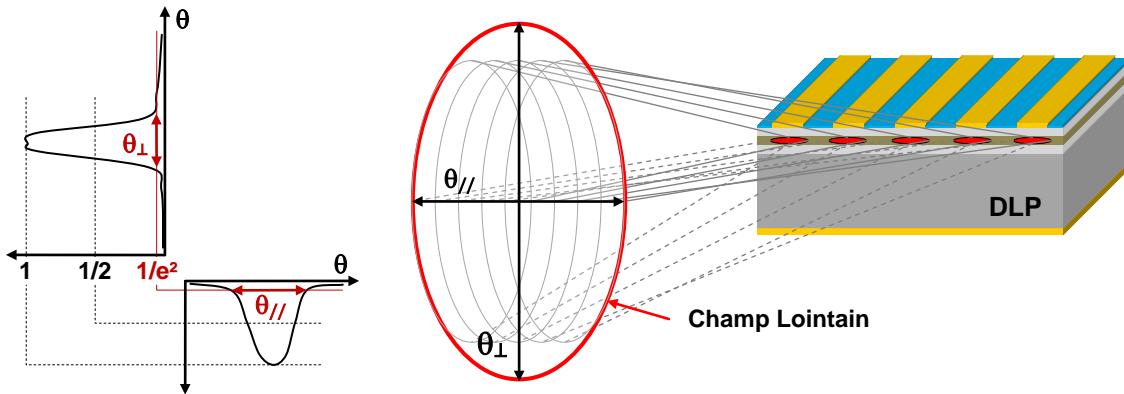


Figure I.6 - Schématisation du champ lointain d'une barrette de diodes laser de puissance

### III.1.b. Paramètres électro-optiques

#### III.1.b.1. Conversion électro-optique

Les propriétés de conversion d'énergie électrique en énergie optique de la barrette de DLP sont représentées par la caractéristique P-I. La Figure I.7 présente l'allure typique des caractéristiques électro-optiques d'un composant mono barrette QCW mesurée en conditions pulsées (100Hz/100µs), donnant la puissance optique, la tension et l'efficacité en fonction du courant, respectivement P-I, V-I et  $\eta$ -I.

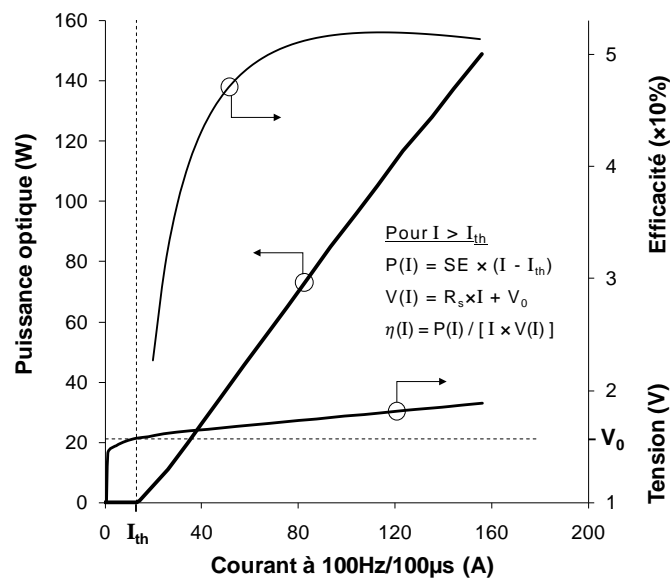


Figure I.7 - Caractéristiques typiques à  $25^\circ\text{C}$  de la puissance optique (P-I), de la tension (V-I) et de l'efficacité ( $\eta$ -I) en fonction d'un courant injecté en QCW (100Hz/100µs)

Ces caractéristiques permettent de déterminer les paramètres électro-optiques suivants :

- Rendement quantique externe

Le rendement quantique externe (SE) caractérise le fonctionnement de la DLP au dessus du seuil laser. Il est défini par la pente ( $dP/dI$ ) de la courbe P-I (Figure I.7) et représente le rapport entre le nombre de photons sortant de la cavité sur le nombre de paires d'électrons-trous injectées, au-dessus de seuil, et s'exprime en  $W/A$ . Le rendement externe est directement lié aux pertes intra-cavité appelées pertes internes.

- Courant de seuil

L'émission laser est obtenue lorsque les pertes du système sont inférieures au gain du milieu actif; ce dernier est une fonction de la densité de courant dans le composant. Quand le courant est tel que le gain est inférieur aux pertes, on se trouve dans un régime d'émission spontanée alors que si le courant est tel que le gain est supérieur aux pertes, il y a amplification de l'émission spontanée et par conséquent l'émission stimulée apparaît. Cette transition correspond au courant de seuil ( $I_{th}$ ) et ce courant caractéristique est calculé à partir d'une extrapolation de la partie linéaire du P-I.

- Efficacité électro-optique

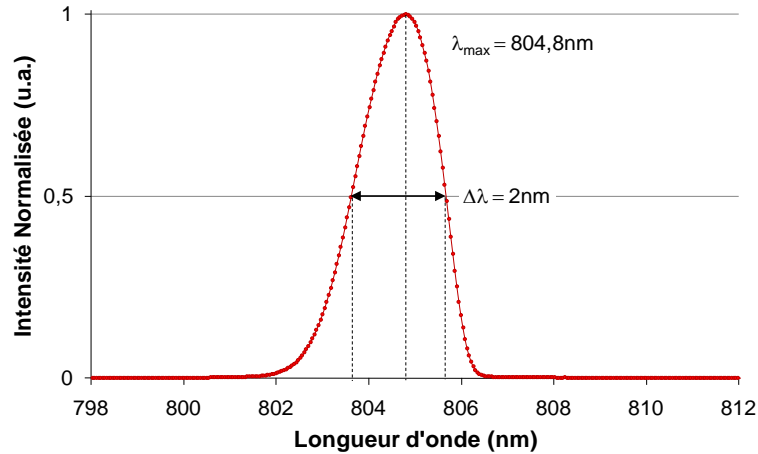
L'efficacité ou le rendement de conversion ( $\eta$ ) correspondant au rapport entre la puissance optique émise et la puissance électrique injectée. Dans le cas des barrettes fonctionnant en régime QCW à une puissance optique de 100W, le rendement électro-optique peut dépasser 60%.

- Résistance série

La résistance série ( $R_s$ ) est obtenue à partir de la courbe V-I (Figure I.7) et correspond à la pente de la partie linéaire au dessus de la tension de coude ( $V_0$ ). Cette valeur est fortement dépendante de la température de jonction.

### **III.1.b.2. Caractéristiques spectrales**

Le spectre d'émission stimulée expérimental est une caractéristique essentielle de la DLP, qui représente la distribution de la puissance optique émise en fonction de la longueur d'onde (Figure I.8). Le spectre en longueur d'onde est ajusté principalement par la composition des matériaux de la structure d'épitaxie de la zone active. Etant donné que la longueur d'onde varie avec la température de jonction, la mesure du spectre d'émission optique est réalisée à une température constante de l'embase au moyen d'un module de régulation à effet Peltier.



**Figure I.8 - Spectre optique typique à 25°C d'une barrette de diodes laser de puissance en régime QCW (100A - 100Hz/200µs)**

A l'issue de l'obtention des caractéristiques électro-optiques initiales ( $t_{ini}$ ), les DLPs sont soumises à une phase de déverminage (encore appelé "burn-in"). Elle consiste à faire fonctionner le composant à une puissance optique supérieure de 20% à la puissance optique nominale pendant une durée bien déterminée et dépendante du profil de mission. Après le déverminage, les DLPs sont à nouveau mesurées afin d'obtenir les caractéristiques électro-optiques encore appelées caractéristiques à  $t_0$ . La comparaison de ces mesures avant et après le déverminage ( $t_{ini}$  et  $t_0$ ) sert à rejeter les composants qui présentent des défauts de jeunesse.

### III.2. Contrôle visuel

Le contrôle visuel des DLPs intervient avant et après avoir effectué toutes les caractérisations électro-optiques, il est réalisé au moyen d'un microscope optique ( $\times 200$  et  $\times 500$ ) pour révéler les défauts émergents de la face émissive sur la zone d'épitaxie ( $5\mu\text{m}$ ). Chaque défaut éventuel est repéré par un numéro correspondant à l'émetteur sur lequel il se trouve.

Ces défauts sont à l'origine de la dégradation rapide des émetteurs, puisqu'ils peuvent générer un emballement thermique pouvant conduire à la fusion de l'émetteur. Ils peuvent se manifester sous différentes formes (Figure I.9). La figure II.9 répertorie l'ensemble des typologies de défaut susceptibles d'être présents sur la face émissive d'une barrette de diodes Laser mais d'autres types de défaut sur la face émissive peuvent également être mis en évidence :

- Cassure du matériau d'extrémité : Il se traduit par un soulèvement de la passivation, perturbation des plans cristallins, pollution et fragilité lors du report et fragilise les réseaux d'extrémité.
- Défaut de passivation : Il se caractérise par un manque de passivation sur la face émissive localisée sur les couches épitaxiées (Figure I.9-a), entraînant une perte d'émission qui est

localisée sur le défaut. L'origine de ce défaut peut être liée à une mauvaise adhérence, un nettoyage agressif de la passivation ou un choc mécanique.

- Scratch : Il est lié à un dépôt noirâtre et volumineux sur la face émissive conduisant à la destruction de l'émetteur.
- Bille de brasure : Ce défaut peut masquer ou dévier l'émission et généralement provoqué par une durée ou à une température de préchauffage insuffisante pendant la phase de brasage.
- Remontée de brasure : Il masque l'émission qui se traduit par une dégradation catastrophique de l'émetteur.

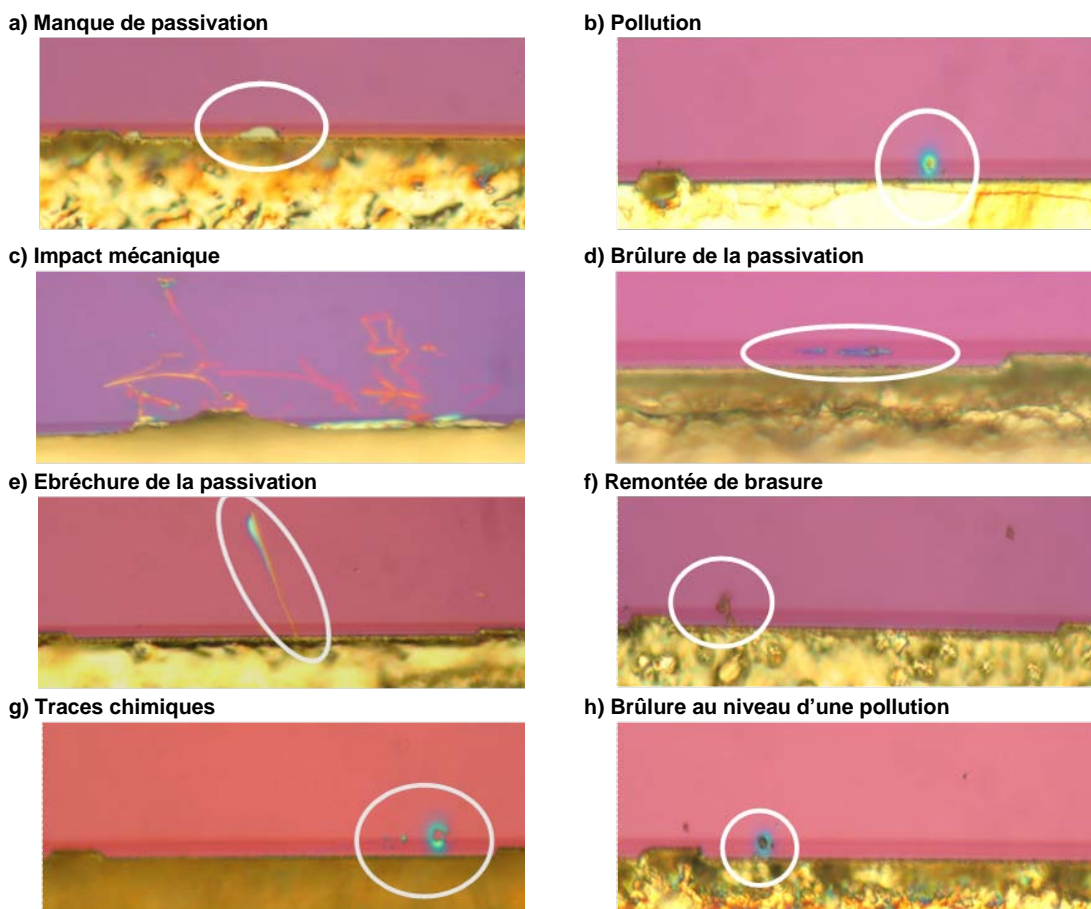


Figure I.9 - Typologie de défauts sur la face émissive de la zone active des barrettes de DLPs

#### IV. Caractérisation individualisée par émetteur

L'étude de la fiabilité des barrettes de DLPs a nécessité la mise en place d'un banc dédié de caractérisation électro-optique au niveau émetteur. En effet, la caractérisation de la barrette globale sera cette fois effectuée au niveau émetteur individuel.

##### IV.1. Banc de caractérisation émetteur par émetteur

Cette partie est consacrée à la technique de caractérisation individuelle des émetteurs afin de réaliser les mesures suivantes :

- la puissance optique émise ( $P_{out}$ ),
- le spectre optique ( $L(\lambda)$  et  $\lambda_{max}$ ),
- le degré de polarisation (DOP).

#### IV.1.a. Diagramme de rayonnement des émetteurs

Rappelons qu'une barrette consiste en la succession d'émetteurs individuels (voir chapitre 1) et par conséquent, chaque émetteur dans la barrette possède donc son propre champ lointain. La juxtaposition de ces champs lointains donne le diagramme de rayonnement global de la barrette. La Figure I.10 présente un schéma descriptif de la géométrie du champ lointain de la barrette et celui d'un émetteur individuel en tenant compte des modes émis selon l'axe lent et l'axe rapide.

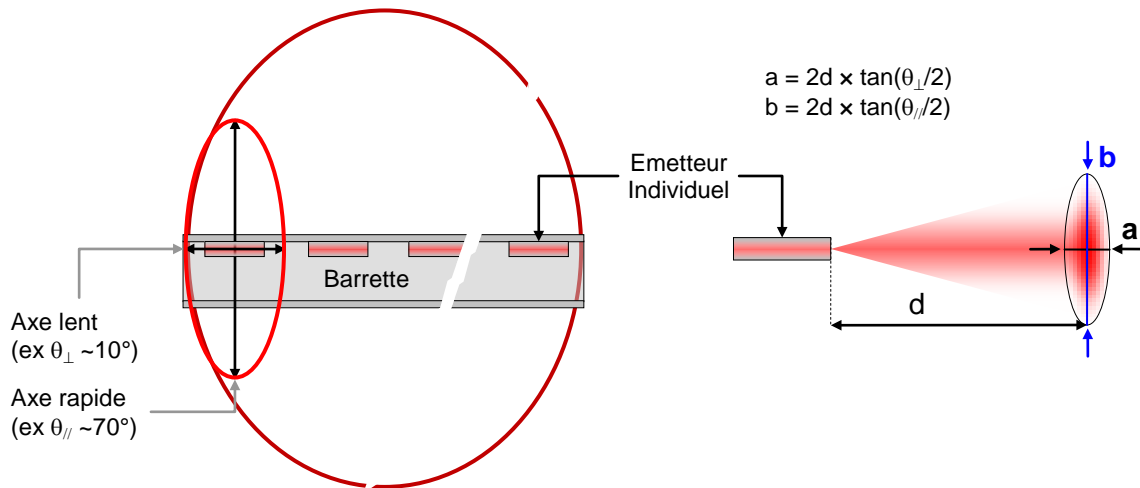


Figure I.10 – Notions d'axe rapide et lent d'un émetteur dans une barrette de DLP

Le banc développé dans le cadre de cette thèse consiste en la sélection d'un émetteur dans une barrette de DLPs par l'intermédiaire d'un couplage spatial entre le signal optique émis par un émetteur et l'entrée d'une sphère intégrante. En effet pour isoler le signal émis par un seul émetteur, nous avons eu recours aux lois de l'optique géométrique. La simulation de la sélection optique a été réalisée au moyen du logiciel OptGeo<sup>4</sup>, qui est un logiciel libre de simulation 2D destiné à l'optique géométrique. Cette simulation construit le trajet des faisceaux utilisant les lois de l'optique géométrique (ex. Snell-Descartes) et l'approximation des lentilles minces. Le résultat de la simulation d'une barrette ayant 25 émetteurs, d'une largeur de 200 $\mu$ m au pas de 400 $\mu$ m, est illustré dans la Figure I.11-a. Dans le cas d'un Stack de 5 barrettes de 25 émetteurs au pas optique de 400 $\mu$ m, le résultat de la simulation est présenté dans la Figure I.11-b.

<sup>4</sup> Logiciel de manipulation optique 2D créé par J. M. Biansan (<http://jeanmarie.biansan.free.fr/optgeo.html>).

Une caméra vidéo est positionnée au niveau du port de sortie de la sphère intégrante, situé dans l'axe du port d'entrée. Ainsi, nous pouvons aligner le rayonnement émis par un émetteur sur l'entrée de la sphère intégrante. Cette configuration va permettre de visionner l'image du champ proche de chaque émetteur au niveau de l'entrée de la sphère, puis en obturant le port caméra on peut caractériser l'émetteur visionné. La Figure I.11 indique la position de la caméra par rapport à l'axe optique du banc.

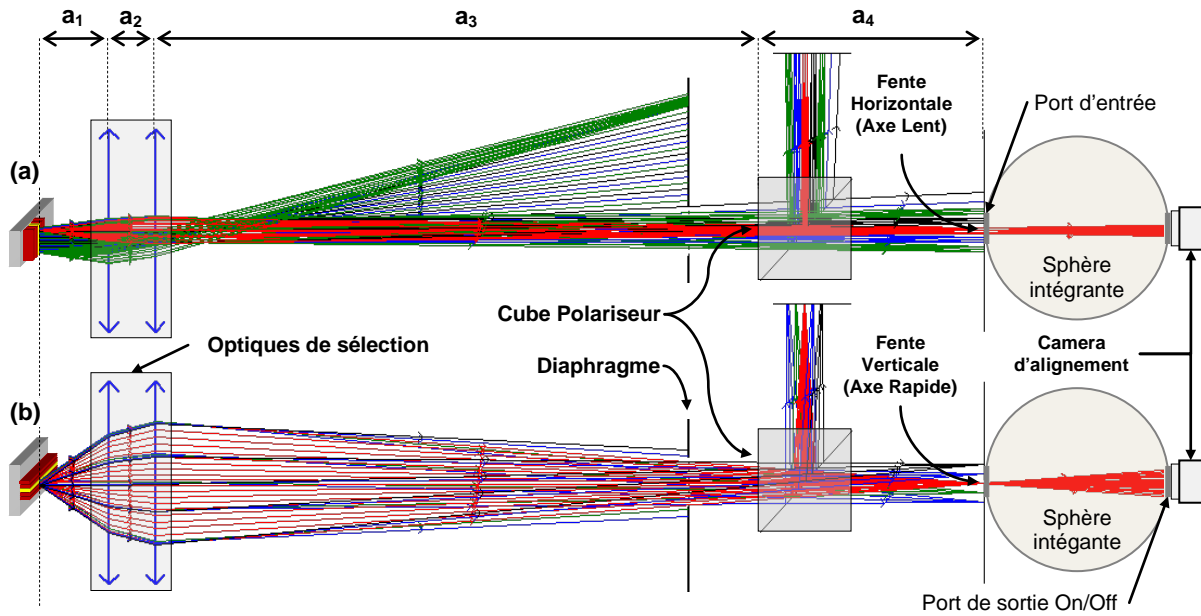


Figure I.11 - Trajets des rayons optiques (1) d'un émetteur dans une barrette et (2) d'une barrette dans un Stack par la simulation OptGeo

#### IV.1.b. Description du banc de caractérisation

Le principe de la sélection d'un émetteur est le suivant : le rayonnement émis par un émetteur est focalisé sur l'entrée de la sphère intégrante à travers deux lentilles convergentes de focale  $f_1$  et  $f_2$  telle que  $f_2 > f_1$ . Cette configuration permet d'obtenir un agrandissement de l'ordre de 9 des dimensions spatiales d'un émetteur. Ensuite, la sélection du rayonnement d'un émetteur est réalisée à l'aide de deux fentes l'une verticale et l'autre horizontale et dont la largeur des ouvertures est contrôlée manuellement. Ces fentes sont situées au niveau du port d'entrée de la sphère intégrante, permettant ainsi de collecter l'intensité lumineuse émise par un seul émetteur de la barrette.

Le cube polariseur est placé après l'optique de focalisation et il est positionné sur une platine de déplacement pour effectuer les mesures avec ou sans polarisation de la lumière. L'alignement et les déplacements du composant se font au moyen d'une table de déplacement micrométrique 6 axes. Avant chaque mesure, un pré-alignement des émetteurs est effectué pour visualiser chaque émetteur dans la barrette et ceci pour déplacer le composant en utilisant un seul déplacement pendant la caractérisation électro-optique de la barrette. Un schéma descriptif et détaillé ce banc est représenté en Figure I.12.



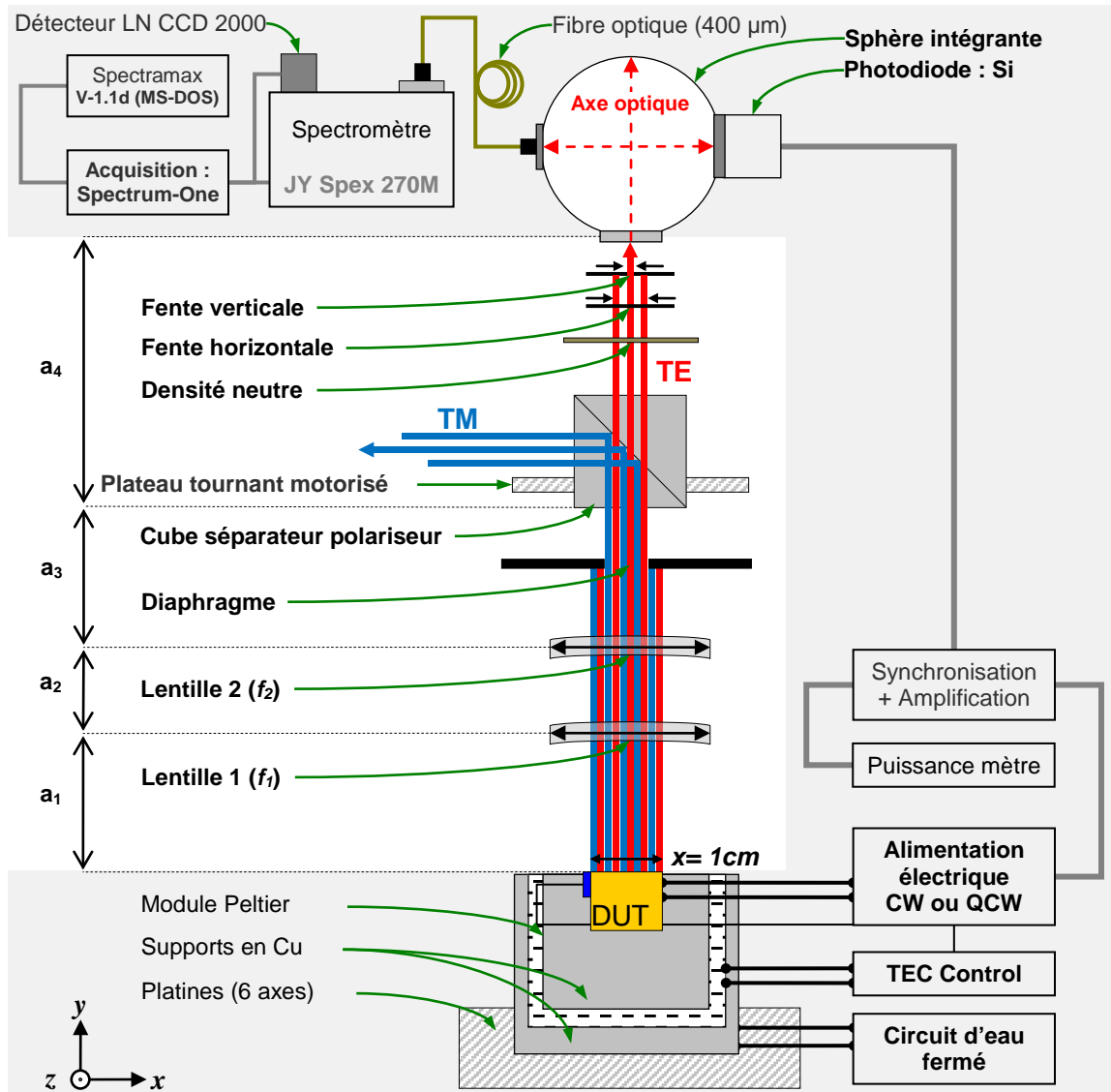
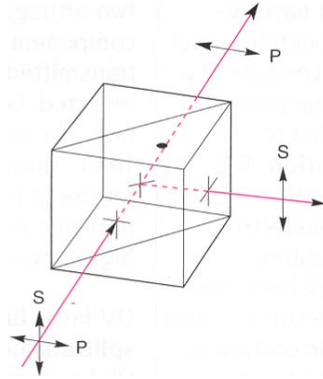


Figure I.12 - Synoptique du banc de caractérisation électro-optique émetteur par émetteur

Le banc expérimental se compose des modules suivants :

- Support DUT : le support du composant est maintenu à température constante ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ) à l'aide d'un module Peltier pour une puissance électrique dissipée maximum de 30W en régime continu. La sonde de température est placée sur le flan de l'embase du composant et les déplacements d'alignement du composant se font manuellement au moyen d'une table de déplacement micrométrique à 6 axes.
- Système optique : composé de 2 lentilles convergentes de focale  $f_1 = 50\text{mm}$  et  $f_2 = 100\text{mm}$ , permettant de focaliser le faisceau de chaque émetteur sur l'entrée de la sphère intégrante qui est positionnée à une distance de 40cm du composant.
- Diaphragme à iris pour éliminer les émetteurs en excès et éviter les réflexions sur le matériel.

- Cube polariseur séparateur (PBS) forte puissance optique constitué de deux demi-cubes de précision en contact optique sans colle (Figure I.13). L'hypoténuse de l'un des demi-cubes bénéficie d'un traitement séparateur diélectrique polarisant. Les quatre faces sont traitées antireflet afin de minimiser les pertes par réflexion. Le PBS est monté sur un plateau tournant motorisé.



**Figure I.13 - Un faisceau non polarisé est séparé en deux composantes orthogonales polarisées linéairement : la composante polarisée "p" est transmise alors que la composante polarisée "s" est réfléchie**

- Un filtre densité neutre pour atténuer la puissance optique à l'entrée de la sphère intégratrice. Le facteur d'atténuation des densités utilisées reste constant dans la gamme de puissance optique caractérisée.
- Deux fentes mécaniques situées à l'entrée de la sphère intégrante en position verticale et horizontale. Elles permettent l'adaptation de l'entrée de la sphère aux dimensions de l'émetteur situé soit dans une barrette, soit dans un Stack.
- Une sphère intégrante "2 pouces" avec 4 ports (1 entrée et 3 sorties). Elle permet de collecter le rayonnement d'un émetteur et de réaliser les mesures de la puissance optique (1 port photodiode) et du spectre optique (1 port fibrée) et ceci avec ou sans polarisation de la lumière.

Les vues du banc sont illustrées dans la Figure I.14 et on peut y distinguer les composantes suivantes :

- l'unité de pilotage et de relevé des mesures (Figure I.14-a).
- le support du composant en test (Figure I.14-b).
- l'axe optique du rayonnement laser (Figure I.14-c).

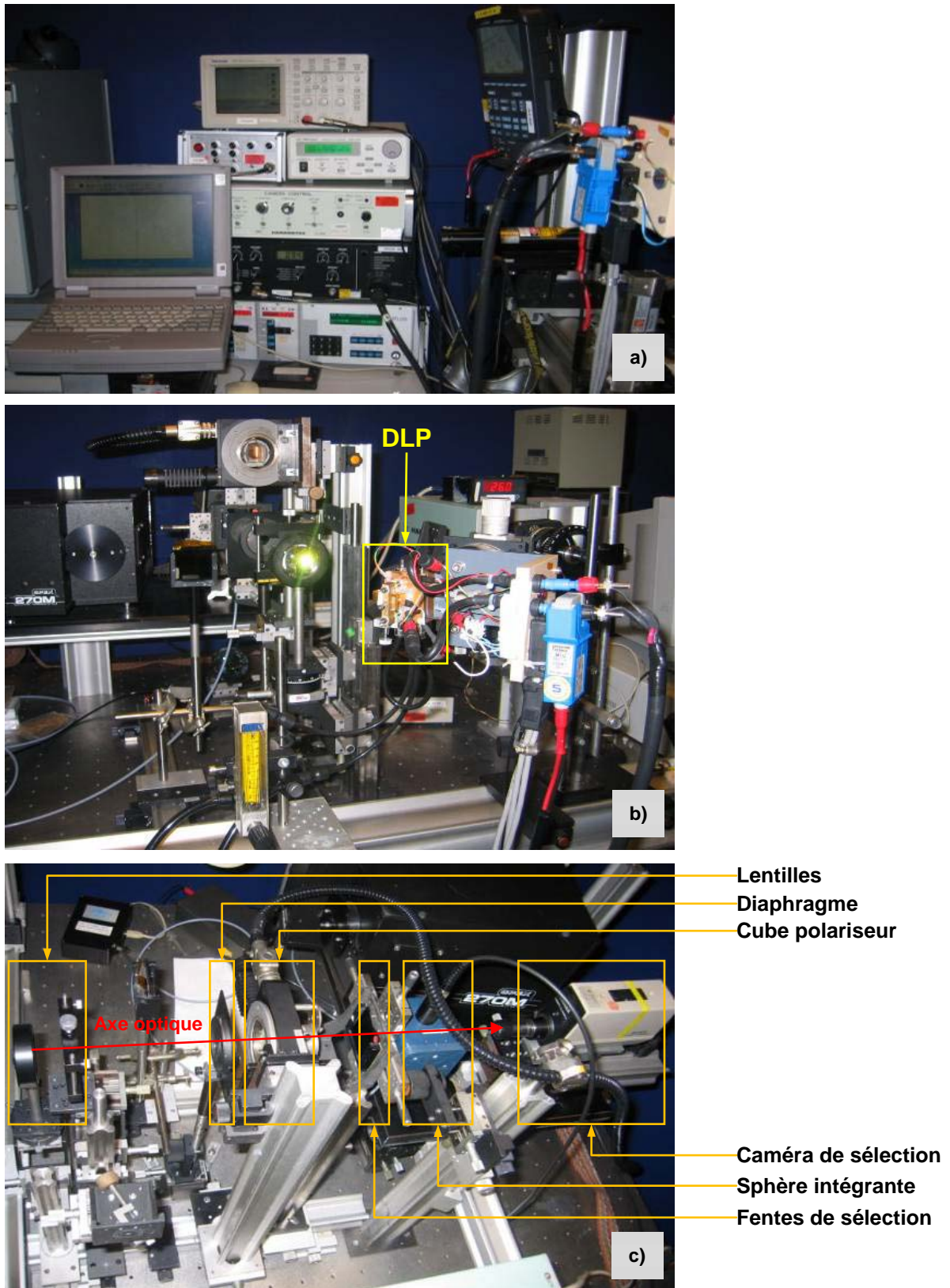


Figure I.14 - Vues du banc de caractérisation électro-optique émetteur par émetteur a) unité de mesure et pilotage, b) support composant et c) axe optique du banc

## IV.2. Influence de la température et du courant sur les grandeurs électro-optiques

Cette partie est dédiée aux mesures préliminaires émetteur par émetteur, obtenues sur une barrette de DLP composée de 25 émetteurs d'une largeur de 200 $\mu$ m au pas de 400 $\mu$ m et émettant à 808nm en mode TE. La barrette a été assemblée dans une configuration composant mono barrette QCW. Ce composant est appelé référence et les paramètres électro-optiques associés en régime QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C sont donnés dans le Tableau I.3.

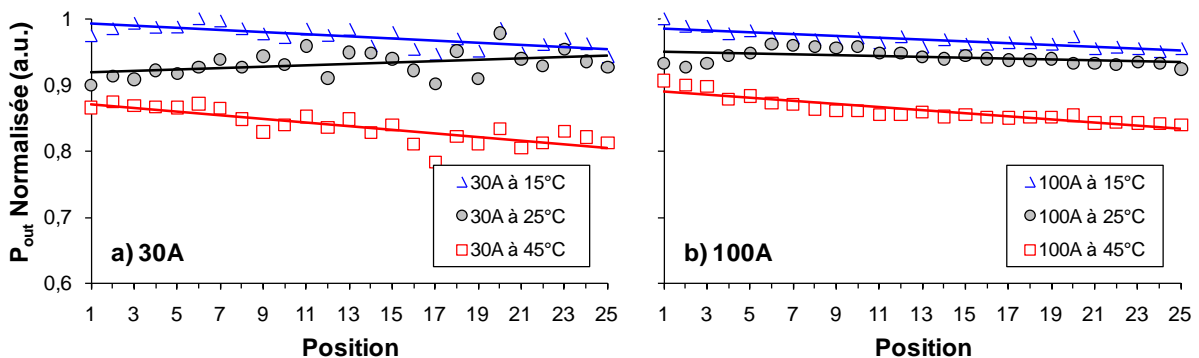
	$I_{th}$ (A)	SE (W/A)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$V_d$ (V)	$\eta$ (%)	$P_{out}$ (W)	$\lambda_{max}$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
@30A	13,6	1,28	0,004	1,7	41,5%	21,1	803,2	1,3
@100A				1,9	54%	108,6	804,8	2,0

Tableau I.3 - Paramètres électro-optiques du composant référence en régime QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C

En préliminaire de notre analyse, les conditions de caractérisation au niveau émetteur doivent être fixées quelle que soit la configuration du composant étudié. Pour cela, nous avons procédé à l'analyse de l'impact de l'injection de deux courants (30 et 100A) en régime QCW (100Hz-100 $\mu$ s) et l'impact de la température (15, 25 et 45°C) sur le profil des paramètres mesurés le long de la barrette.

### IV.2.a. Puissance optique des émetteurs

Nous présentons, en Figure I.15, les variations le long de la barrette de la puissance optique, normalisés au maximum à 15°C, de chaque émetteur dans le composant référence. Ces profils de variation ont été obtenus pour des courants en régime QCW (100Hz/100 $\mu$ s) respectivement de valeurs crêtes 30A (Figure I.15-a) et 100A (Figure I.15-b) pour différentes températures : 15, 25 et 45°C. Ils mettent en évidence les émetteurs ayant une faible puissance optique. Les variations du paramètre  $P_{out}$  le long de la barrette croissent en augmentant le courant mais décroissent en augmentant la température (voir Tableau I.5). En revanche, lorsque la température de jonction de la barrette augmente, le courant de seuil laser augmente avec, pour conséquence, une diminution du rendement quantique externe. Ces profils peuvent alors refléter l'homogénéité de l'injection du courant au sein de la barrette. En effet, l'injection d'un courant, dans la barrette, en régime QCW (100Hz/100 $\mu$ s) au dessus du seuil laser ne modifie quasiment pas l'homogénéité du profil du  $P_{out}$  le long de la barrette.



**Figure I.15 - Puissance optique normalisée des émetteurs le long de la barrette à 15, 25 et 45°C pour 30A (a) et 100A (b) en régime QCW (100Hz/100µs)**

Les lissages linéaires de  $P_{out}$  normalisée en fonction de la position de l'émetteur dans la barrette ( $P_{out} = a \times Position + b$ )<sub>T</sub> pour les différentes valeurs de courant et de température sont listés dans le Tableau I.4.

Température	30A (100Hz/100µs)			100A (100Hz/100µs)		
	a	b	R <sup>2</sup>	A	b	R <sup>2</sup>
15°C	-0,0016	0,9938	0,5104	-0,0014	0,9866	0,7322
25°C	0,001	0,9176	0,1611	-0,0006	0,95	0,1919
45°C	-0,0028	0,8738	0,6852	-0,0023	0,8915	0,8323

**Tableau I.4 - Paramètres des courbes de tendance linéaires de  $P_{out}$  en fonction de la position ( $P_{out} = a \times Position + b$ )<sub>T</sub> pour 30A et 100A en régime QCW (100Hz/100µs) à 25°C**

Le Tableau I.6 donne la variation maximale de  $P_{out}$  le long de la barrette du composant référence. Cela nous a permis de supposer que le profil du  $P_{out}$  (Figure I.15) correspond bien à l'homogénéité de l'injection du courant dans la barrette.

1- $P_{max}/P_{min}$	15°C	25°C	45°C
30A	~5,8%	~8,0%	~10,5%
100A	~4,2%	~4,5%	~7,2%

**Tableau I.5 - Variation maximale de  $P_{out}$  le long du composant référence pour différentes conditions de mesure**

#### IV.2.b. Spectre optique

##### IV.2.b.1. Spectre optique des émetteurs

- Influence du courant

La Figure I.17 présente les spectres optiques de tous les émetteurs constituant la barrette du composant de référence pour 30A (Figure I.17-a) et pour 100A (Figure I.17-b) en régime QCW (100Hz/100µs) à 25°C. L'injection d'un courant de 30A en QCW (100Hz/100µs) peut montrer dans le spectre optique les points suivants :

- la présence d'émetteurs ayant une enveloppe du spectre optique non gaussien (Figure I.16-a),
- des pics parasites dans le spectre global de la barrette (Figure I.16-b).

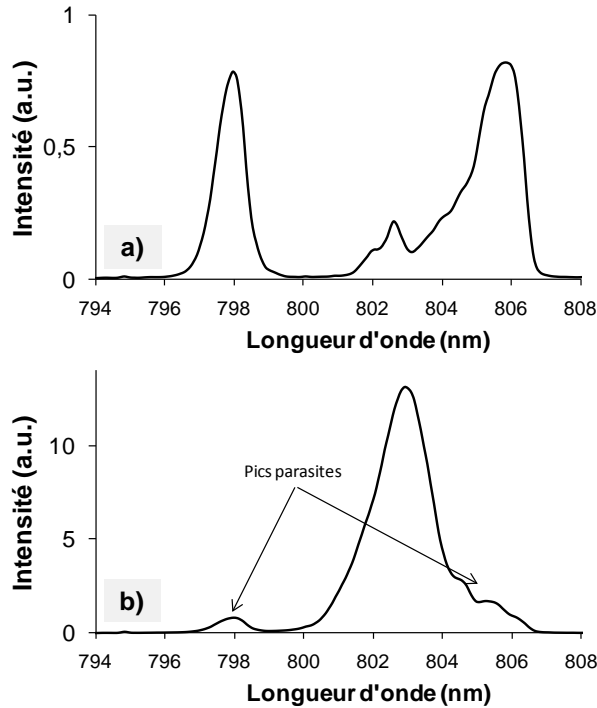


Figure I.16 - a) Spectre optique non gaussien d'un émetteur dans la barrette et b) spectre optique global de la barrette

Dans le cas du composant de référence, et pour un courant de 30A, les émetteurs émettant avec des pics parasites sont nombreux (7 émetteurs sur 25) comme illustré par la Figure I.17-a. Par ailleurs, à fort courant (100A) l'enveloppe de tous les émetteurs est gaussienne (Figure I.17-b).

Néanmoins, nous pouvons détecter au dessus du seuil laser ( $> 2,5I_{th}$ ) la présence d'émetteurs possédant des spectres de forme non gaussienne, pouvant évoluer vers une enveloppe gaussienne en augmentant le courant, phénomène masqué à très fort courant.

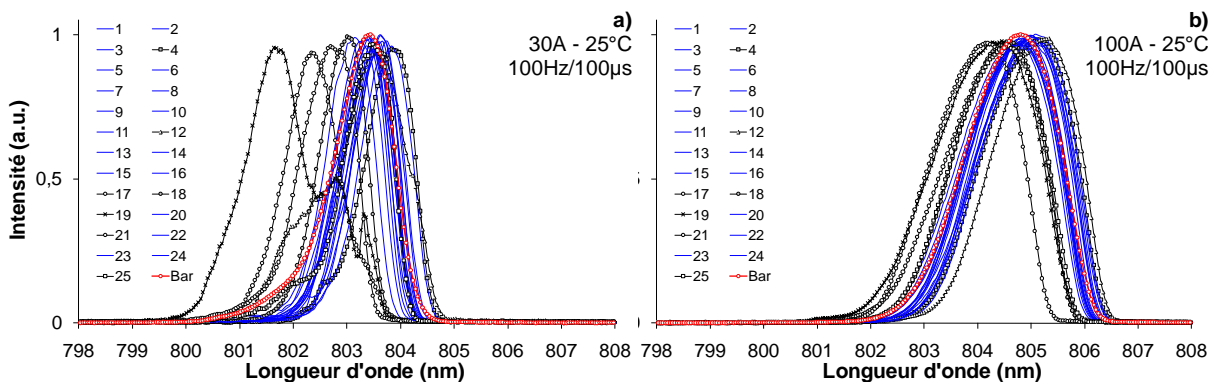


Figure I.17 - Spectres d'émission laser des émetteurs du composant référence en QCW (100Hz/100µs) à 25°C pour 30A (a) et 100A (b)

- Influence de la température

La Figure I.18 décrit la variation de la longueur d'onde centrale émise par chaque émetteur le long de la barrette pour différentes températures et pour des courants injectés en régime QCW



(100Hz/100µs) de 30A (Figure I.18-a) et de 100A (Figure I.18-b). On remarque que l'évolution du paramètre  $\lambda_{max}$  en fonction du courant reste indépendante de la position de l'émetteur.

Les profils du paramètre  $\lambda_{max}$  le long de la barrette n'évoluent ni avec le courant (au-dessus du seuil laser) ni avec la température (15 à 45°C).

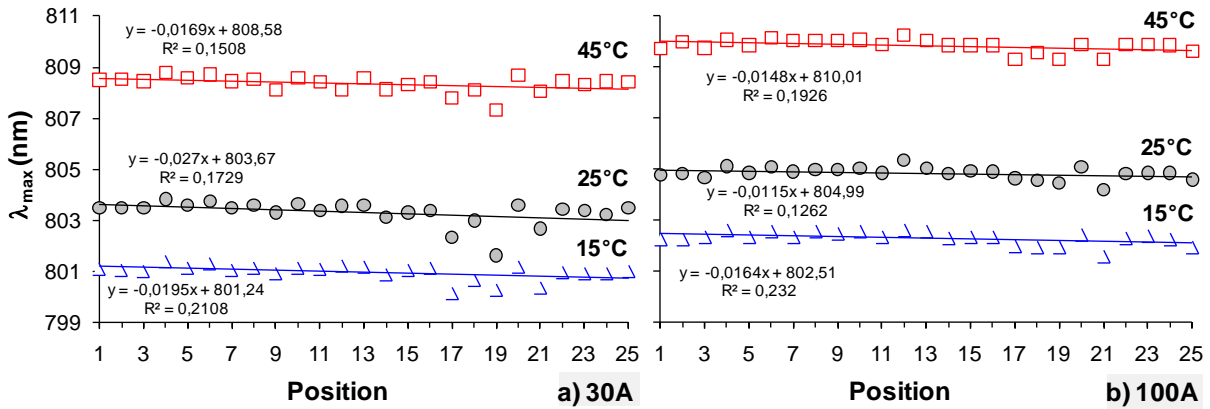


Figure I.18 - Profils de la longueur d'onde centrale le long de la barrette pour a) 30A et b) 100A en régime QCW (100Hz/100µs) à 15, 25 et 45°C

- Détermination de l'effet de "tracking" en courant et en température

Le décalage spectral en température ( $\Delta\lambda/\Delta T$ ) de chaque émetteur le long de la barrette pour 30A et 100A en régime QCW (100Hz/100µs) est représenté dans la Figure I.19. Ce décalage spectral reste constant quelle que soit l'amplitude du courant injecté dans la barrette en régime QCW à 100Hz/100µs et se stabilise autour de 0,25nm/°C. Par contre le décalage du spectre en courant ( $\Delta\lambda/\Delta I$ ) qui avoisine 0,02nm/A devient important (0,03 à 0,04nm/A) pour les émetteurs en position #9, #12, 17# et #19 mais reste quasiment constant (0,02nm/mA) et identique en température pour les autres émetteurs de la barrette.

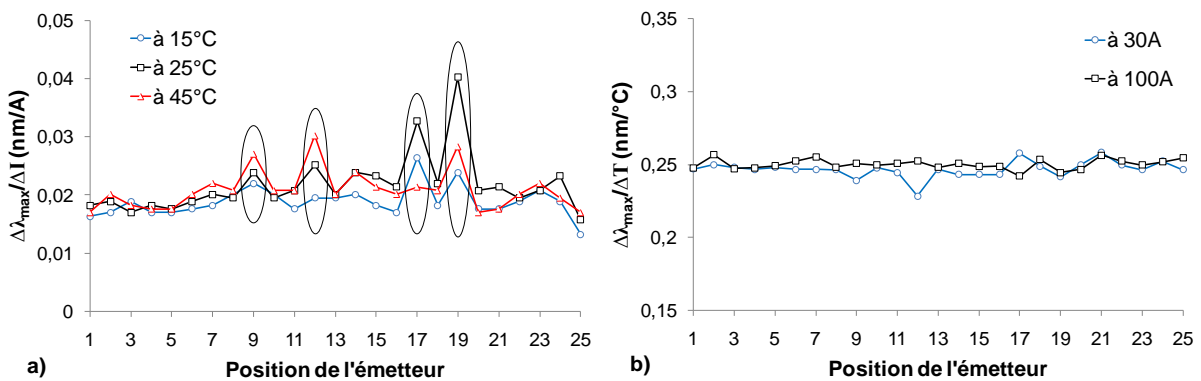


Figure I.19 - Variations du décalage spectral des émetteurs le long de la barrette en courant (a) et en température (b)

#### IV.2.b.2. Spectre optique global

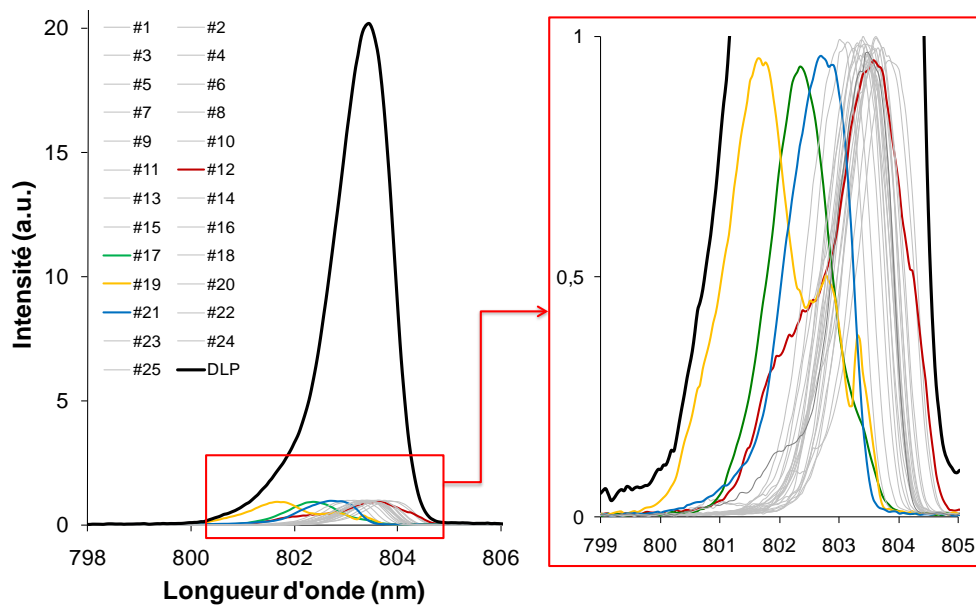
L'enveloppe du spectre optique globale de la DLP ( $L_{DLP}(\lambda)$ ) correspond à la somme de tous les spectres optiques absolus des émetteurs constituant la barrette. En utilisant la formule E- 2 que

nous avons proposé, nous pouvons reconstruire le spectre global de la DLP à partir des spectres mesurés de chaque émetteur.

$$L_{DLP}(\lambda)|_{I,T \text{ Cte}} = \sum_{i=1}^{i=n} L_i(\lambda) \times P_{out\_i} \Big|_{I,T \text{ Cte}} \quad \text{E- 23}$$

où,  $L_i(\lambda)$  et  $P_{out\_i}$  sont respectivement le spectre optique et la puissance optique normalisée de l'émetteur située à la position  $i$ , et  $n$  est le nombre d'émetteurs de la barrette.

La Figure I.20 indique le spectre global d'émission laser du composant de référence, pour 30A en QCW (100Hz/100µs) à 25°C, reconstruit en tenant compte de la relation E- 2. Cette figure contient les spectres de tous les émetteurs de ce composant.



**Figure I.20 - Spectre optique global du composant référence (ligne noire) et les spectres optiques de chaque émetteur le long de la barrette**

L'intérêt des mesures spectrales à faible puissance optique réside dans la détermination de la position des émetteurs présentant des spectres non gaussiens. Ceci est très important pour analyser le spectre global d'émission laser des DLPs. Par exemple, l'origine de l'apparition des pics parasites et/ou des phénomènes de dédoublement du spectre optique des DLPs pourront être rapidement identifiés, constituant alors des signatures potentielles de dégradation comme nous le présenterons ultérieurement.

#### IV.2.c. Degré de polarisation

Dans le chapitre I, nous avons vu que l'émission laser se fait suivant un mode dépendant de la structure interne de la diode laser. En effet, l'émission est en mode TE pour un puits en compression et elle est en mode TM pour un puits en tension. Le degré de polarisation (DOP) est calculé à partir des



taux de polarisation  $T_{TE}$  et  $T_{TM}$  donnés par E- 3 qui représentent respectivement les modes d'émission TE et TM [20].

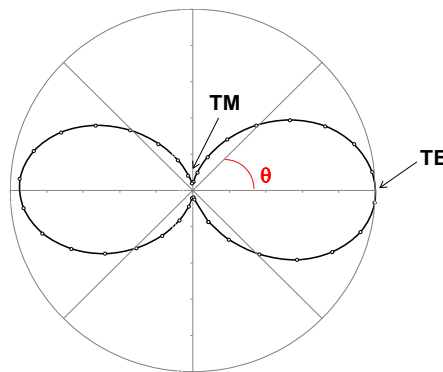
$$T_{TE} = \frac{I_{TE}}{I_{TE} + I_{TM}} \text{ et } T_{TM} = \frac{I_{TM}}{I_{TE} + I_{TM}} \quad \text{E- 24}$$

où,  $I_{TE}$  et  $I_{TM}$  correspondent respectivement à l'intensité optique maximale mesurée en mode TE et TM. La valeur du DOP est donnée par la formule E- 4.

$$\text{DOP} = T_{TE} - T_{TM} = \frac{I_{TE} - I_{TM}}{I_{TE} + I_{TM}} \begin{cases} > 0 \rightarrow \text{TE} \\ < 0 \rightarrow \text{TM} \end{cases} \quad \text{E- 25}$$

La Figure I.21 illustre le diagramme de polarisation d'un émetteur dans une barrette alimentée sous 30A en régime QCW (100Hz/100µs) à 25°C. Ce diagramme correspond à l'intensité de la lumière émise en fonction de l'angle de rotation ( $\theta$ ) du cube polariseur.

Dans le cas de cet émetteur, on obtient une valeur maximale de l'intensité à  $0^\circ$  et une valeur minimale à  $90^\circ$ , qui sont respectivement les intensités des modes TE et TM. Ceci nous permet de déduire que l'émission laser est très majoritairement en mode TE. Dans la suite du mémoire, nous nous limiterons aux intensités relevées pour des valeurs particulières de l'angle d'orientation du polariseur et correspondantes à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$ .



**Figure I.21 - Degré de polarisation d'un émetteur dans une barrette alimentée sous 30A en régime QCW (100Hz/100µs) à 25°C**

Le calcul du DOP est réalisé pour chaque émetteur dans la barrette indépendamment des autres. Pour chaque émetteur, on utilise le polariseur afin de déterminer le maximum et le minimum des intensités lumineuses correspondant respectivement aux angles  $\theta = 0^\circ$  et  $\theta + 90^\circ$ . La Figure I.22 illustre le schéma descriptif qui permet de mesurer, indépendamment, les intensités TE et TM pour chaque émetteur.

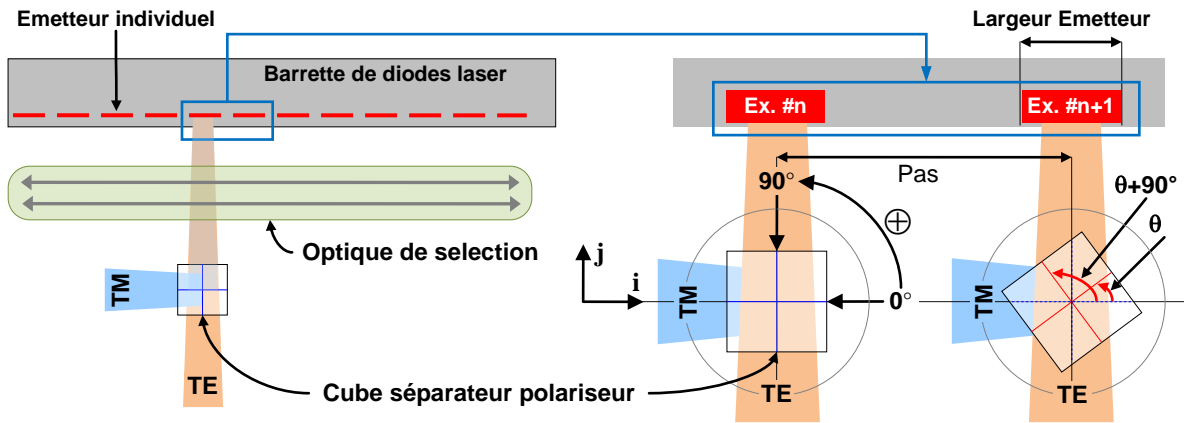


Figure I.22 - Description de la mesure de l'intensité optique en polarisation d'un émetteur dans la barrette

L'angle d'orientation du polariseur ( $\theta$ ) est proche de  $0^\circ$  (TE) et  $90^\circ$  (TM) pour la plupart des émetteurs le long de la barrette. Nous avons reporté, en Figure I.23, les angles d'orientation du polariseur que nous avons utilisé pour calculer le DOP de chaque émetteur du composant référence (voir Figure I.25-a) pour un courant de 30A en QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C. Pour les émetteurs 3 et 23, nous avons observé un léger offset (qq dizaines de degré) pour obtenir le maximum et le minimum de la lumière polarisée. Un exemple présentant des offsets très significatifs, obtenus sur des barrettes émettant en mode TM, sera présenté dans la dernière partie de ce chapitre.

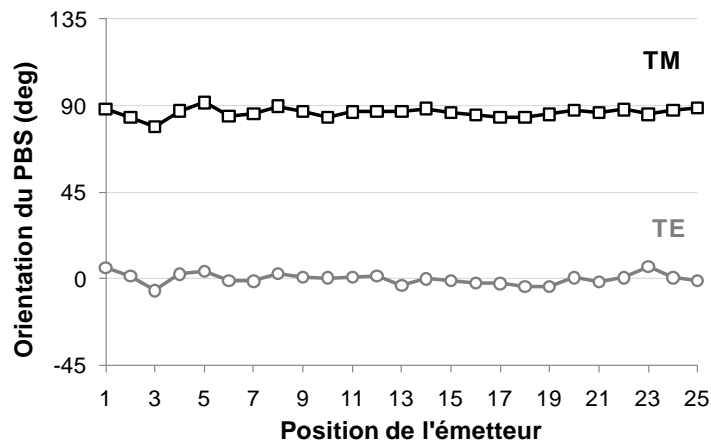
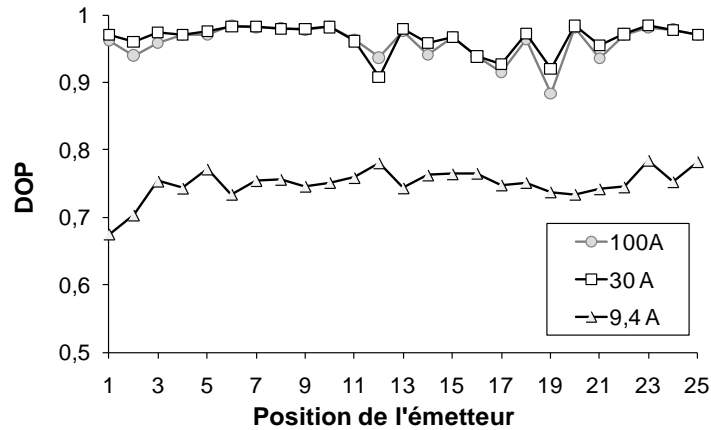


Figure I.23 - Angles d'orientation du polariseur le long de la barrette pour relever les intensités émises en mode TM ( $90^\circ$ ) et TE ( $0^\circ$ ) en fonction de la position des émetteurs

- Influence du courant

La Figure I.24 montre le profil des variations du DOP de l'émission stimulée et de l'émission spontanée dans le composant référence. Sous le seuil laser, nous constatons que la valeur moyenne du DOP des émetteurs est proche de 0,75 alors qu'au dessus du seuil, la valeur moyenne du DOP est de 0,95. Ceci confirme que l'émission est prépondérante suivant le mode TE. Cette augmentation s'explique par le gain associé au mode TE qui se traduit par l'augmentation relative du flux de photons se propageant dans la cavité. Au dessus du seuil laser, l'émission spontanée est négligeable et la variation du flux de photons provient du nombre net de photons créés par l'amplification.

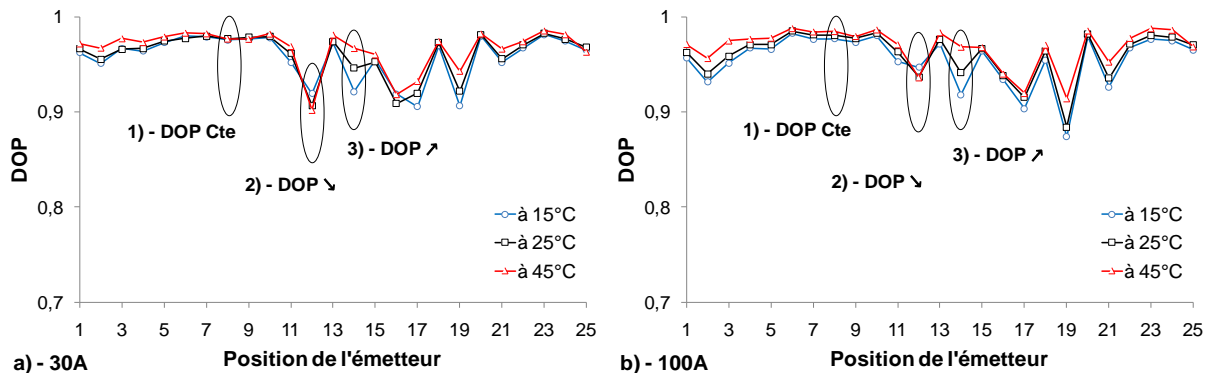
Le profil des variations du DOP des émetteurs le long de la barrette reste quasiment identique pour 30A et 100A en QCW (100Hz/100µs) à 25°C.



**Figure I.24 - Profil des variations du DOP le long de la barrette en QCW (100Hz/100µs) à 25°C de l'émission spontanée (9,4A) et de l'émission stimulée (30A et 100A)**

- Influence de la température

Les différents résultats concernant les variations du DOP des émetteurs le long de la barrette, du composant de référence pour 30A et 100A en régime QCW (100Hz/100µs) et en fonction de la température, sont reportées en Figure I.25. Comme précédemment, on obtient un DOP moyen le long de la barrette de l'ordre de 0,95 pour un courant de 30A et 100A et parallèlement, on constate l'invariance du DOP dans la gamme de température 15 à 45°C.



**Figure I.25 - Profil du DOP le long du composant référence à différentes températures 15, 25 et 45°C pour a) 30A et b) 100A en régime QCW (100Hz/100µs)**

Pour la plupart des émetteurs, la variation du DOP en température reste quasiment constante lorsque le courant injecté est au dessus du seuil laser. Néanmoins, la Figure I.25 montre que trois signatures comportementales relatives au DOP, mesuré dans la gamme de température de 15 à 45°C, peuvent être mises en lumière :

- 1<sup>er</sup> cas : Le DOP reste constant en température.
- 2<sup>ème</sup> cas : Le DOP diminue si la température augmente.

- 3<sup>ème</sup> cas : Le DOP augmente si la température augmente.

Ces comportements sont quasiment similaires pour les différents courants injectés au dessus du seuil laser de la barrette.

### IV.3. Répétabilité des mesures

La répétabilité des mesures permet de vérifier la stabilité du banc de mesure au cours du temps. Pour cela, 9 mesures ont été effectuées sur un composant de référence avec un intervalle de temps allant de 3 à 8 semaines entre chaque mesure.

#### IV.3.a. Ecart-type des paramètres mesurés

Le composant de référence est constitué d'une mono-barrette QCW constituée de 25 émetteurs d'une largeur de 200 $\mu$ m au pas de 400 $\mu$ m et émettant à 808nm en mode TE. La Figure I.26 représente l'écart-type ( $s$ ), dont la définition est rappelée par la relation E- 5, des neuf mesures de  $\lambda_{\max}$ ,  $P_{\text{out}}$  et DOP effectuées sur chaque émetteur dans la barrette pour 30A en régime QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{E- 26}$$

où,  $n$  est le nombre de mesures effectuées sur un émetteur,  $x_i$  représente la valeur obtenue pour le paramètre mesuré sur l'émetteur  $i$ ,  $\bar{x}$  est la valeur moyenne des mesures sur un émetteur.

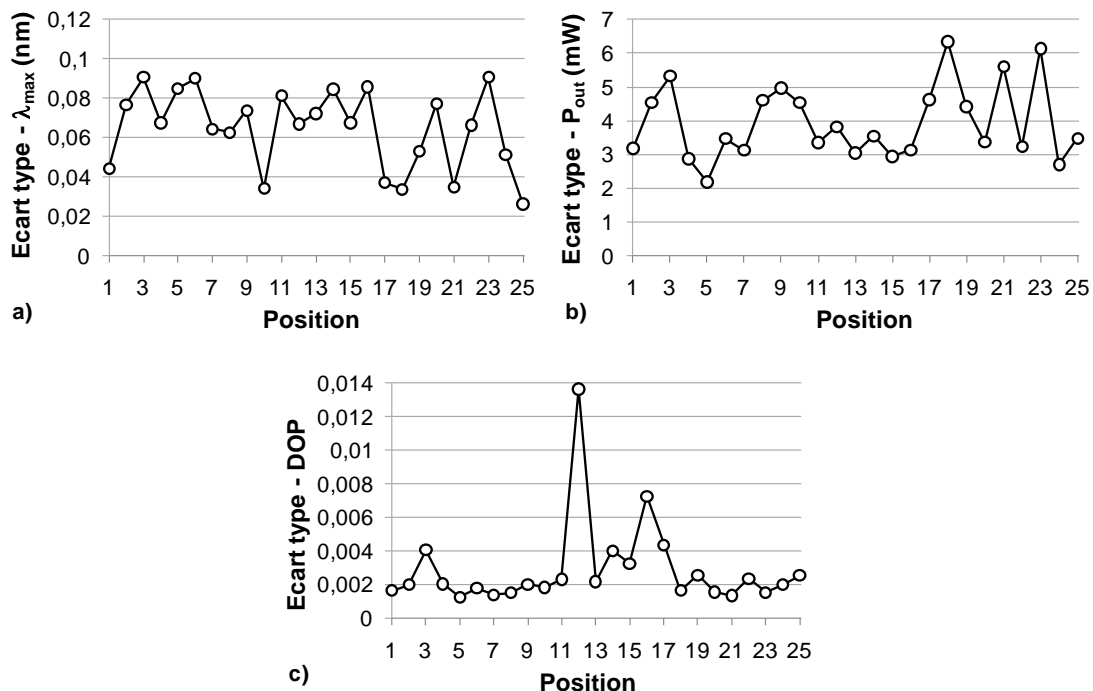


Figure I.26 – Variation de l'écart-type le long de la barrette de a)  $\lambda_{\max}$ , b)  $P_{\text{out}}$  et c) DOP

L'écart-type des valeurs du DOP mesurées dans l'émetteur #12 est proche de 0,015; cette dernière est très grande comparée à la valeur moyenne des autres émetteurs.

On peut constater que la valeur du DOP de l'émetteur atypique #12 a évolué au cours du temps (+11,5%). La Figure I.27 montre les taux d'émission TE et TM de l'émetteur #12 mesurés avec un intervalle de temps allant de 3 à 8 semaines.

On peut déduire que le taux de polarisation de cet émetteur (TE) s'est amélioré en augmentant dans le temps à travers une relaxation des contraintes mécaniques résiduelles qui sont concentrées au centre de la barrette. En revanche, le sens de la contrainte (compression ou tension) et l'impact de la relaxation sur l'émetteur #12 ne peuvent pas être déterminés à ce stade de l'étude.

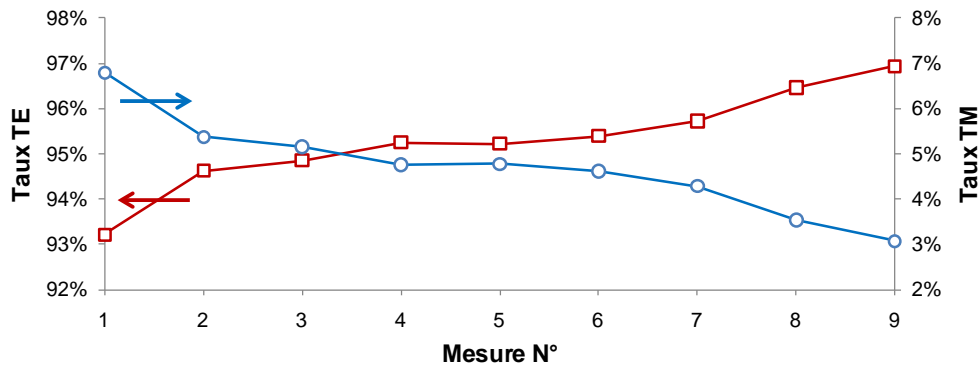


Figure I.27 - Taux d'émission en mode TE et TM de l'émetteur #12 au cours du temps avec un intervalle de temps allant de 3 à 8 semaines

Le Tableau I.6 indique la valeur moyenne de l'écart-type et de l'intervalle de confiance à 95% de la mesure du  $\lambda_{max}$ ,  $P_{out}$  et DOP, obtenus à partir des mesures réalisées sur tous les émetteurs du composant de référence pour un courant injecté dans la barrette de 30A en QCW (100Hz/100µs) à 25°C.

Paramètre	Ecart-type moyen	Intervalle de confiance à 95%
$\lambda_{max}$ (nm)	0,07	$\pm 0,06$
$P_{out}$ (mW)	4,0	$\pm 3,8$
DOP	0,003	$\pm 0,0027$

Tableau I.6 – Ecart-type moyen des paramètres  $\lambda_{max}$ ,  $P_{out}$  et DOP mesurés neuf fois pour tous les émetteurs de la barrette

Dans ce paragraphe, nous avons montré que la sélection optique des émetteurs est un moyen simple et efficace qui permet de collecter le rayonnement émis, par chaque émetteur dans la barrette, dans une sphère intégrante. L'écart type, du  $\lambda_{max}$ ,  $P_{out}$  et DOP, calculé à partir des mesures de répétabilité est assez faible pour considérer les mesures justes et exactes.

Le paragraphe suivant aborde le choix et la validation des conditions de mesures pour la suite de l'étude et traite également les résultats préliminaires obtenus sur des barrettes constituées de 19, 25 et 65 émetteurs et assemblées sous différentes configurations.

#### **IV.3.b. Conditions de mesures des barrettes**

Les résultats expérimentaux décrits précédemment et obtenus à travers les différentes conditions de caractérisation des barrettes au niveau émetteur individuel nous ont conduits à fixer le courant d'injection dans tous les composants étudiés à 30A en QCW (100Hz/100 $\mu$ s) et la température à 25°C. Dans ces conditions, les profils des paramètres  $P_{out}$ ,  $\lambda_{max}$  et DOP sont exploitables pour analyser l'effet des contraintes mécaniques induites par les différents processus d'assemblage et l'étude de la fiabilité au moyen du suivi de ces paramètres dans le temps.

#### **IV.4. Synthèse**

Le champ proche des barrettes de DLPs permet de localiser les émetteurs ayant une dégradation significative de la puissance optique. En effet, ce paramètre majeur permet de localiser rapidement la position des émetteurs dégradés de la barrette en environnement industriel de qualification. Pour une analyse approfondie, la caractérisation électro-optique au niveau émetteur permet de détecter les émetteurs dont les paramètres électro-optiques sont atypiques et les comparer aux paramètres électro-optiques de la barrette dans sa globalité :

- Le paramètre  $P_{out}$  permet d'évaluer l'homogénéité de l'émission laser le long de la barrette.
- Le spectre optique permet de révéler la position de ou des émetteurs à l'origine de l'apparition des pics parasites dans le spectre global de la barrette.
- La valeur du DOP n'évolue pas au dessus du seuil et reste fortement corrélée au champ de contraintes thermomécaniques localisé au sein de l'émetteur.

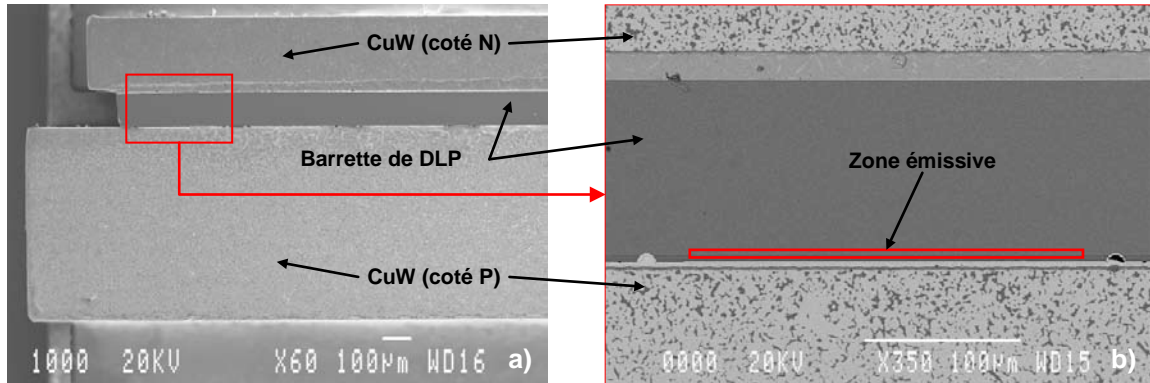
### **V. Mesures initiales des composants**

Dans ce paragraphe, nous allons nous attacher à présenter les caractérisations initiales des barrettes de DLPs au niveau de chaque émetteur. Les barrettes étudiées sont issues de différentes technologies et assemblées selon plusieurs configurations : mono-barrette QCW, multi-barrette QCW et mono-barrette CW.

Toutes les mesures expérimentales des émetteurs sont réalisées dans les conditions que nous avons fixées précédemment : 30A en QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C. L'objectif est de comparer, dans un premier, l'impact des différents processus d'assemblage sur les paramètres mesurés le long des barrettes, et dans un deuxième temps, de préparer les composants aux tests de vieillissement.

### V.1. Mono-barrette QCW

La barrette de ce composant (Figure I.28-a) est constituée de 25 émetteurs d'une largeur de 200 $\mu\text{m}$  au pas de 400 $\mu\text{m}$  et émettant à 808nm en mode TE. La Figure I.28-b montre une image MEB après micro-section d'un émetteur du composant.



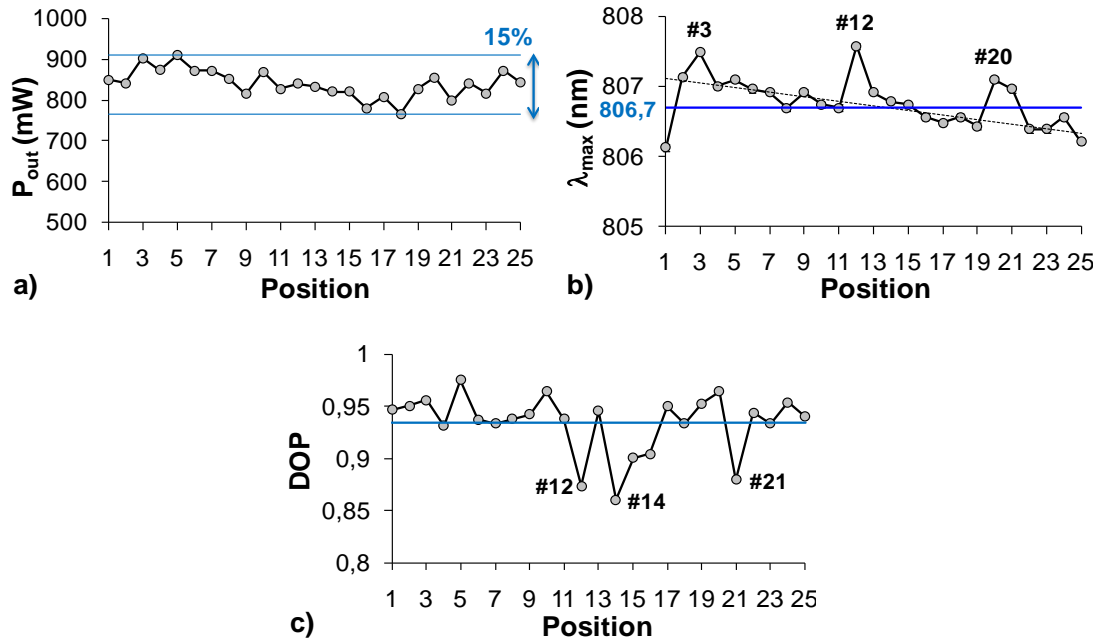
**Figure I.28 - Imagerie MEB a) du composant mono-barrette QCW et) d'un émetteur individuel après les étapes de micro-section**

Les paramètres électro-optiques globaux de ce composant pour un courant injecté en régime QCW (100Hz/100 $\mu\text{s}$ ) à 25°C sont listés dans le Tableau I.7.

$I_d$ (A)	$I_{th}$ (A)	SE (W/A)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$V_d$ (V)	$\eta$ (%)	$P_{out}$ (W)	$\lambda_{max}$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
30A	14	1,3	0,005	1,7	40	21	806,6	1,8
100A				2,1	52	108	807,7	2,1

**Tableau I.7 - Paramètres électro-optiques du composant mono-barrette en QCW (100Hz/100 $\mu\text{s}$ ) à 25°C**

Au niveau émetteur, les variations des paramètres  $P_{out}$ , DOP et  $\lambda_{max}$  le long de la barrette sont représentés dans la Figure I.29.



**Figure I.29 - Variation des paramètres : a)  $P_{out}$ , b)  $\lambda_{max}$  et c) DOP le long du composant mono barrette QCW**

Ces variations permettent de distinguer les émetteurs possédant un paramètre électro-optique différent de celui donné par la barrette globale. Les principales observations sont les suivantes :

- La Figure I.29-a présente une variation de la puissance optique le long de la barrette pouvant atteindre 15%.
- Dans la Figure I.29-b, certains émetteurs (#3, #12, #20 et #21) émettent avec un décalage important par rapport à la longueur d'onde centrale ( $\sim 1\text{nm}$ ).
- Dans le profil du DOP (Figure I.29-c), on constate que les émetteur position #12, #14 et #20 émettent avec un DOP faible ( $< 0,9$ ) qui est inférieur au DOP de la barrette ( $\sim 0,96$ ).

Au sein de cette architecture d'assemblage, nous avons observé un certain nombre d'émetteurs qui présentent des décalages, soit du spectre optique, soit du DOP. Dans le dernier chapitre, nous analyserons l'impact du vieillissement sur la fiabilité de la barrette et plus particulièrement sur les émetteurs qui la constituent. Cependant, les paramètres initialement mesurés vont contribuer à mettre en place une méthodologie de sélection des émetteurs, que l'on considérera comme atypiques, avec pour objectif de déterminer un critère précoce de défaillance des barrettes QCW.

## V.2. Impact des contraintes d'assemblage en architecture empilée "Stack"

### V.2.a. Stack QCW en mode TE

Le Stack présenté dans ce paragraphe est appelé AD33075, il est composé de six barrettes avec un pas optique de  $400\mu\text{m}$ . Chaque barrette est constituée de 25 émetteurs, d'une largeur de  $200\mu\text{m}$  au pas de  $400\mu\text{m}$ , émettant à  $808\text{nm}$  en mode TE à  $100\text{W}$  optique en QCW ( $100\text{Hz}/200\mu\text{s}$ ).



Ces barrettes sont issues de différentes plaques et reporté suivant le même processus (version  $V_0$ ) de report barrette sur embase SEB permettant la réalisation du Stack. Le cycle de brasage se caractérisant par :

- une température de solidification ( $T_{br}$ ),
- une durée du cycle ( $t_{br}$ ),
- la pression de maintien appliquée du coté N de la barrette pendant le cycle de brasage ( $P_{br}$ ).

Nous avons listé, dans le Tableau I.8 l'ordre de grandeur des principaux paramètres d'assemblage du Stack en version  $V_0$ .

Bar N°	Plaque	Cycle de brasage			
		$T_{br}$ (°C)	$t_{br}$ (s)	$P_{br}$ (g)	Version
1 et 2	A	318	20	600	$V_0$
3	B				
4, 5 et 6	C				

**Tableau I.8 - Paramètres associés au processus d'assemblage des SEBs constitutifs du Stack**

Le Stack a été caractérisé au niveau émetteur dans les conditions fixées précédemment (30A-100Hz/100 $\mu$ s à 25°C). La variation des paramètres  $P_{out}$ , DOP et  $\lambda_{max}$  des émetteurs le long de chaque barrette du Stack est présentée en Figure I.30.

La puissance optique  $P_{out}$  est caractérisée par une faible puissance optique au niveau des extrémités de l'ensemble des barrettes (Figure I.30-a). Dans la Figure I.29-b, nous observons que le profil de variation du DOP est quasiment identique le long de toutes les barrettes et révèle de faibles valeurs du DOP pour les positions #1, #2, #4, #24 et #25 dans toutes les barrettes. Ceci peut s'expliquer par la présence de contraintes mécaniques résiduelles et cela est observé quelle que soit l'origine de la barrette (plaque). Le profil des variations de  $\lambda_{max}$  n'est pas identique le long des barrettes et il peut être associé à la référence de la plaque utilisée pour la réalisation des barrettes. Ainsi, on observe un décalage vers les longueurs d'onde de l'IR plutôt situé au centre des barrettes n°4, 5 et 6 (Figure I.30-c).

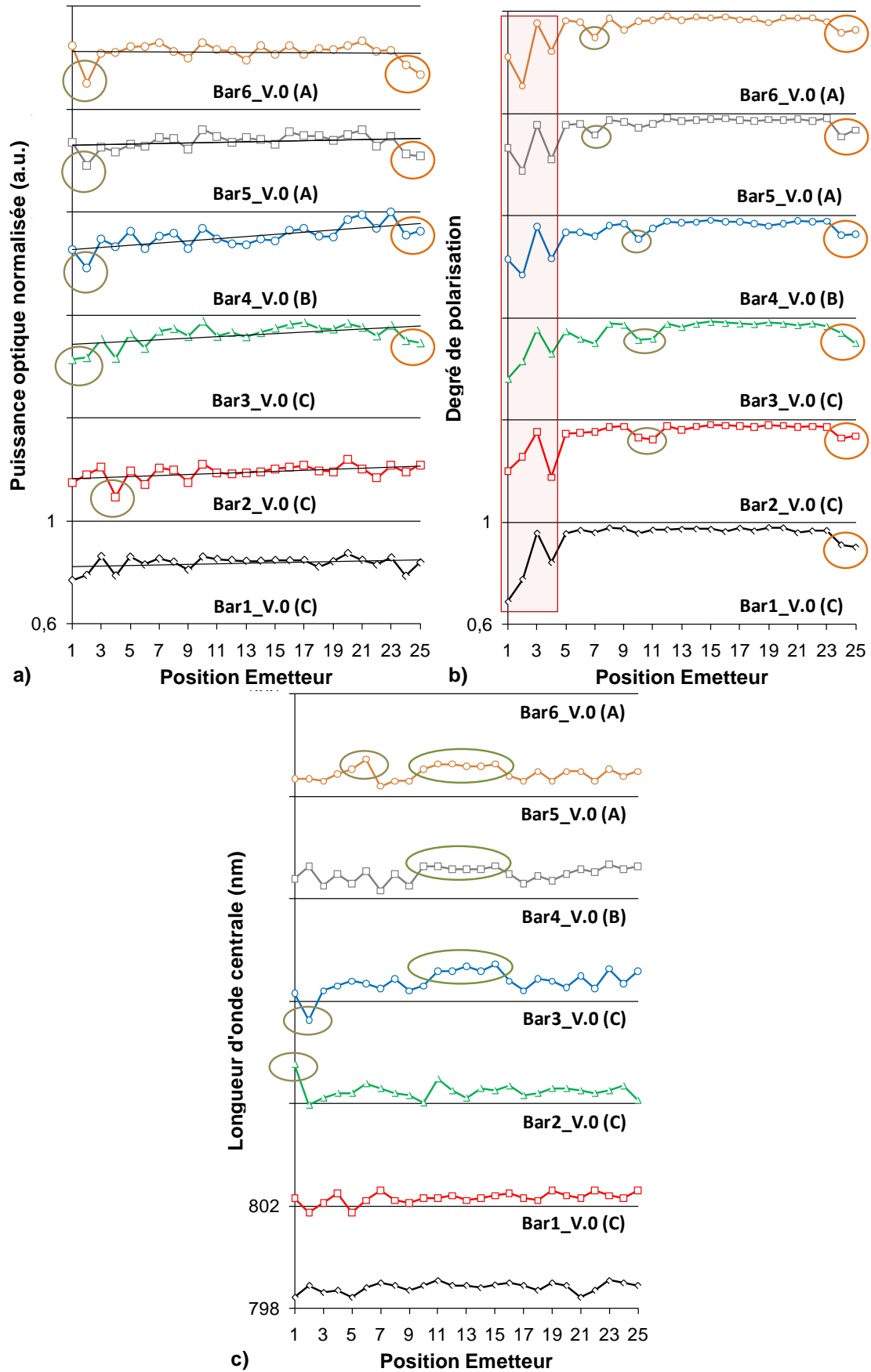


Figure I.30 - Variations des paramètres  $P_{out}$ , DOP et  $\lambda_{max}$  des émetteurs de chaque barrette du Stack

### V.2.b. Stack QCW en mode TM

Jusqu'à présent nous avons caractérisé des barrettes constituées de 25 émetteurs à 808nm en mode TE. Dans le but d'évaluer la caractérisation émetteur par émetteur sur une autre technologie de barrette 808nm destinées aussi au pompage optique de laser solide. Nous allons aborder des barrettes constituées de 65 émetteurs et émettant à 808nm en mode TM (DOP négatif). Ces barrettes d'1cm de large, dispose d'un taux de remplissage avoisinant les 70% et fonctionnent en régime QCW.

Pour cela, un Stack appelé AD33036 composé de trois barrettes avec un pas optique de 400 $\mu$ m est réalisé suivant trois différents processus de report barrette sur son dissipateur (SEB). Les paramètres d'assemblage de ce Stack sont listés dans le Tableau I.9.

Processus	Barrette		Cycle de brasage			
	N°	Plaque	T <sub>br</sub> (°C)	t <sub>br</sub> (s)	P <sub>br</sub> (g)	Outil de report
A	1	A4	Standard	Std	500	a
B	2		Std	Std	600	b
C	3		Std	Std	300	c

Tableau I.9 - Description technologique de la réalisation du Stack QCW TM

L'étude de ce Stack est limitée à la caractérisation initiale au niveau émetteur ceci dans le but de comparer les différents processus report SEB à travers le profil de variation des paramètres DOP et  $\lambda_{max}$  le long des trois barrettes.

- Barrette N°1 du Processus A

Nous avons observé dans cette barrette un fort décalage de  $\lambda_{max}$  par rapport à la longueur d'onde centrale de la barrette (805nm). Ce décalage est situé au niveau de l'extrémité droite de la barrette et présente un fort pic dans l'émetteur #62 (Figure I.31-a). En revanche, le profil du DOP ne montre aucun décalage significatif (Figure I.31-b).

Ces observations sont liées à la forme de l'outil utilisé dans l'étape report SEB. Le processus d'assemblage a affecté le profil de variation de la longueur d'onde.

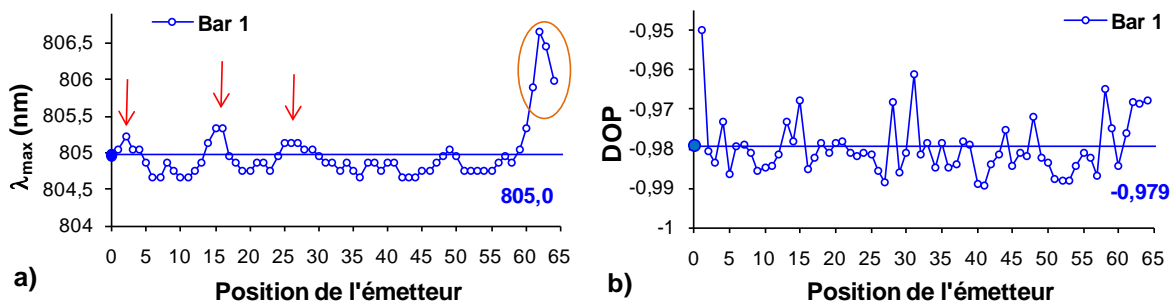


Figure I.31 - Variations des paramètres a)  $\lambda_{max}$  et b) DOP dans la barrette N°1

- Barrette N°2 du Processus B

Là encore, on observe des décalages en longueur d'onde mais cette fois au niveau des deux extrémités de la barrette (Figure I.32-a). Le profil de variation du DOP ne montre pas de variation significative (Figure I.32-b). Par contre, ce profil est clairement plus homogène que celui obtenu dans la barrette N°1.

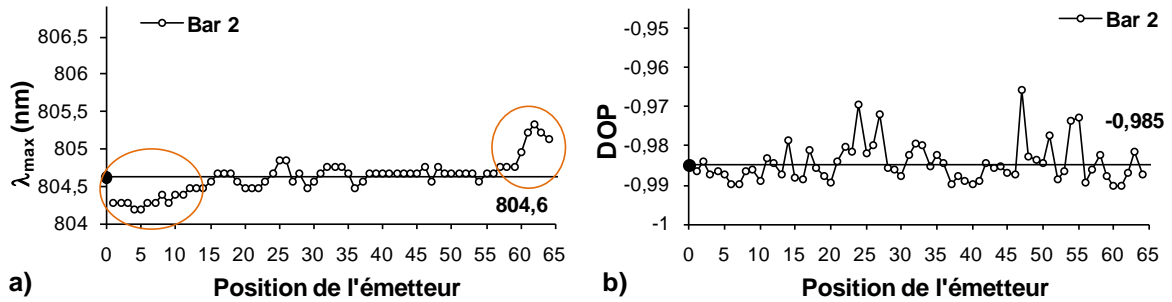


Figure I.32 - Variations des paramètres a)  $\lambda_{\max}$  et b) DOP dans la barrette N°2

- Barrette N°3 du Processus C

La Figure I.33 illustre les profils de  $\lambda_{\max}$  et du DOP le long de la barrette N° 3 du Stack TM. Dans cette barrette, on observe un fort effet oscillatoire de  $\lambda_{\max}$  autour de la longueur d'onde centrale de la barrette avec au total 11 pics (Figure I.33-a). En revanche, le profil du DOP est quasiment homogène comparé aux barrettes précédentes.

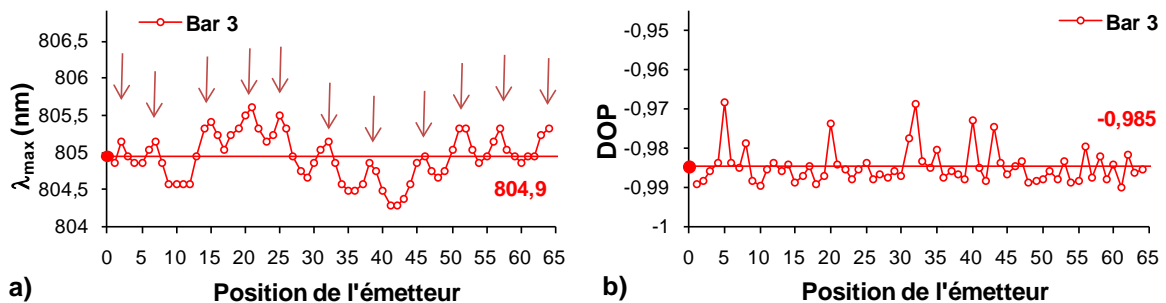


Figure I.33 - Variations des paramètres a)  $\lambda_{\max}$  et b) DOP dans la barrette N°3

Nous venons de démontrer que l'impact du cycle de brasage sur le paramètre  $\lambda_{\max}$  des barrettes TM est significatif dans une configuration de barrettes empilées (stack). En revanche, le profil des variations du DOP peut être considéré comme quasiment identique quelque soit le report utilisé. Cependant, on constate la longueur d'onde est plus sensible au cycle de report utilisée pour des barrettes TM dans une configuration QCW. Concernant les processus utilisés pour réaliser ce Stack TM on peut déjà constater que le processus B mené à des paramètres homogènes le long de la barrette. Dans le chapitre 4, nous allons approfondir l'analyse de l'impact du processus de montage SEB sur la fiabilité de composant QCW émettant en mode TE.

### V.3. Mono barrette CW

Les composants intégrés en mono-barrette CW sont constitués d'une seule barrette d'1cm montée soit directement ou indirectement (avec intermédiaire en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ ) sur une embase en cuivre. Nous avons vu dans la synthèse bibliographique (paragraphe II) que le report direct induit des contraintes mécaniques importantes. En effet, contrairement aux composants QCW qui sont sandwichées entre deux dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  avec un CTE égale à celui de GaAs, au moyen de la caractérisation émetteur par émetteur, nous allons traiter l'impact de l'intermédiaire  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  sur les composants mono-barrette CW.

Dans ce paragraphe nous allons présenter les caractéristiques, émetteur par émetteur, de barrettes CW contenant 19 émetteurs d'une largeur de  $150\mu\text{m}$  au pas de  $500\mu\text{m}$  et émettent à  $808\text{nm}$  (à  $40\text{W}$  continu) en mode TE. Ces barrettes sont issues de la même plaque et elles ont été reportées suivant deux techniques d'assemblages :

- Report direct sur embase en cuivre (appelé H\_Cu\_TE),
- Report sur embase cuivre avec intermédiaire en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  (appelé H\_CuW\_TE).

Les principaux paramètres électro-optiques, pour  $30\text{A}$  en QCW ( $100\text{Hz}/100\mu\text{s}$ ) à  $25^\circ\text{C}$ , des deux composants sont listés dans le Tableau I.10. La comparaison des paramètres électro-optiques de ces deux composants n'est significative que pour les spectres optiques d'émission laser. En effet, on constate un décalage de  $+0,8\text{nm}$  et un élargissement spectrale de l'ordre de  $22\%$  lorsque la barrette est reportée avec intermédiaire en CuW.

	H_Cu	H_CuW	Variation (Cu/CuW)
$P_{\text{out}}$ (W)	27	27.4	-1%
$V_d$	1.69	1.69	0%
$\lambda_{\text{max}}$ (nm)	803	803.8	0%
$\Delta\lambda$ (nm)	1.8	2.2	-22%
$I_{\text{th}}$ (A)	8.8	8.9	-1%
SE (W/A)	1.28	1.29	-1%
Rnd EO (%)	53.2	54	-2%
$R_s$ (ohm)	0.0043	0.0042	2%

**Tableau I.10 - Paramètres électro-optiques du composant en mono-barrette CW mesurés à  $30\text{A}$  ( $100\text{Hz}/100\mu\text{s}$ ) et  $25^\circ\text{C}$**

Nous allons également exposer les résultats de caractérisations initiales d'une barrette de 19 émetteurs émettant à  $808\text{nm}$ , à  $40\text{W}$  continu mais émettant en mode TM. Rappelons que la structure interne des barrettes TM est en tension et très sensibles aux contraintes mécaniques en compressions [21]. Cette barrette a été reportée directement sur embase en cuivre et sera nommée composant

H\_Cu\_TM. Le processus d'assemblage est identique à celui utilisé pour la fabrication du composant H\_Cu\_TE.

### V.3.a. Barrette CW en mode TE : report direct

Les profils de variation des paramètres  $P_{out}$ , DOP et  $\lambda_{max}$  le long de la barrette du composant H\_Cu\_TE sont illustrés dans la Figure I.34. La première observation, commune aux trois profils des variations, réside dans la présence de forts décalages, par rapport aux autres émetteurs, des paramètres au niveau des deux extrémités de la barrette.

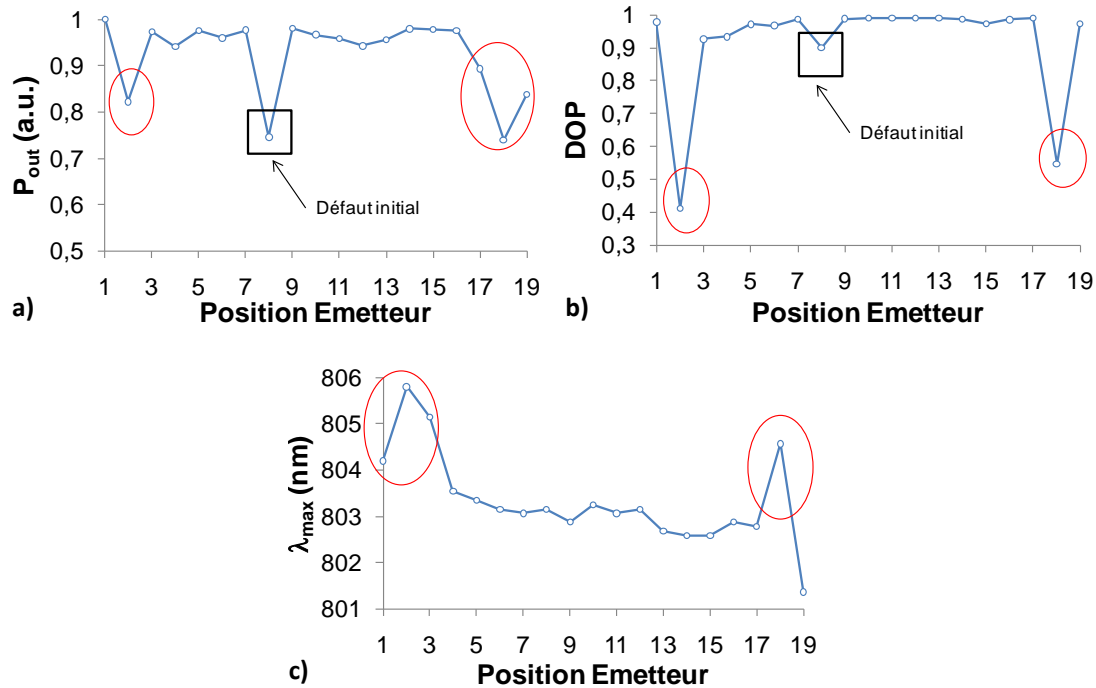


Figure I.34 - Variations des paramètres : a)  $P_{out}$ , b) DOP et c)  $\lambda_{max}$  le long du composant H\_Cu

Le profil des variations du paramètre  $P_{out}$  révèle une faible puissance optique au niveau des émetteurs en position #2, #17, #18 et #19 (Figure I.34-a). Concernant l'émetteur #8, l'origine de la faible puissance optique est la présence d'une remontée de brasure sur la facette d'émission comme représenté en Figure I.35.

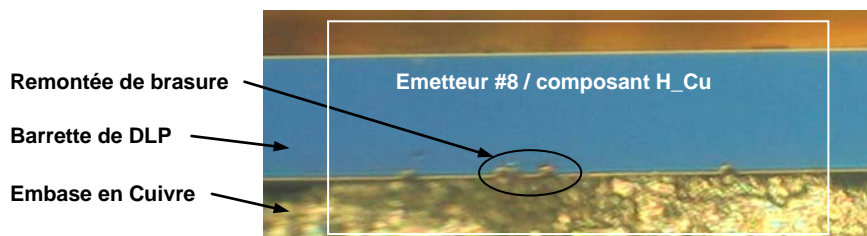


Figure I.35 – Vue optique de l'émetteur #8 dans le composant H\_Cu\_TE présentant une remontée de brasure sur la facette d'émission

Dans le profil du DOP, on observe une faible valeur du DOP au niveau des émetteurs #2 et #18 (Figure I.34-b). Le DOP de ces derniers est inférieur à 0,5 montrant ainsi que le diagramme de

polarisation a été modifié. Cette observation résulte de la présence d'une très forte émission suivant le mode TM qui se traduit par une faible puissance optique (Figure I.34-a). Le profil de la longueur d'onde centrale montre la présence d'un décalage spectral pouvant être supérieur à 1nm avec un fort pic au niveau des émetteurs #2 et #18 comme illustré dans la Figure I.34-c.

Ce composant est très impacté par les contraintes mécaniques résiduelles. En effet, la différence des CTE de la barrette et de l'embase en cuivre génère une contrainte mécanique importante aux extrémités de la barrette.

### V.3.b. Barrette CW en mode TE : report avec intermédiaire CuW

Les profils de variation des paramètres  $P_{out}$ , DOP et  $\lambda_{max}$  le long de la barrette montée avec intermédiaire CuW sont présentés en Figure I.36. Ces profils sont plus homogènes par comparaison aux profils obtenus sur la barrette du composant H\_Cu (Figure I.34). Par contre, dans ce composant nous avons observé que la valeur du DOP est faible mais supérieure à 0,5 sur les émetteurs position #1 et #19. En revanche on a obtenu une bonne homogénéité du profil du paramètre  $P_{out}$  le long de la barrette (Figure I.36-a). Pour le profil de  $\lambda_{max}$ , il est plus homogène que celui mesuré sur le composant H\_Cu\_TE, sauf l'apparition d'un décalage spectral sur l'émetteur #1 de l'ordre 1nm.

Le fait d'introduire un matériau intermédiaire en CuW a permis d'améliorer l'homogénéité des paramètres d'émission des émetteurs et par conséquent de réduire les contraintes mécaniques résiduelles présentées au niveau des extrémités de la barrette. Aussi on constate un effet de décalage des DOP faibles vers les extrémités (émetteurs #1 et #19) de la barrette, par rapport au composant H\_Cu\_TE.

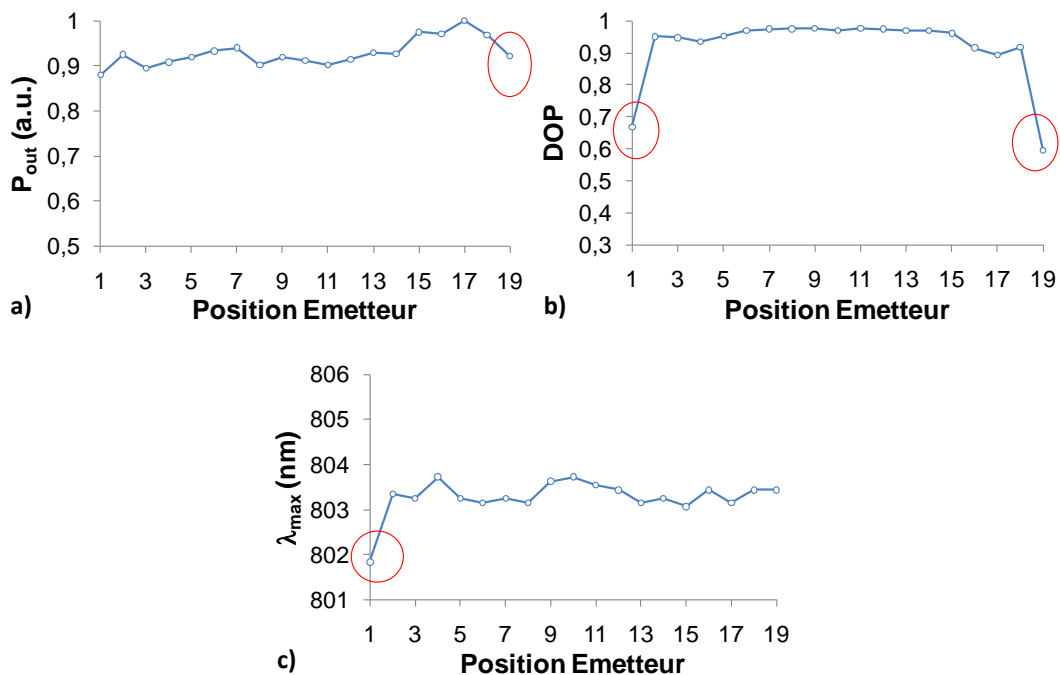


Figure I.36 - Variations des paramètres : a)  $P_{out}$ , b) DOP et c)  $\lambda_{max}$  le long du composant H\_CuW\_TE

### V.3.c. Impact du report direct sur la polarisation de Barrette TM

Cette partie est consacrée à l'impact du report direct sur une barrette CW émettant en mode TM. Les profils de variation des paramètres  $P_{out}$ , DOP et  $\lambda_{max}$  le long de cette barrette sont mis en lumière en Figure I.37. Cette barrette dispose d'une hétérostructure à puits quantique contraint en tension. Après le report de cette barrette, nous avons mesuré un DOP global nul. Ceci peut nous mener à considérer le rayonnement émis non polarisé.

Mais au niveau émetteur individuel, nous avons observé que :

- La variation de  $P_{out}$  (Figure I.37-a) est non homogène le long de la barrette et présente une variation pouvant atteindre 60% au centre de la barrette. Les émetteurs ayant une faible puissance optique sont pour la plupart situés au centre de la barrette et émettent suivant le mode TE (Figure I.37-c).
- Le profil de variation de  $\lambda_{max}$  le long de la barrette (Figure I.37-b) montre un effet de courbure souvent appelé "Smile", qui a atteint une amplitude d'environ 3nm. Cet effet, se traduit par un spectre large du composant dans sa globalité et il en résulte un dédoublement du spectre avec deux pics d'émission distincts (Figure I.38).
- Le profil du DOP le long de la barrette (Figure I.37-c) montre que l'émission est, soit en mode TE au centre de la barrette (émetteurs : #6 à #15), soit en mode TM pour les émetteurs situés dans les extrémités.

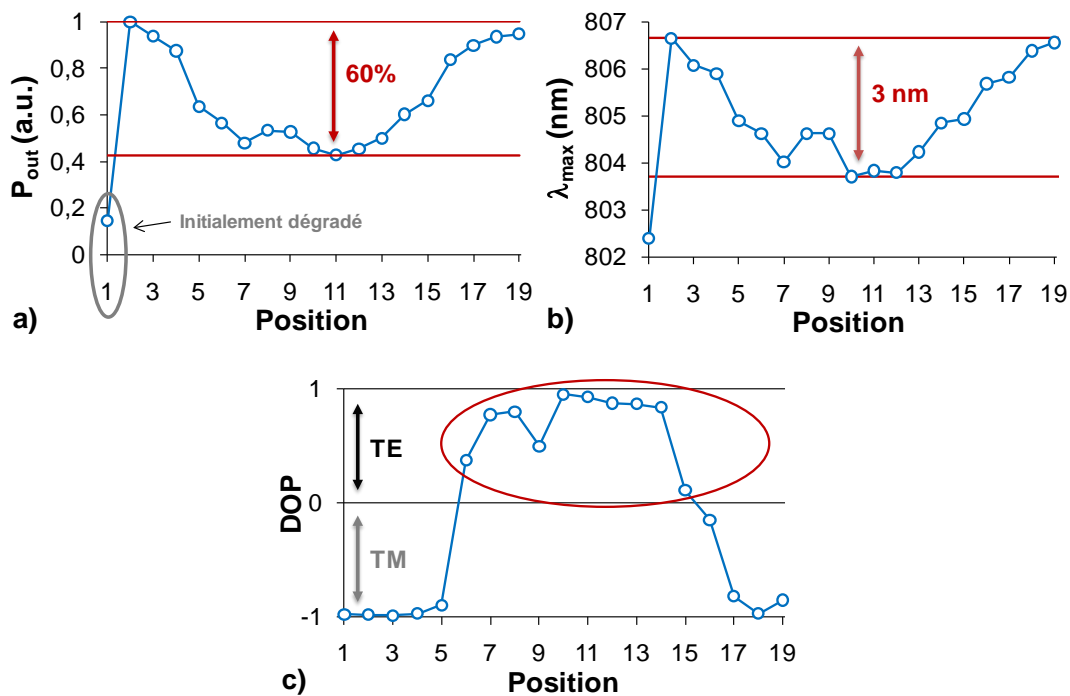
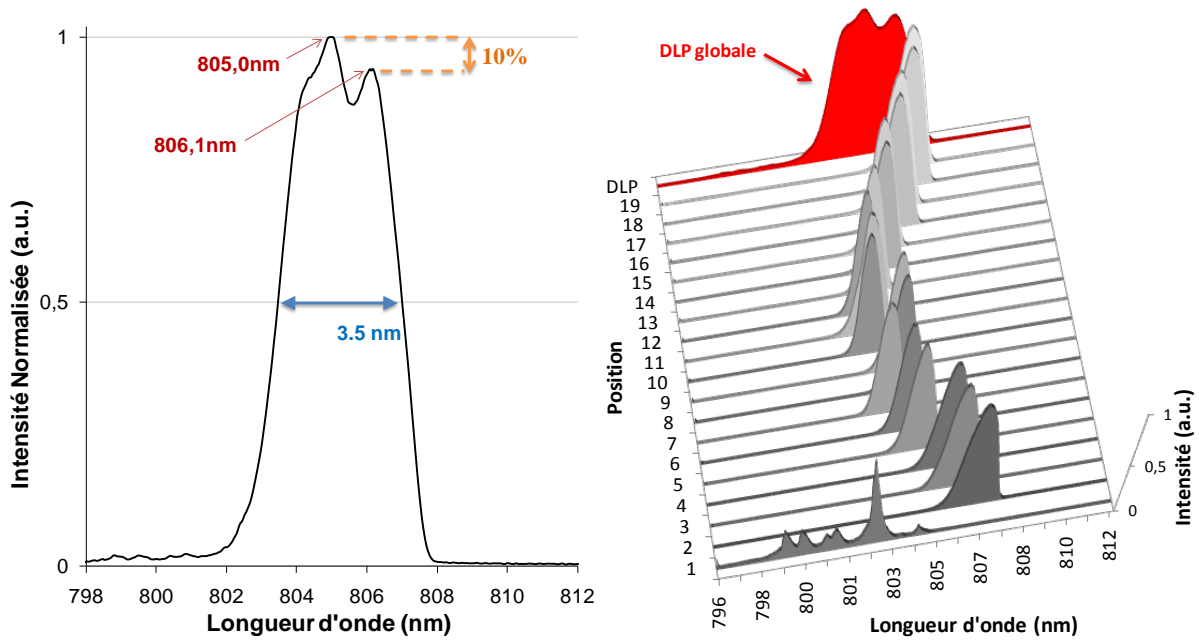


Figure I.37 – Variations des paramètres : a)  $P_{out}$ , b) DOP et c)  $\lambda_{max}$  le long de la barrette TM du composant H\_Cu\_TM



La Figure I.38 présente le spectre global de ce composant H\_Cu\_TM ainsi que les spectres de chaque émetteur dans barrette. On observe un dédoublement du pic d'émission qui se caractérise par l'émission suivant deux modes : TE pour le pic à 805nm et TM pour le pic 806,1nm.



**Figure I.38 - Spectre optique global du composant H\_Cu\_TM et les spectres optique des chaque émetteurs constituant la barrette**

Dans le cas du composant H\_Cu\_TM, le report direct P-down de la barrette sur embase en cuivre conduit à rendre le composant inexploitable pour des applications dont l'émission laser privilégie le mode TM.

Pour ce composant, la mesure du DOP a été réalisée suivant un angle d'orientation du polariseur qui a nécessité une rotation dépendante de la position de l'émetteur (voir Figure I.39). Ceci ne s'explique que par la déformation non homogène du diagramme de polarisation des émetteurs le long de la barrette. Le passage du mode TE au mode TM des émetteurs est dû à la présence d'une contrainte mécanique en compression au dessus du seuil tension qui permet d'émettre et d'amplifier en mode TM, comme l'a décrit M. Levy [22]. Tous les émetteurs qui émettent en mode TE présentent alors une faible puissance optique.

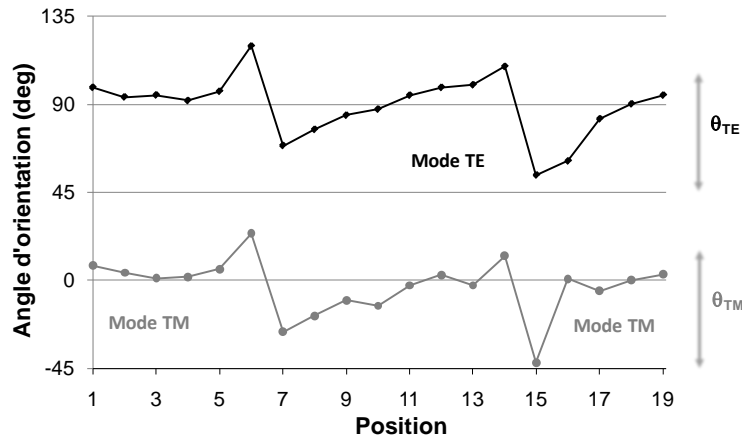


Figure I.39 - Profil de l'angle d'orientation du cube polariseur pour la mesure des intensités suivant le mode TE et TM de chaque émetteur le long de la barrette du composant H\_Cu\_TM

## VI. Conclusion

De manière générale, l'analyse non destructive des barrettes de DLP nécessite la mise en place de techniques physiques très complexes et lourdes à mettre en œuvre. Une synthèse bibliographique exhaustive indique que la photoluminescence ( $\mu$ PL) et la spectroscopie par photo-courant (PCS) apparaissent comme les techniques clés, révélant que le report direct de barrettes (à substrat GaAs) sur embase en cuivre, génère de fortes contraintes mécaniques en compression et non homogènes le long de la barrette.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode d'analyse originale, des barrettes de DLPs, basée sur la caractérisation élémentaire des barrettes. En effet, nous avons développé un banc dédié de caractérisation électro-optique des barrettes au niveau émetteur qui permet de relever les profils de variation des paramètres :  $P_{out}$ , DOP et  $\lambda_{max}$  le long des barrettes. Ce banc présente l'originalité d'être en mesure de caractériser, en CW et QCW, les émetteurs de barrette de DLP constituée d'un nombre allant de 19 à 65 émetteurs dans une configuration mono-barrette ou multi-barrette (Stack).

Après plusieurs caractérisations, nous avons fixé les conditions de mesure des émetteurs à 25°C pour un courant de 30A en régime QCW (100Hz/100 $\mu$ s). Dans ces conditions, une étude de métrologie fine à partir des mesures de répétabilité, a permis de calculer un très faible écart type, du  $\lambda_{max}$  (0,07nm),  $P_{out}$  (4,0mW) et DOP (0,003), pour considérer les variations liées au vieillissement des dispositifs étudiés.

Dans le cas de composants QCW, les résultats préliminaires mettent en évidence la présence d'émetteurs atypiques émettant avec de forts décalages en terme de longueur d'onde et DOP par rapport aux paramètres de la barrette entière. L'étude de la fiabilité des composants QCW passe avant tout par l'étude de l'impact des processus d'assemblage qui est à l'origine du niveau de contraintes mécaniques résiduelles. Nous avons présenté les résultats initiaux obtenus sur les composants architecturés en mono-barrette et en multi-barrettes (Stack).

Dans le cas de composants CW, nous avons pu observer que le report direct de barrettes (TE) induit des contraintes mécaniques résiduelles qui sont réduites en utilisant un report avec intermédiaire CuW et ces résultats sont en accord avec ceux récemment publiés dans le domaine. En revanche, concernant le report direct d'une barrette CW émettant en mode TM, nous avons observé que les contraintes mécaniques résiduelles dégradent la polarisation du rayonnement émis. Les émetteurs situées au centre de la barrette TM (50% des émetteurs) émettent en mode TE après les étapes du report direct.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la criticité des effets thermiques et de l'assemblage des barrettes dans une configuration type mono-barrette QCW au moyen de simulations par la méthode des éléments finis. Ensuite, nous exposerons les résultats des contraintes mécaniques résiduelles dans des composants CW et QCW à travers les cartographies par photoluminescence polarisée. Enfin, pour déterminer l'influence des contraintes mécaniques sur la barrette, la dernière partie abordera l'impact des contraintes mécaniques appliquées à la barrette au moyen des caractéristiques électro-optiques émetteur par émetteur en utilisant le banc dédié décrit dans ce deuxième chapitre.

---

## VII. REFERENCES

- [1] Jean-Pierre Landesman, "Micro-photoluminescence for the visualisation of defects, stress and temperature profiles in high-power III-V's devices", *Materials Science and Engineering B*, V 91-92, pp. 55-61, (2002).
- [2] K. H. Herrmann, Hessa Al-Otaibi and J. W. Tomm, "Photocurrent spectroscopy of QW GRIN laser structures", *Materials Science and Engineering B*, V 74, Issues 1-3, pp. 61-65, (2000).
- [3] Tran Quoc Tien, Axel Gerhardt, Sandy Schwirzke-Schaaf, Jens W. Tomm, M. Pommiès, M. Avella, J. Jiménez, Myriam Oudart, and Julien Nagle, "Screening of high-power diode laser bars by optical scanning", *Appl. Phys. Lett.*, p. 87, (2005).
- [4] R. Xia, E.C. Larkins, I.Harrison, S.R. A. Dods, A.V. Andrianov, J. Morgan, and J.P. Landesman "The effect of mounting-induced strain and defect on the properties of AlGaAs 808 nm LDs", *Synthetic Metals*, Vol. 127, pp. 255-259, (2002).
- [5] S. Bull, A.V. Andrianov, I. Harrison, and E. C. Larkins "The study of strain and defects in high power laser diodes by spectroscopically resolved photoluminescence microscopy", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 27, pp. 469-473, (2004).
- [6] Bull, S., Tomm, J.W., Oudart, M., Nagle, J., Scholz, C., Boucke, K., Harrison, I., and Larkins, E.C. "By-emitter degradation analysis of high-power laser bars" *J. Appl. Phys.* 98 (6), pp. 1-4, (2005).
- [7] Stephen Bull, Jens W. Tomm, and Eric C. Larkins "Identification of degradation mechanisms in high-power laser bars using by-emitter degradation studies", *J Mater Sci: Mater Electron* 19, pp. 145-149, (2008).
- [8] S. Perkowitz, "Optical Characterization of Semiconductors: Infrared, Raman and Photoluminescence Spectroscopy", Academic Press, New York (1993).
- [9] L. Pavesi, and M. Guzzi, "Photoluminescence of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Alloys" *J. Appl. Phys.* 75, pp. 4779-4842, (1994).
- [10] J.I. Pankove, "Optical Processes in Semiconductors", Dover, New York (1975).
- [11] H.B. Bebb and E.W. Williams, "Semiconductors and Semimetals", R.K. Williardson and A.C. Beer Editors, Academic Press, New York, V 8, p. 181, (1972).
- [12] A.H. Kitai (Ed.), "Solid State Luminescence", Chapman and Hall, Cambridge, (1993).
- [13] Jean-Pierre Landesman, "Micro-photoluminescence for the visualisation of defects, stress and temperature profiles in high-power III-V's devices", *Materials Science and Engineering B*, V 91-92, pp. 55-61, (2002).
- [14] Yves Sainte marie, "Impact des contraintes locales induites par le process et le packaging des diodes lasers de puissance sur la fiabilité de ces composants", Thèse de doctorat, Spécialité : Sciences des matériaux, Université de Nantes (2004).
- [15] K.H. Herrmann, Hessa Al-Otaibi and J.W. Tomm, "Photocurrent spectroscopy of QW GRIN laser structures", *Materials Science and Engineering B*, V 74, Issues 1-3, pp. 61-65, (2000).
- [16] A. Bwloff and J.W. Tomm, "Non-Invasive Optical Assessment of Packaging-Induced Defects in High-Power Laser Diodes", *Electronic Components and Technology Conference, Proceedings*. 50<sup>th</sup>, pp. 421 - 425, (2000).
- [17] Biermann, M.L., Duran, S., Peterson, K., Gerhardt, A., Tomm, J.W., Bercha, A., Trzeciakowski, W., "Spectroscopic method of strain analysis in semiconductor quantum-well devices", *J. Appl. Phys.* 96, pp. 4056-65, (2004).
- [18] Tomm, J.W., Quoc Tien, T., Oudart, M., Nagle, J., and Biermann, M.L., "Strain relaxation and defect creation in diode laser bars", *Materials Science in Semiconductor Proc.*, 9 (1-3), pp. 215-219, (2006).

- [19] Biermann, M.L., Cassidy, D.T., Tien, T.Q., and Tomm, J.W., "*Processing-induced strains at solder interfaces in extended semiconductor structures*", J. Appl. Phys. 101 (11), pp. 114512-5, (2007).
- [20] W. Wang, K. Allaart and D. Lenstra, "*Polarization Characterized Band Model for Layered Semiconductors*", Proc. 9<sup>th</sup> Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter, pp. 331-334, (2004).
- [21] Mori, Yoshihiro; Shibata, Jun; and Kajiwara, Takao; "*Analysis of optical polarization bistability in transverse magnetic wave injected semiconductor lasers*", Journal of Applied Physics, Vol. 67 Issue:5, pp. 2223 - 2228, (1990).
- [22] M. Levy, Y. Berk and Y. Kami, "*Effect of compressive and tensile strain on the performance of 808 nm QW high power laser diodes*", Proceedings of the SPIE, Vol. 6104, pp. 93-104, (2006).

# Chapitre III. Modélisations thermiques et mécaniques des DLPs - Approche expérimentale

---

## I. Introduction

Les travaux décrits dans le chapitre 2 se sont focalisés sur la justification et le développement d'un banc de caractérisation électro-optiques des barrettes de DLPs au niveau émetteur individuel. L'intérêt a été d'extraire les paramètres électro-optiques des émetteurs pour mettre en lumière d'éventuelles indicateurs précoces de défaillance pouvant être relevées directement après les étapes du report et affectant directement les performances de la DLP. Pour mieux appréhender le fonctionnement des barrettes et l'impact de leur microassemblage, il est essentiel de mener une étude préliminaire sur le management thermique et sur les effets associés au report sur les différents types de matériaux disponibles pour l'assemblage des barrettes de DLPs.

Ce chapitre s'attachera donc à étudier la criticité des effets thermiques et de l'assemblage des barrettes dans une configuration de type mono-barrette QCW au moyen de simulations par la méthode des éléments finis en environnement COMSOL [1]. Il sera ainsi possible d'évaluer, de façon précise, la répartition des isothermes thermiques et les niveaux de contraintes mécaniques de façon globale et localisée au sein de la barrette. Dans une deuxième partie, nous nous focaliserons sur la comparaison expérimentale des contraintes mécaniques résiduelles dans les architectures CW et QCW au travers des cartographies par photoluminescence polarisée. Afin d'évaluer l'influence des contraintes mécaniques sur la barrette, la dernière partie de ce chapitre analysera les effets de contraintes spécifiquement appliquées, par l'intermédiaire d'un procédé expérimental basé sur le principe de la poutre encastree, sur les caractéristiques électro-optiques émetteur par émetteur de la barrette.

## II. Conditions de modélisation

De manière générale, la méthode de modélisation par éléments finis consiste à mailler une structure en de multiples éléments reliés par des nœuds, qui correspondent aux sommets des différents éléments. Le problème, initialement continu, est transformé en un problème discret dans lequel les

---

déplacements de chaque nœud deviennent de nouvelles inconnues. La résolution d'un tel problème, à l'aide de la simulation par éléments finis, se décompose en plusieurs étapes :

- la construction du modèle,
- le maillage de la structure,
- la définition des conditions aux limites.

## II.1. Définition du modèle

Le logiciel COMSOL Multiphysics possède une interface graphique conviviale, qui permet de représenter une structure constituée d'un empilement de volumes modélisant la barrette assemblée. Les modèles utilisés seront constitués des éléments suivants :

- la barrette de DLP,
- le dissipateur thermique,
- les alliages de brasure,
- l'embase d'accueil.

En revanche, les couches de métallisation des dispositifs modélisés seront négligées compte tenu de la complexité du maillage de couches d'épaisseur fine (très inférieure au  $\mu\text{m}$ ). La thermique et les contraintes mécaniques résiduelles dans les composants mono barrette QCW seront simulés en tenant compte de modèles à :

- deux dimensions (2D) pour les simulations thermiques, le maillage est constitué de 4384 éléments et comporte 8602 nœuds (Figure I.1-a),
- trois dimensions (3D) pour les simulations mécaniques, le maillage est constitué de 4810 éléments et comporte 3768 nœuds (Figure I.1-b).

## II.2. Conditions sur le maillage

L'étape de maillage consiste à découper le modèle construit en une série d'éléments. Dans notre cas, la structure régulière de l'empilement autorise un maillage relativement simple, réalisé à partir d'éléments de type libre tétraédriques générés automatiquement. En général, le maillage doit être adapté à la structure étudiée. Certaines zones de la structure sont soumises à de faibles contraintes permettant ainsi un maillage plus grossier alors que d'autres zones soumises à de forts gradients de contrainte nécessitent un maillage beaucoup plus affiné. Dans notre cas, le maillage est réalisé de sorte qu'il existe une densité d'éléments plus élevée quand on se rapproche de la face émissive de la barrette laser qui correspond à la zone où la variation des contraintes mécaniques est étudiée (Figure I.1-b).

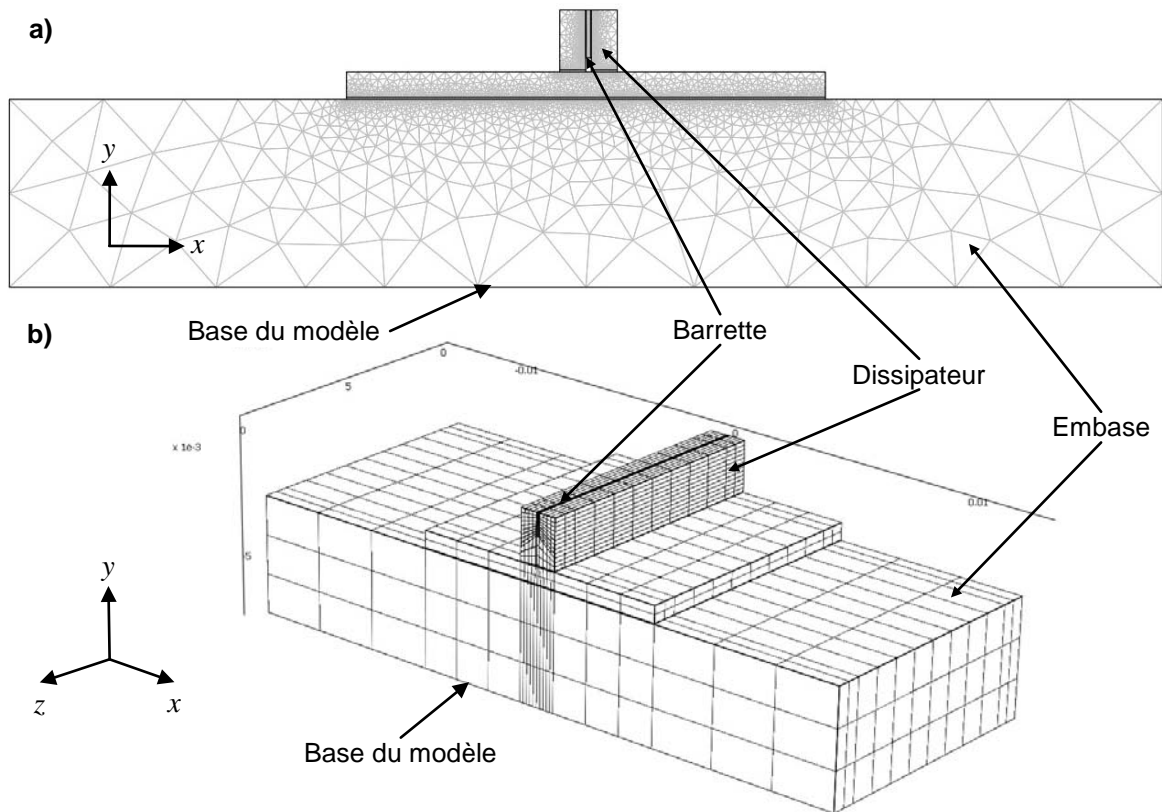


Figure I.1 - Exemple du maillage 2D (a) et 3D (b) d'un composant mono barrette QCW

### II.3. Conditions aux limites

Le calcul de simulation par éléments finis est réalisé au point d'intégration interne de chaque élément puis extrapolé aux différents nœuds des éléments. La valeur des contraintes en un nœud est ensuite calculée en moyennant la valeur des contraintes des éléments adjacents. Cette méthode de calcul a pour conséquence que la valeur des contraintes normales simulées sur une surface n'est pas nulle. Les premières et dernières valeurs de contrainte correspondant aux deux extrémités de la barrette ne doivent alors pas être prises en compte dans l'analyse des résultats. Le problème est résolu en tenant compte des conditions aux limites imposées à la structure et des propriétés des différents matériaux qui composent l'empilement. Les conditions aux limites fixées dans les simulations sont les suivantes :

- pour le procédé de simulation thermique: la base du modèle (Figure I.1-a) a été fixée à 25°C.
- pour les simulations thermomécaniques: la base du modèle (Figure I.1-b) a été bloquée dans toutes les directions de l'espace.

### III. Modélisations thermiques

La dissipation de la chaleur dans les DLPs est, aujourd'hui, une des priorités du concepteur des composants de diodes laser de très forte puissance. L'effet de chauffage des barrettes, par réabsorption



du flux laser sur des agrégats d'arsenic élémentaire formés à la surface même du miroir ou bien par recombinaisons non-radiatives de surface, est en pratique extrêmement important pour analyser la thermique des barrettes de DLP et le mécanisme de dégradation associé [2].

De manière générale, la propagation de la chaleur issue de la zone active d'un composant électronique peut s'effectuer selon trois principaux mécanismes d'échange avec le milieu environnant: conduction, convection et rayonnement. Dans le cas des diodes laser de puissance, la conduction représente le phénomène majeur par lequel s'effectue l'évacuation de la chaleur [3]. Aussi, les matériaux qui composent les dissipateurs et leurs épaisseurs ont une influence capitale sur le comportement thermique. Dans la partie suivante, nous allons effectuer un bref rappel des phénomènes physiques liés aux échanges thermiques.

### III.1. Ecoulement thermique

Si un conducteur thermique est mis en contact avec deux sources de chaleur de température  $T_1 > T_2$ , il s'établit un flux de chaleur  $\phi = \phi(x,t)$  défini comme la quantité de chaleur (J) traversant une surface ( $m^2$ ) par unité de temps (s). Le transport s'effectue de la source chaude vers la source froide (augmentation de l'entropie : 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique). L'expérience montre qu'en régime stationnaire ( $\partial T/\partial t = 0$ ),  $\phi$  est directement proportionnel à la différence de température, mais inversement proportionnel à la longueur du conducteur.

$$\phi = -K_{th} \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (w/m^2) \quad \text{E- 27}$$

où,  $K_{th}$  est la conductivité thermique du matériau ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ).

Le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température (T), forme locale retenue pour les situations générales, où T et  $\phi$  sont en fonction du temps et de la position.

$$\phi(x, t) = -K_{th} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Loi de Fourier}) \quad \text{E- 28}$$

Si le flux de chaleur varie entre deux positions proches x et  $\Delta x$ , de la chaleur est déposée dans le volume traversé  $S \times \Delta x$  pendant  $\Delta t$ . La quantité déposée est donnée par E- 3.

$$\Delta Q = (\phi(x) - \phi(x + \Delta x)) S \Delta t = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \Delta x S \Delta t \quad \text{E- 29}$$

La température de la masse [ $\rho \times S \times \Delta x$ ], avec  $\rho$  la masse volumique, s'élève de  $\Delta T$  de manière à absorber la quantité de chaleur  $\Delta Q$ .

$$\Delta Q = \Delta T C_p \rho S \Delta x = \frac{\partial T}{\partial t} \Delta t C_p \rho S \Delta x \quad \text{E- 30}$$

où,  $C_p$  représente la capacité thermique massique du matériau ( $J.K^{-1}.kg^{-1}$ ).

A l'aide des relations E- 3 et E- 4, on peut écrire l'équation de continuité. La relation E- 5 exprime la conservation de l'énergie au cours du transport.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \text{E- 31}$$

En éliminant  $\phi$  entre les relations E- 2 et E- 5, on obtient l'équation de diffusion de la chaleur (E- 6) dans un espace unidimensionnel.

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{K_{th}}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = D_{th} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad \text{E- 32}$$

où,  $D_{th}$  représente la diffusivité thermique du milieu ( $m^2/s$ ).

La longueur "envahie" par la température ( $L_T$ ) est proportionnelle à la racine carrée du temps écoulé. La diffusion de la chaleur ralentit au cours du temps puisque le mécanisme associé à ce phénomène est relatif aux gradients de température, diminuant au fur et à mesure de leur propagation.

$$L_T = \sqrt{D_{th} t} = \sqrt{\frac{K_{th}}{\rho C_p} t} \quad \text{E- 33}$$

## III.2. Simulation thermique du composant mono-barrette QCW

### III.2.a. Description du modèle

Cette étude se base sur un modèle 2D pour simuler l'influence du dissipateur sur la température de jonction des composants mono-barrette QCW, en faisant varier le pas optique (épaisseur des dissipateurs) de 400 à 1200 $\mu$ m pour différents types de matériaux du dissipateur. En effet, dans les barrettes de DLP, la température de jonction impacte directement la longueur d'onde d'émission laser ; paramètre clé pour plusieurs applications.

Les dissipateurs utilisés dans cette étude appartiennent à deux familles :

- Le diamant dopé cuivre appelé DC60,
- Les alliages Cuivre/Tungstène (CuW) qui se différencient suivant leur concentration en cuivre et trois types d'alliage ont été retenus :  $Cu_{10}W_{90}$ ,  $Cu_{15}W_{85}$  et  $Cu_{20}W_{80}$ .

La conductivité thermique ( $K_{th}$ ) est le principal paramètre pris en compte pour l'étude en régime permanent, à laquelle la chaleur massique ( $C_p$ ) et la densité volumique ( $\rho$ ) doivent être ajoutées pour l'étude en régime transitoire. Pour étudier l'impact de chacun de ces matériaux sur la dissipation de la chaleur dans la DLP. Le Tableau I.1 regroupe les constantes thermiques des différents dissipateurs étudiés.

	Matériaux	$K_{th}$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	$\rho$ ( $g.cm^{-3}$ )	$Cp$ ( $J.Kg^{-1}.K^{-1}$ )	$T$ ( $^{\circ}C$ )
Dissipateur	$Cu_{10}W_{90}$	180	17,00	160	25
	$Cu_{15}W_{85}$	190	16,40	170	25
	$Cu_{20}W_{80}$	200	15,65	180	25
	DC60	550	4,87	450	25

Tableau I.1 - Propriétés thermiques des différents matériaux utilisés comme dissipateur [4]

Les simulations thermiques vont permettre d'évaluer l'impact de chaque type de dissipateur sur l'évacuation de la chaleur thermique, en particulier en régime transitoire, dans les composants mono-barrette QCW. La description du modèle 2D utilisée est présentée en Figure I.2.

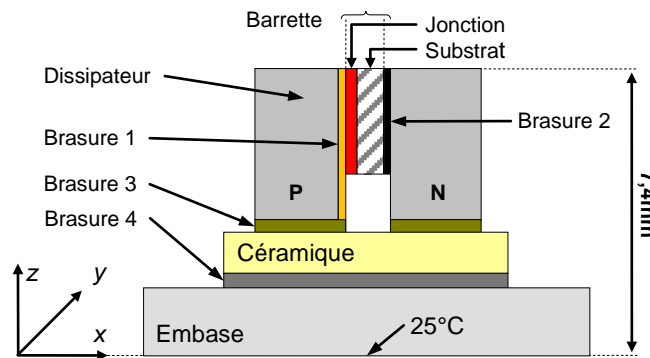


Figure I.2 - Schéma descriptif du modèle utilisé pour les simulations thermiques

Les propriétés thermiques, supposées indépendantes de la température, des composantes du modèle et les paramètres physiques des matériaux utilisées sont données dans l'annexe A. Les caractéristiques dimensionnelles du modèle 2D sont listées dans le Tableau I.2.

	Matériaux	Dimensions ( $\mu m$ )			
		x	y	z	
<b>Jonction</b>	GaAs (zone active)	5	$10 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$	
<b>Substrat</b>	GaAs (Wafer)	110			
<b>Brasure 1</b>	$Au_{80}Sn_{20}$	5			
<b>Brasure 2</b>	$Sn_{96,5}Ag_{3,5}$	20			
<b>Dissipateur</b>	CuW	$Cu_{10}W_{90}$	250 à 1050	$10 \times 10^3$	$1,5 \times 10^3$
		$Cu_{15}W_{85}$			
		$Cu_{20}W_{80}$			
	DMCH <sup>5</sup>	DC60			
<b>Brasure 3</b>	$Sn_{62}Pb_{32}Ag_2$				50
<b>Céramique</b>	AlN	$12 \times 10^3$	$10 \times 10^3$		655
<b>Brasure 4</b>	$Sn_{62}Pb_{32}Ag_2$				50
<b>Embase</b>	Cuivre	$28,9 \times 10^3$	$10 \times 10^3$		$4,7 \times 10^3$

Tableau I.2 - Caractéristiques dimensionnelles des matériaux utilisés dans les simulations thermiques

<sup>5</sup> Diamond Metal Composite for Heat Sink (DMCH)

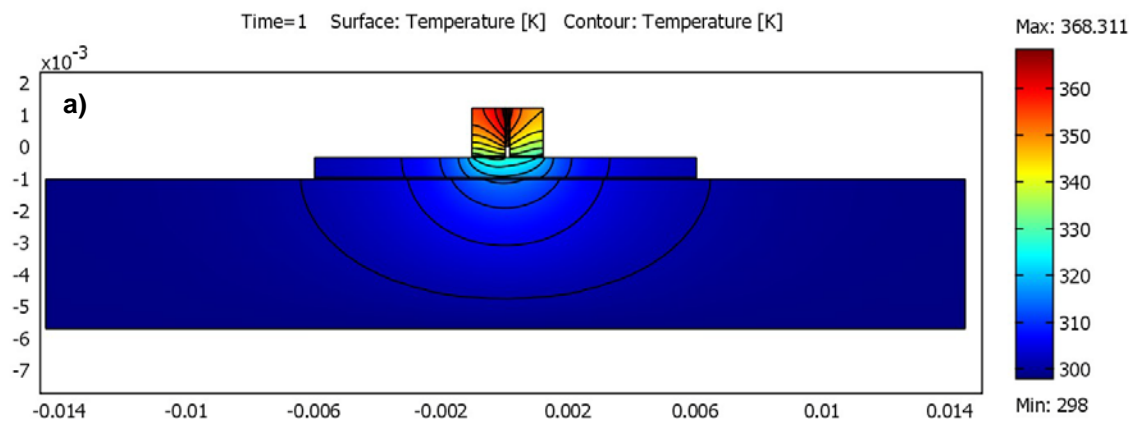
### III.2.b. Etude de la réponse transitoire

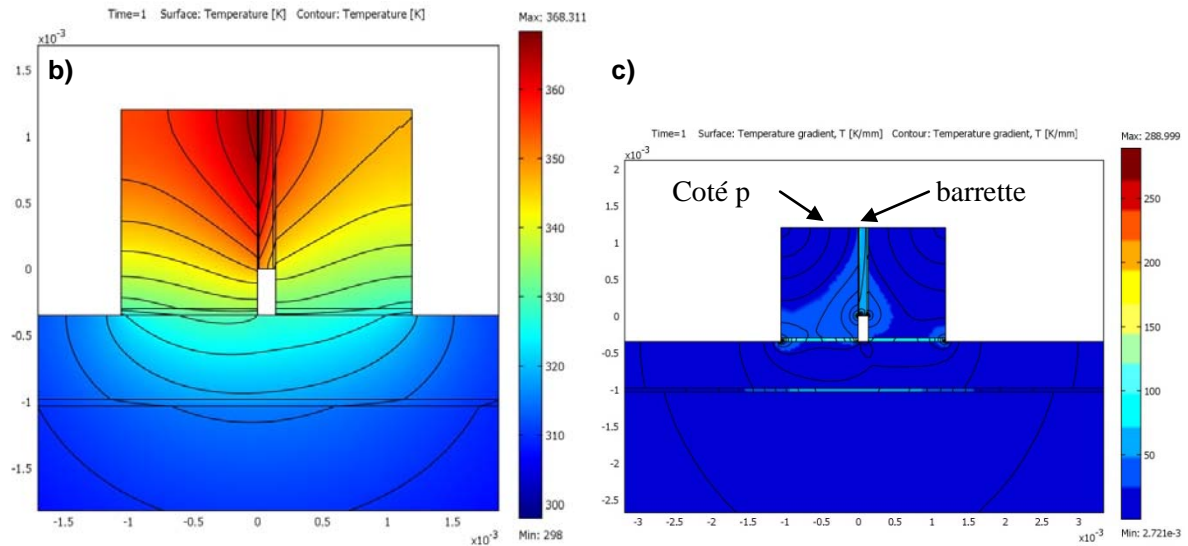
Le puits de chaleur du modèle est représenté par la jonction de la structure épitaxiale de la barrette. Elle est modélisée par un parallélépipède de  $5\mu\text{m}$  d'épaisseur (voir Tableau I.2) qui dissipe un flux de chaleur volumique de  $167\text{kW}/\text{cm}^3$ , correspondant à une puissance thermique ( $P_{\text{dss}}$ ) de  $100\text{W}$  pour un rendement électro-optique égal à  $50\%$ . La base du composant est maintenue à  $25^\circ\text{C}$ , simulant une régulation expérimentalement réalisée au moyen d'un module à effet Peltier.

En régime transitoire, la discrétisation temporelle est un élément fondamental qui doit être pris en compte. En environnement COMSOL, nous avons utilisé une méthode de calcul avec un pas constant. En effet, dans le cas du composant mono-barrette QCW, le pas de calcul dépend des constantes de temps thermiques mais aussi du type de profil de fonctionnement simulé. Pour un profil présentant des variations rapides, le pas de calcul devra être réduit afin de prendre en compte les variations de température au niveau du modèle thermique.

Un exemple de résultat de simulation est présenté dans la Figure I.3 visualisant la cartographie de la température dans le modèle permettant d'en déduire:

- la présence d'un fort gradient thermique (Figure I.3-c) aux interfaces barrette-dissipateur (Figure I.3-b),
- l'évacuation de la chaleur se fait principalement par le coté "P" de la barrette puisque la conductivité thermique du dissipateur est supérieur à celle du substrat (GaAs).





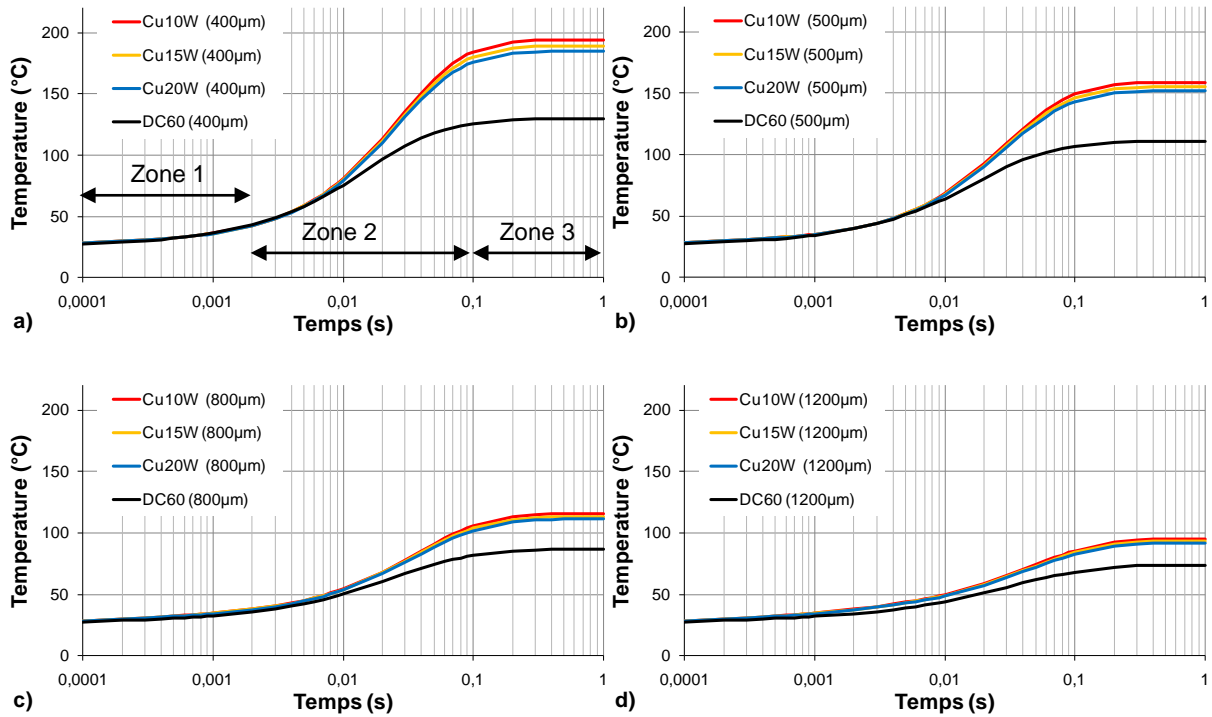
**Figure I.3 - Répartition des isothermes dans le composant mono-barrette QCW à  $t = 1s$  pour une puissance thermique dissipée de 100W : a) vue globale, b) vue au niveau de la barrette et c) répartition du gradient de température**

### III.2.b.1. Réponse transitoire

Aux échelles de temps les plus courtes, les capacités thermiques des différents éléments jouent le rôle de réservoir thermique et il faut attendre quelques millisecondes pour atteindre un état permanent à partir duquel l'élément, modélisant les échanges thermiques à l'équilibre, est associé à la résistance thermique. Dans l'ensemble des simulations, la température de jonction a été déterminée au centre de la zone active (Tableau I.2) à  $10\mu m$  de la face émissive [5].

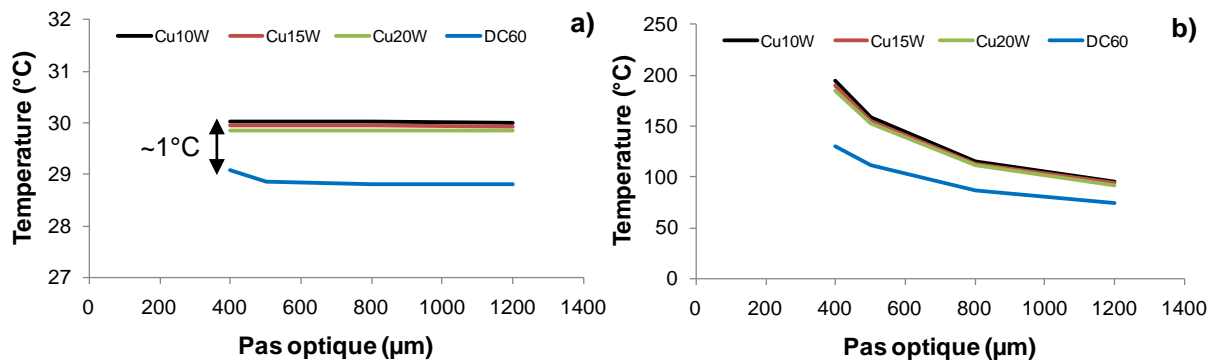
Les résultats de simulation pour les différents matériaux et épaisseurs des dissipateurs sont présentés en Figure I.4. On distingue trois zones temporelles (Figure I.4-a) dans lesquelles la température évolue différemment [6]; ces zones se représentant comme suit :

- Zone 1 (de 10 ns à plusieurs millisecondes) : la température transitoire est exclusivement déterminée par la structure et les propriétés thermiques de la barrette. Par conséquent, les différents matériaux et épaisseur des dissipateurs ont peu d'influence sur la température de jonction en régime transitoire.
- Zone 2 (entre plusieurs millisecondes et quelques centaines de millisecondes) : la formation du flux de chaleur distribuée par la jonction est effective ainsi que le transport de la chaleur dissipée par la jonction. Ce processus tend à s'équilibrer vers un niveau caractérisé par la température de la zone active en régime continu.
- Zone 3 (à partir de quelques centaines de millisecondes) : l'équilibre thermique est atteint. Cette zone est caractérisée par la température de la zone active pour un courant injecté en CW et une température du dissipateur (ambiante). Cette température est alors principalement déterminée par l'épaisseur et le type de matériau du dissipateur thermique.



**Figure I.4 - Comparaison des résultats de simulation d'une configuration mono barrette QCW dissipant 100W thermique pour différents matériaux constitutifs du dissipateur et pas optiques : a) 400, b) 500, c) 800 et d) 1200µm**

L'analyse des courbes de la Figure I.4 montre que, pour une durée de fonctionnement inférieure à 200µs (Figure I.5-a), l'influence du type du matériau et l'épaisseur du dissipateur sont négligeables dans l'évacuation de la température de jonction. En revanche, pour des durées de fonctionnement supérieures à 200µs, lorsque la fraction du cuivre augmente dans l'alliage cuivre/tungstène (CuW), la température de jonction diminue puisque la conductivité thermique des CuW croît proportionnellement à la fraction en cuivre [5]. En revanche, le DC60 est le matériau le mieux adapté à l'évacuation de la chaleur dans les barrettes de DLPs. Par contre, lorsque le régime permanent est établi, la composition du matériau et l'épaisseur du dissipateur deviennent clairement significative pour l'évacuation de la chaleur (voir Figure I.5-b).



**Figure I.5 - Température de jonction de la barrette en fonction du pas optique du composant mono-barrette QCW à : 200µs (a) et 1s (b)**

Pour éclaircir la faible influence du type de matériau pour des durées d'impulsions courtes, nous avons évalué la diffusion de la température au sein de chaque type de matériau. Cette grandeur est caractérisée par une longueur dite la longueur de diffusion thermique ( $L_T$ ) donnée par la relation E-7. La Figure I.6 présente les variations de la longueur de diffusion thermique en fonction du temps pour les différents dissipateurs. On constate qu'elle est supérieure pour le DC60 en comparaison aux dissipateurs CuW (100 à 300% fois). En effet, la longueur de la diffusion thermique du DC60 augmente avec la durée de l'impulsion, ce qui montre que le DC60 améliore de manière significative l'évacuation de la chaleur en régime permanent.

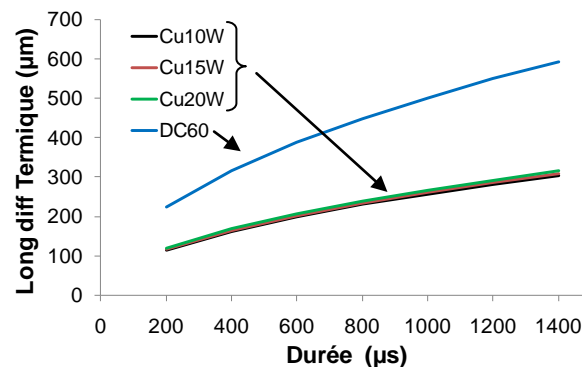


Figure I.6 - Longueur de diffusion thermique en fonction de la durée de fonctionnement pour différents matériaux constitutifs du dissipateur

### III.2.b.2. Réponse en régime QCW

L'étude de la réponse à un train d'impulsions en courant est cruciale pour la conception des DLPs destinées à un fonctionnement en régime QCW à 100W optique avec un rendement de conversion électro-optique de 50%. La durée des impulsions est de 200µs avec une fréquence de répétition égale à 100Hz. Cette condition correspond à l'application finale de la configuration simulée qui se focalise sur le pompage optique à 808nm du Nd:YAG.

La géométrie de la source de chaleur dans le modèle est identique à celle décrite précédemment (parallélépipède de 5µm d'épaisseur). Cependant, elle dissipe un flux de chaleur volumique en QCW (100Hz/200µs) de 167kW/cm<sup>3</sup> crête à crête, correspondant à une puissance thermique ( $P_{dss}$ ) de 100W pour un rendement électro-optique égale à 50% ; la base du composant étant maintenue à  $T_{case} = 25^{\circ}C$ . Les simulations, menées dans cette partie, vont permettre d'évaluer la température de jonction ( $T_j$ ) de la barrette en calculant, pour chaque impulsion électrique, les paramètres suivants :

- le maximum de  $T_j$  :  $T_{j\_max}$ ,
- le minimum de  $T_j$  :  $T_{j\_min}$ ,
- l'échauffement :  $\Delta T_{imp} = T_{j\_max} - T_{j\_min}$ ,
- la valeur moyenne de  $T_j$  pour une impulsion :  $T_{j\_moy}$ ,

- l'impédance thermique :  $Z_{th}$  qui est donnée par la formule E- 8.

$$Z_{th}(t) = \frac{T_j(t) - T_{case}}{P_{dss}(t)} \quad \text{E- 34}$$

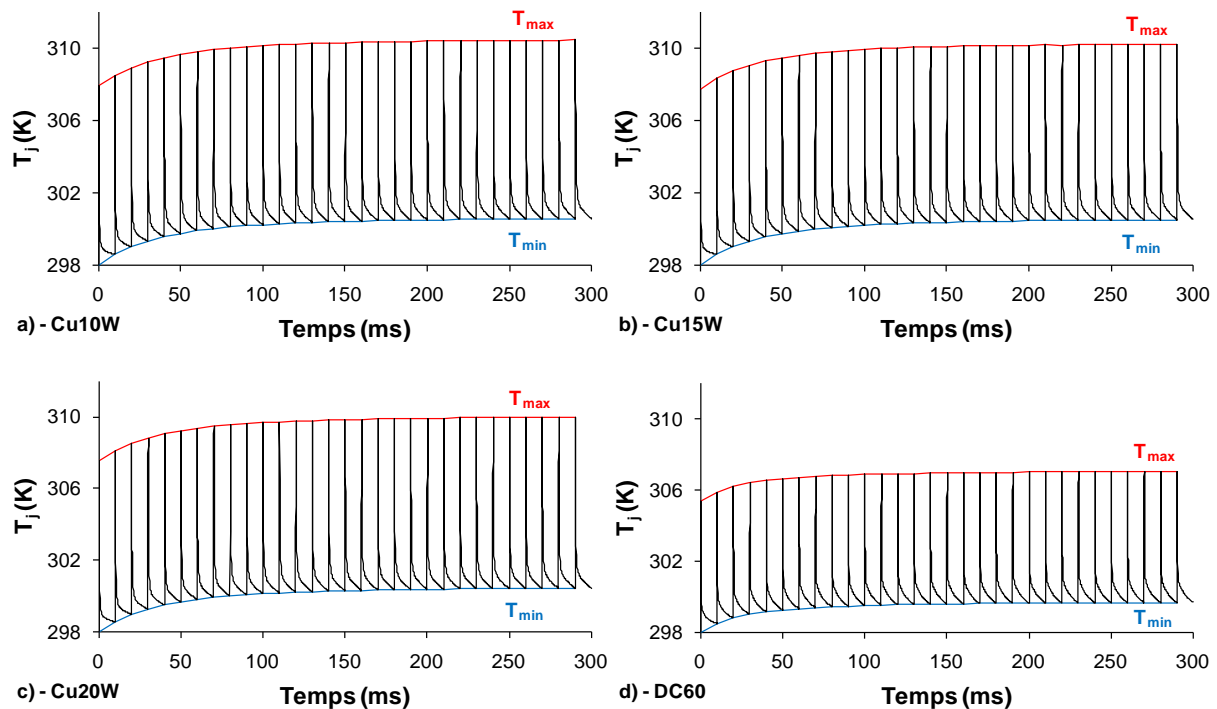
où,  $P_{dss}(t)$  est la puissance thermique dissipée en QCW : pour 100W à 100Hz/200µs, on a de 0 à 200µs,  $P_{dss} = 100W$  et pour 200µs à 10ms,  $P_{dss} = 0W$  ( $P_{dss}$  moyenne égale à 2W) et  $T_{case}$  la température de la base du composant qui est fixée à 25°C.

A travers le calcul des paramètres précédents, nous allons comparer l'impact des différents matériaux sur la température de jonction de la barrette. Notre étude se limitera à un composant mono-barrette QCW au pas optique de 800µm. Ce choix technologique a été retenu pour des raisons de profil de mission. Les dimensions de la barrette sont indiquées dans le Tableau I.2.

A l'issue d'une impulsion de 200µs, le composant n'atteint pas le régime permanent qui est effectif au bout de quelques centaines de millisecondes (voir Figure I.4). Pour les différents matériaux des dissipateurs, la Figure I.7 montre, pour chaque train d'impulsions, l'évolution en fonction du temps, de la température de jonction de la barrette à 10µm de la facette d'émission. On constate que :

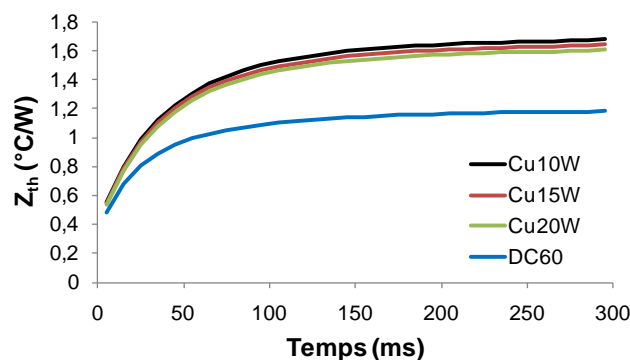
- l'équilibre thermique est atteint à partir de la 20<sup>ème</sup> impulsion,
- l'augmentation de  $T_j$  est nettement moins forte avec un dissipateur en DC60,
- l'augmentation de  $T_j$  dans le cas des dissipateurs en alliages CuW diminue lorsque la fraction du cuivre augmente ; par contre l'écart de  $T_j$  existant entre ces réponses est quasiment nul (1%).





**Figure I.7 - Comparaison des résultats de simulation de  $T_j$  pour un train d'impulsions (100A-100Hz/200 $\mu$ s) et pour différents matériaux constitutifs du dissipateur : a)  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ , b)  $\text{Cu}_{15}\text{W}_{85}$ , c)  $\text{Cu}_{20}\text{W}_{80}$  et d) DC60**

A partir des résultats présentés dans la Figure I.7, nous avons tracé (Figure I.8) l'impédance thermique du régime QCW (100Hz/200 $\mu$ s) en fonction du temps pour les différents types de matériaux du dissipateur. Là encore, le DC60 est le mieux adapté thermiquement aux composants QCW de très forte puissance (100W) puisque la résistance thermique ( $R_{th}$ ) peut être en dessous de 1°C/W.



**Figure I.8 - Résultats de simulation de l'impédance thermique du composant mono barrette QCW à 100Hz/200 $\mu$ s pour différents matériaux constitutifs du dissipateur (CuW et DC60)**

Le Tableau I.3 présente une synthèse des résultats de simulation thermique du composant mono-barrette QCW au pas optique de 800 $\mu$ m, fonctionnant à 100W optique en régime QCW (100Hz/200 $\mu$ s) pour un rendement de conversion électro-optique de 50%. Dans ce tableau, la variation des paramètres thermiques est calculée pour chaque dissipateur en prenant le dissipateur  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  comme référence. Ainsi nous constatons que l'échauffement  $\Delta T$  induit dans la barrette pendant

l'impulsion est quasi-constant pour les dissipateurs à base de CuW ( $\Delta T_{imp} \sim 9,9$  à  $9,5^\circ\text{C}$ ) alors qu'il est relativement faible ( $7,4^\circ\text{C}$ ) dans le cas du dissipateur à base de DC60.

Paramètre	Cu <sub>10</sub> W <sub>90</sub>	Cu <sub>15</sub> W <sub>85</sub>	Cu <sub>20</sub> W <sub>80</sub>	DC60
T <sub>max</sub> (K)	310,5	310,2 (-0,08%)	310,0 (-0,16%)	307,1(-1,10%)
T <sub>min</sub> (K)	300,6	300,5 (-0,02%)	300,4 (-0,04%)	299,7 (-0,29%)
$\Delta T_{imp}$ (K)	9,9	9,7 (-1,79%)	9,5 (-3,78%)	7,4 (-25,61%)
T <sub>moy</sub> (K)	301,3	301,3 (-0,02%)	301,2 (-0,05%)	300,4 (-0,33%)
R <sub>th</sub> ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ )	1,67	1,63 (-2,25%)	1,60 (-4,30%)	1,18 (-29,34%)

**Tableau I.3 - Synthèse des paramètres thermiques du composant mono-barrette QCW dissipant une puissance thermique crête de 100W pour 100Hz/200 $\mu\text{s}$  à 25 $^\circ\text{C}$  pour les différents types de dissipateur**

### III.3. Synthèse des simulations thermiques

La température de jonction des barrettes de DLPs, calculée à partir des simulations thermiques par éléments finis, a clairement montré que le matériau et l'épaisseur des dissipateurs jouent un rôle prépondérant dans l'évacuation de la chaleur. Les principaux résultats mis en lumière sont les suivants :

- Le DC60 montre une faible résistance thermique ( $R_{th,j-c}$ ) comparée aux alliages CuW.
- Lorsque le pas optique augmente (corrélativement à l'épaisseur du dissipateur), la température de jonction diminue pour un fonctionnement en régime permanent (de l'ordre de la ms). En revanche, pour des courtes durées de fonctionnement ( $< 1\text{ms}$ ) l'influence de l'épaisseur des dissipateurs est négligeable.

Par ailleurs l'échauffement généré par une impulsion ( $\Delta T_{imp}$ ) est faible pour le DC60 et supérieur de 25% pour les alliages CuW.

## IV. Simulation mécanique de l'assemblage des composants QCW

Le packaging des barrettes QCW impose d'assembler des matériaux hétérogènes (barrette SC, brasures, céramique, embase en cuivre...). Ces matériaux présentent des propriétés mécaniques très variées, en particulier quant-à leurs coefficients de dilatation thermique (Cf annexe A). Que ce soit pendant la fabrication des assemblages, ou pendant leur utilisation finale, toute variation de température provoquera, du fait de ces différences de coefficients de dilatation thermique, l'apparition de contraintes mécaniques dans la barrette et au sein même de ces matériaux. Ces contraintes peuvent entraîner la destruction d'un des éléments dans des cas extrêmes et contribuer à fortement réduire la durée de vie du composant en conditions opérationnelles.

## IV.1. Rappels théoriques

Dans cette partie, nous allons introduire les notions importantes de la mécanique des solides permettant de mettre en lumière les principales grandeurs qui seront analysées par la suite.

- Tenseur des contraintes

Le tenseur des contraintes est un moyen de décrire les forces à l'intérieur d'un milieu continu soumis à un état de changement à sa frontière. La notion de contrainte est une approche purement mathématique qui ne peut pas se déterminer expérimentalement ; la seule entité mesurable restant la déformation. Dans le cas d'une force appliquée sur une surface réelle ou imaginaire (A) de normale  $\vec{n}$  à l'intérieur d'un solide, le vecteur contrainte peut être défini par E- 9.

$$\vec{\sigma} = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{A} \quad \text{E- 35}$$

La contrainte est exprimée en Pascal (Pa) et ces composantes sont données par E- 10.

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} \left. \begin{array}{l} \vphantom{\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix}} \\ \vphantom{\begin{pmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Contrainte normale} \\ \text{Contrainte de cisaillement} \end{array} \quad \text{E- 36}$$

- La déformation

La déformation correspond au rapport de l'élongation du paramètre de maille contraint sur le paramètre de maille relaxé, il est donné par E- 11.

$$\varepsilon = \frac{a - a_0}{a_0} \quad \text{E- 37}$$

où,  $a$  est le paramètre de maille du matériau contraint et  $a_0$  le paramètre de maille relaxé.

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} \left. \begin{array}{l} \vphantom{\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}} \\ \vphantom{\begin{pmatrix} \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Déformation normale} \\ \text{Déformation de cisaillement} \end{array} \quad \text{E- 38}$$

où,  $\varepsilon_{ii}$  traduit l'élongation unitaire dans la direction  $i$ ,  $2\varepsilon_{ij}$  donne la variation angulaire entre deux vecteurs initialement orthogonaux  $i$  et  $j$  et traduit une contrainte de cisaillement.

Dans l'approximation linéaire de l'élasticité, la relation entre les tenseurs de contrainte et de déformation est décrite par un tenseur du 4<sup>ème</sup> ordre noté  $C$  tel que :  $\sigma = C\varepsilon$ . Cette équation définit une loi de comportement traduisant la réponse linéaire d'un matériau sous contraintes mécaniques.

- Module de Young

Le module de Young ( $E$ ) peut être défini comme la constante de proportionnalité entre contrainte et déformation longitudinale. Dans le cas d'une tension axiale :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{E- 39}$$

Pour un matériau isotrope de symétrie cubique (cas de GaAs), les relations de symétrie permettant de réduire le tenseur élastique à 3 éléments indépendants, en notation matricielle on aboutit à la relation exprimée en E- 14.

$$\sigma = C\varepsilon \quad \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{E- 40}$$

Le tenseur des déformations s'écrit sous la forme E- 15.

$$\varepsilon = S\sigma \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{E- 41}$$

- Coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson est défini comme le rapport entre les déplacements longitudinaux du matériau pour une contrainte uni-axiale :

$$\gamma = -\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yy}} \quad \text{E- 42}$$

## IV.2. Impact du type de matériau des dissipateurs

Les matériaux utilisés pour l'assemblage des barrettes de la DLP possèdent des caractéristiques physico-chimiques très différentes. Les paramètres physiques, en particulier le coefficient de dilatation thermique (CTE), sont par conséquent eux aussi différents. L'association des différents éléments et leur différence de comportement en fonction de la température peut induire des zones critiques dans la barrette puisque les contraintes mécaniques induites ne sont pas homogènes le long de la barrette.

Matériau	CTE ( $10^{-6}/K$ )	$E$ (GPa)	Coef. Poisson	$T_{cond}$ ( $^{\circ}C$ )	Réf.
GaAs	6,5	85,3	0,29		[7]
Cu <sub>10</sub> W <sub>90</sub>	6,5	330	0,29	25	[Erreur ! Signet non défini.]
Cu <sub>15</sub> W <sub>85</sub>	7,2	310	0,29	25	[Erreur ! Signet non défini.]
Cu <sub>20</sub> W <sub>80</sub>	8,3	280	0,29		[Erreur ! Signet non défini.]
DC60	6	410	0,15		[Erreur ! Signet non défini.]

Tableau I.4 - Propriétés mécaniques des dissipateurs

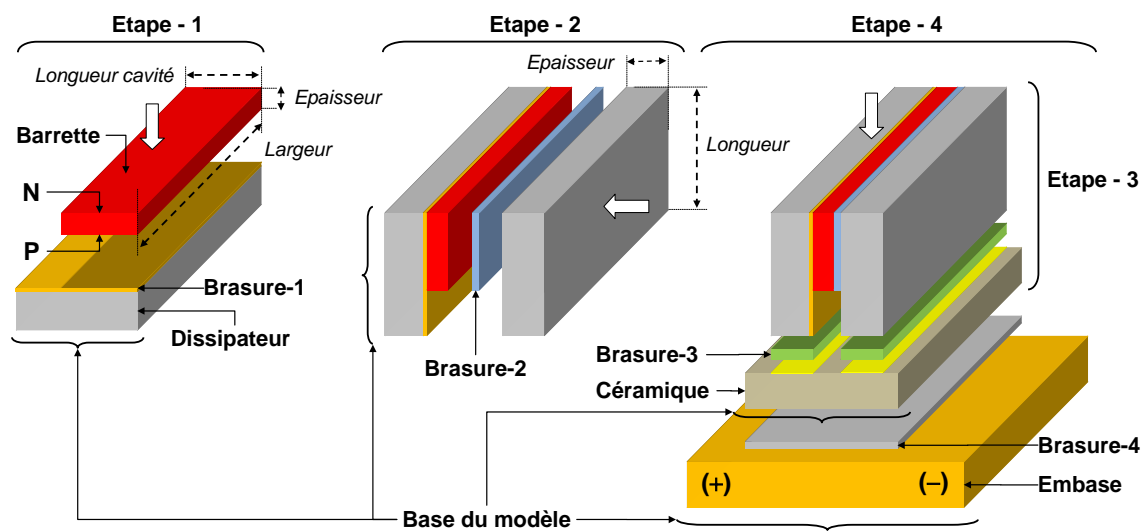
Dans l'étude bibliographique (chapitre 2), il a été démontré que la différence des CTE de plusieurs matériaux est à l'origine des contraintes mécaniques résiduelles induites par le processus d'assemblage des barrettes de DLPs. L'optimisation de l'assemblage passe donc par une comparaison des différents CTE. L'annexe A liste la valeur des CTE des différents matériaux entrant dans la composition des différentes DLP considérées dans cette étude. La complexité du report des composants QCW réside dans les différentes étapes de brasage utilisées qui ne sont pas totalement optimisées à l'heure actuelle.

#### IV.2.a. Description du modèle

Pour les simulations thermomécaniques, un modèle en 3D a été privilégié. L'évolution des contraintes mécaniques résiduelles dans un modèle 3D permet d'évaluer le champ des contraintes dans les 3 directions de l'espace. Ainsi, nous allons traiter les différentes étapes de réalisation d'un composant mono-barrette QCW, que nous avons présenté dans le chapitre I et rappelé dans la Figure I.9, pour différents types de matériau dissipateur. Cependant, la principale difficulté de ces simulations

réside dans l'optimisation du maillage, qui doit accorder les petites épaisseurs avec les grandes largeurs.

En effet, la simulation thermomécanique par élément finis permet d'étudier les conditions d'apparition d'une contrainte lors du refroidissement des brasures jusqu'à la température ambiante de 25°C. Pour ces simulations, nous avons utilisé une barrette de DLP entièrement en GaAs d'une largeur d'1cm, d'une épaisseur de 130µm et d'une longueur de cavité de 900µm (Figure I.9). La longueur du dissipateur a été fixée à 2mm. Les caractéristiques dimensionnelles du modèle 3D sont listées dans le Tableau I.5



L'objectif principal de ces simulations est d'évaluer l'amplitude des contraintes mécaniques résiduelles après refroidissement pour les différentes étapes de la réalisation du composant mono-barrette QCW :

- a - report de la barrette (coté "P") sur le dissipateur : étape SEB,
- b - report du second dissipateur sur le coté "N" de la barrette dans le SEB : barrette "sandwichée",
- c - report de la barrette sandwichée sur céramique,
- d - report du des barrettes "sandwichée" sur l'embase.

La simulation appliquée au procédé d'assemblage du composant mono barrette QCW, étudie l'apparition de contraintes consécutives au refroidissement des brasures. L'empilement reproduit le procédé de report décrit dans le chapitre I et les contraintes mécaniques simulées à analyser seront les suivantes :

- $\sigma_z$  : représente la contrainte hydrostatique le long du centre de la barrette à 10 $\mu$ m de la face émissive,
- $\sigma_x$  : représente la contrainte hydrostatique le long de la cavité au centre de la barrette.

$$\sigma_z = \sigma_x = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad \text{E- 43}$$

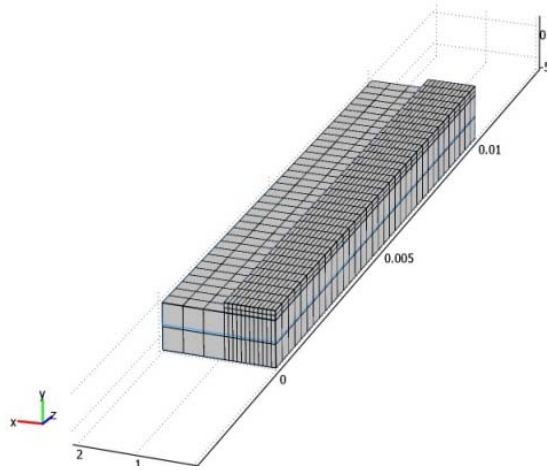
où  $\sigma_{ii}$  correspondent aux contraintes normales.

Dans la partie suivante, nous allons évaluer, pour chaque étape, les contraintes mécaniques résiduelles  $\sigma_z$  et  $\sigma_x$ .

## **IV.2.b. Résultats de simulation**

### **IV.2.b.1. Etape SEB**

Dans cette étape, le coté "P" de la barrette est reportée sur différents types de dissipateur avec une brasure AuSn ( $T_{\text{fus}} = 280^\circ\text{C}$ ) d'une épaisseur de 5 $\mu$ m. Rappelons que le pas optique d'un composant multi-barrette (Stack) est fixé par l'épaisseur du dissipateur. Le maillage 3D de la structure modélisée est présenté dans la Figure I.10.

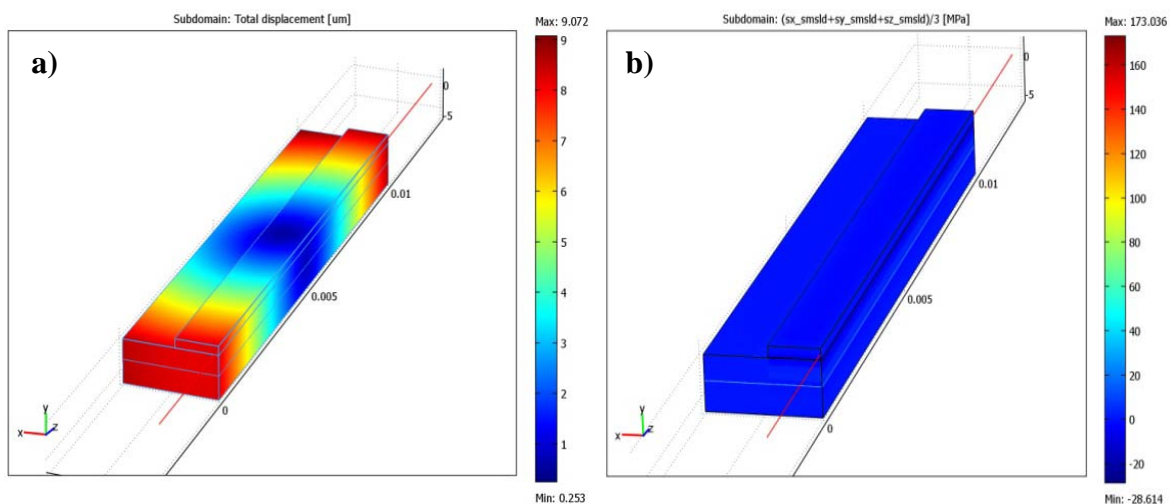


Nombre d'éléments : 2730

Nombre de nœuds : 3600

**Figure I.10 - Maillage du modèle 3D utilisée pour simuler le processus de report de la barrette sur son embase**

A titre d'exemple, les Figures I.1-a et -b présentent respectivement la cartographie des déplacements suivant les axes x, y et z et la cartographie des contraintes mécaniques hydrostatiques de la structure (étape SEB) modélisée en 3D avec dissipateur en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  au pas optique de  $800\mu\text{m}$ .



**Figure I.11 - Cartographies des déplacements suivant les axes x, y et z (a) et des contraintes mécaniques hydrostatiques résiduelles (b) après la simulation du processus de report de la barrette sur son dissipateur (dissipateur en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  et pas optique de  $800\mu\text{m}$ )**

Les contraintes mécaniques ont été calculées en fonction de l'épaisseur du dissipateur (Figure I.12). Pour un dissipateur en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  (étape 1 de la Figure I.9), les résultats de simulations montrent que les contraintes mécaniques résiduelles dans la barrette sont en compression ( $<0$ ). L'amplitude des contraintes diminue lorsque l'épaisseur du dissipateur croît (Figure I.12). En revanche, quand la fraction du cuivre augmente dans les substrats de type CuW ( $\text{Cu}_{15}\text{W}_{85}$  et  $\text{Cu}_{20}\text{W}_{80}$ ), la contrainte mécanique résiduelle croît avec l'épaisseur du dissipateur. Dans le cas d'un dissipateur en DC60, la contrainte mécanique résiduelle est en tension ( $>0$ ) et croît en augmentant l'épaisseur du dissipateur.



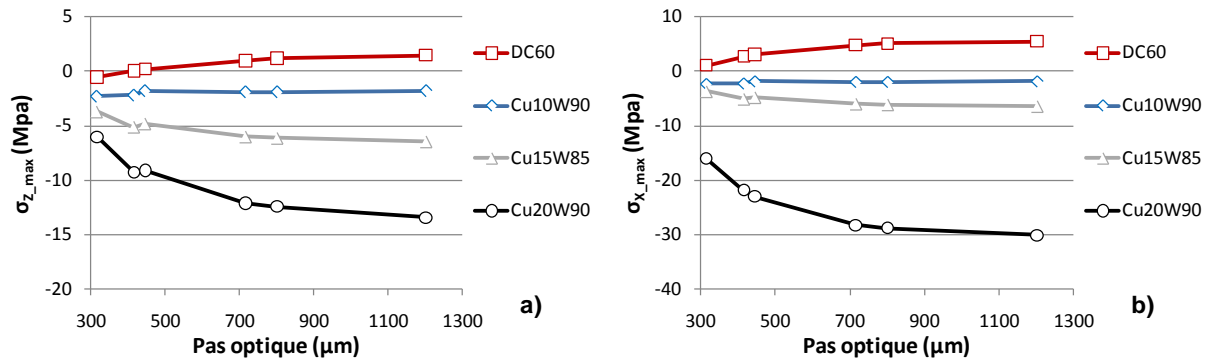


Figure I.12 - Contraintes mécaniques résiduelles maximales dans la barrette après l'étape SEB pour différents pas optiques du composant : a) le long de la cavité ( $\sigma_x$ ) et b) le long de la barrette ( $\sigma_z$ )

#### IV.2.b.2. Impact de l'étape barrette "sandwichée"

Dans cette étape, le coté "N" de la barrette dans le SEB est reporté par brasure avec une préforme SnAg ( $T_{fus} = 220^\circ\text{C}$ ) sur un dissipateur identique à celui du coté "P". Le maillage 3D de la structure modélisée est présenté en Figure I.13.

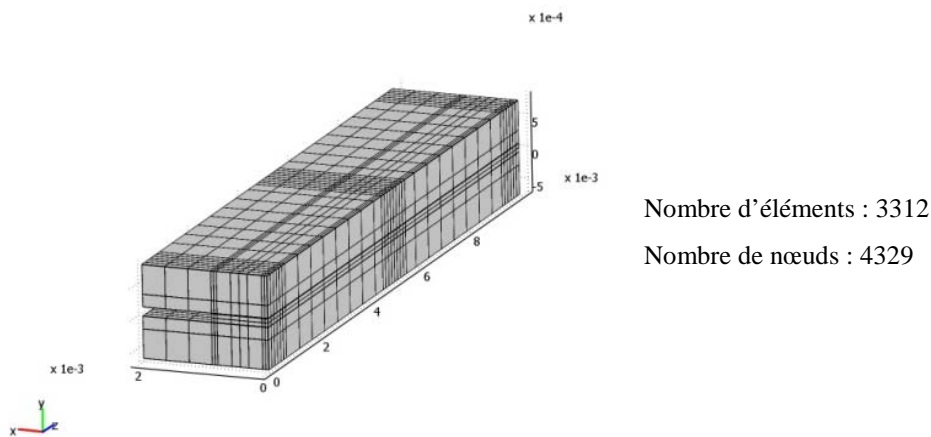
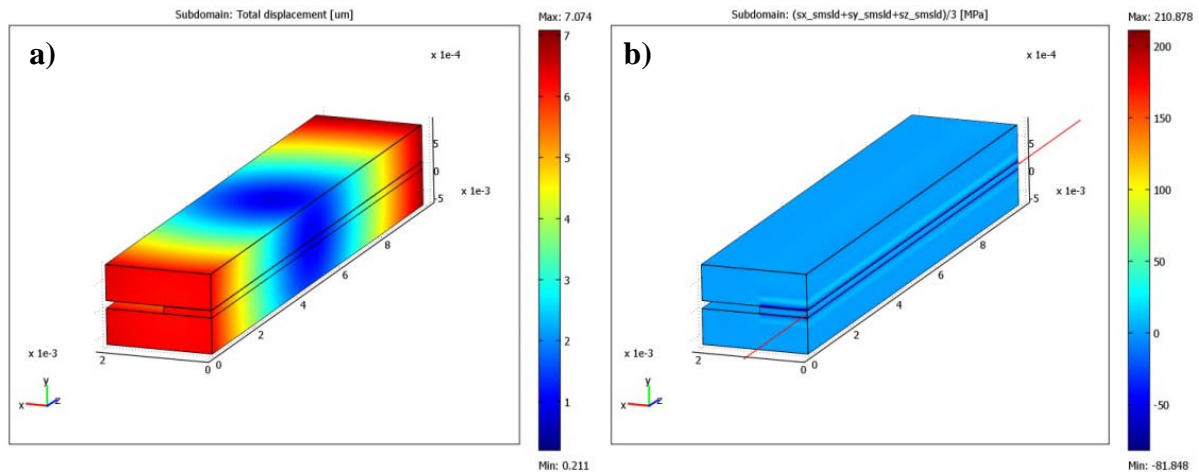


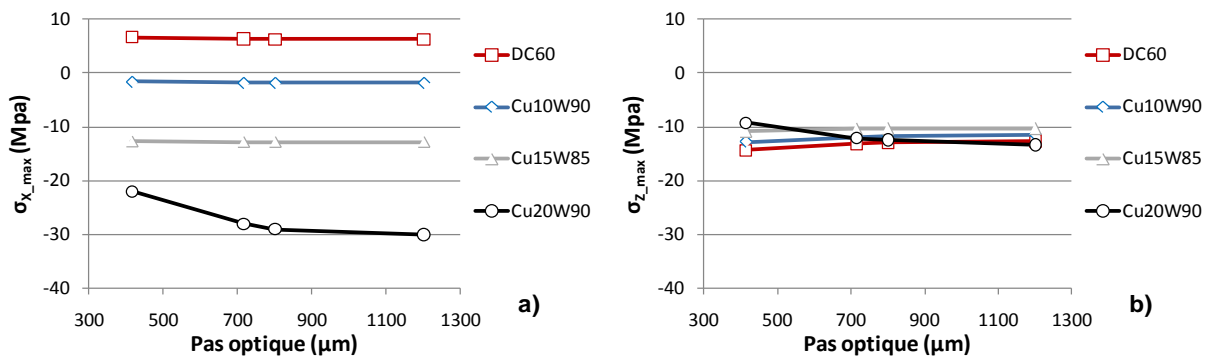
Figure I.13 - Maillage du modèle 3D utilisé pour simuler le processus d'assemblage de la barrette sandwichée

A titre d'exemple, les Figures I.14-a et -b présentent respectivement la cartographie des déplacements suivant les axes x, y et z et la cartographie des contraintes mécaniques hydrostatiques de la structure (étape barrette sandwichée) modélisée en 3 dimensions avec dissipateur en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  au pas optique de  $800\mu\text{m}$ .



**Figure I.14 - Cartographies des déplacements suivant les axes x, y et z (a) et des contraintes mécaniques hydrostatiques résiduelles (b) après la simulation du processus d'assemblage de la barrette sandwichée (dissipateurs en  $Cu_{10}W_{90}$ , pas optique de  $800\mu m$ )**

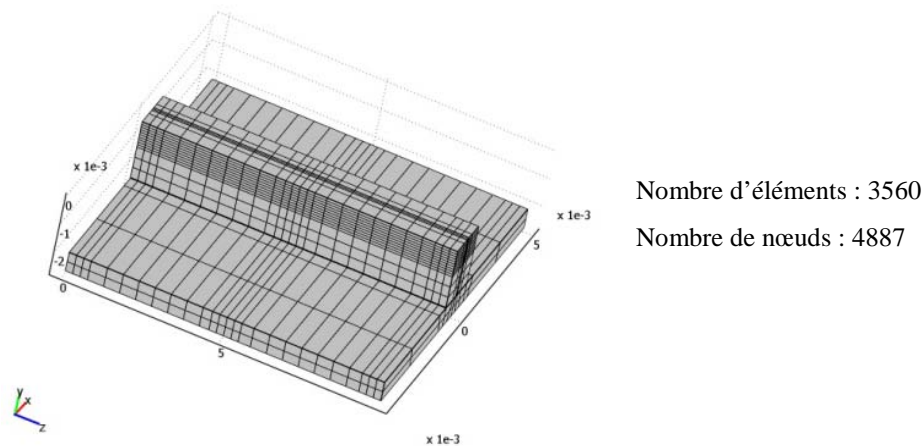
De la même manière que le tableau III.5, la Figure I.15 illustre les résultats de simulation pour différents types de matériau et dimensions du dissipateur associé. Globalement, les contraintes mécaniques résiduelles ont augmenté suivant l'axe z par rapport à l'étape précédente et l'épaisseur des dissipateurs ne joue pas un rôle significatif dans cette étape de montage.



**Figure I.15 - Contraintes mécaniques résiduelles maximales suivant les axes x (a) et z (b) après l'étape "sandwichée" pour différentes épaisseurs et types de matériau des dissipateurs**

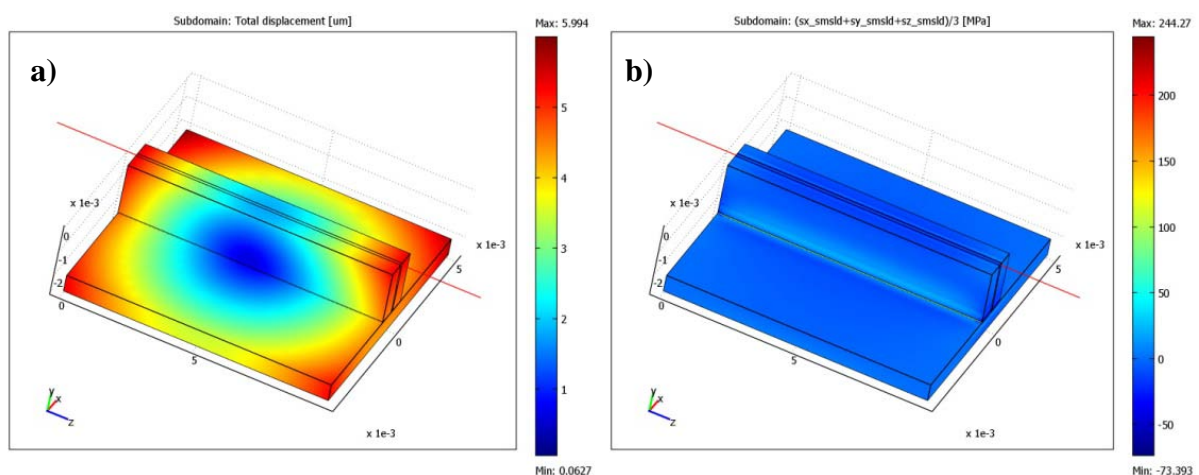
### IV.2.b.3. Impact du report sur céramique

Cette partie aborde l'étape du report perpendiculaire de la barrette "sandwichée" sur l'isolant électrique en Nitrure d'Aluminium (AlN). Les brasures utilisées sont des préformes SnPbAg d'une épaisseur de  $50\mu m$ . Le maillage 3D de la structure modélisée est présenté en Figure I.16.



**Figure I.16 - Maillage du modèle 3D utilisé pour simuler le processus de report de la barrette sandwichée sur la céramique**

A titre d'exemple, les Figures I.17-a et -b présentent respectivement la cartographie des déplacements suivant les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  et la cartographie des contraintes mécaniques hydrostatique de la structure (barrette sandwichée sur céramique) modélisée en 3 dimensions avec dissipateur en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  au pas optique de  $800\mu\text{m}$ .



**Figure I.17 - Cartographies des déplacements suivant les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  (a) et des contraintes mécaniques hydrostatiques résiduelles (b) après la simulation du processus du report de la barrette sandwichée sur l'isolant électrique en  $\text{AlN}$  (dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  et pas optique de  $800\mu\text{m}$ )**

- Estimation des contraintes mécaniques résiduelles le long de la cavité

Les variations de contraintes mécaniques résiduelles le long de la cavité sont présentées en Figure I.18 pour les trois types de dissipateur et pour les trois pas optiques correspondants. La contrainte mécanique résiduelle au niveau de la face d'émission est plus importante que celle calculée au niveau de la face arrière de la barrette. Cependant, le long de la cavité d'un composant avec des dissipateurs en  $\text{Cu}_{20}\text{W}_{80}$ , les contraintes mécaniques résiduelles dans la barrette sont en compression ( $<0$ ). Par conséquent, on observe que le gradient des contraintes mécaniques résiduelles croit très

rapidement lorsque le pas optique (épaisseur du dissipateur) augmente (voir Figure I.18-d) et ceci quelque soit le type de matériau utilisé.

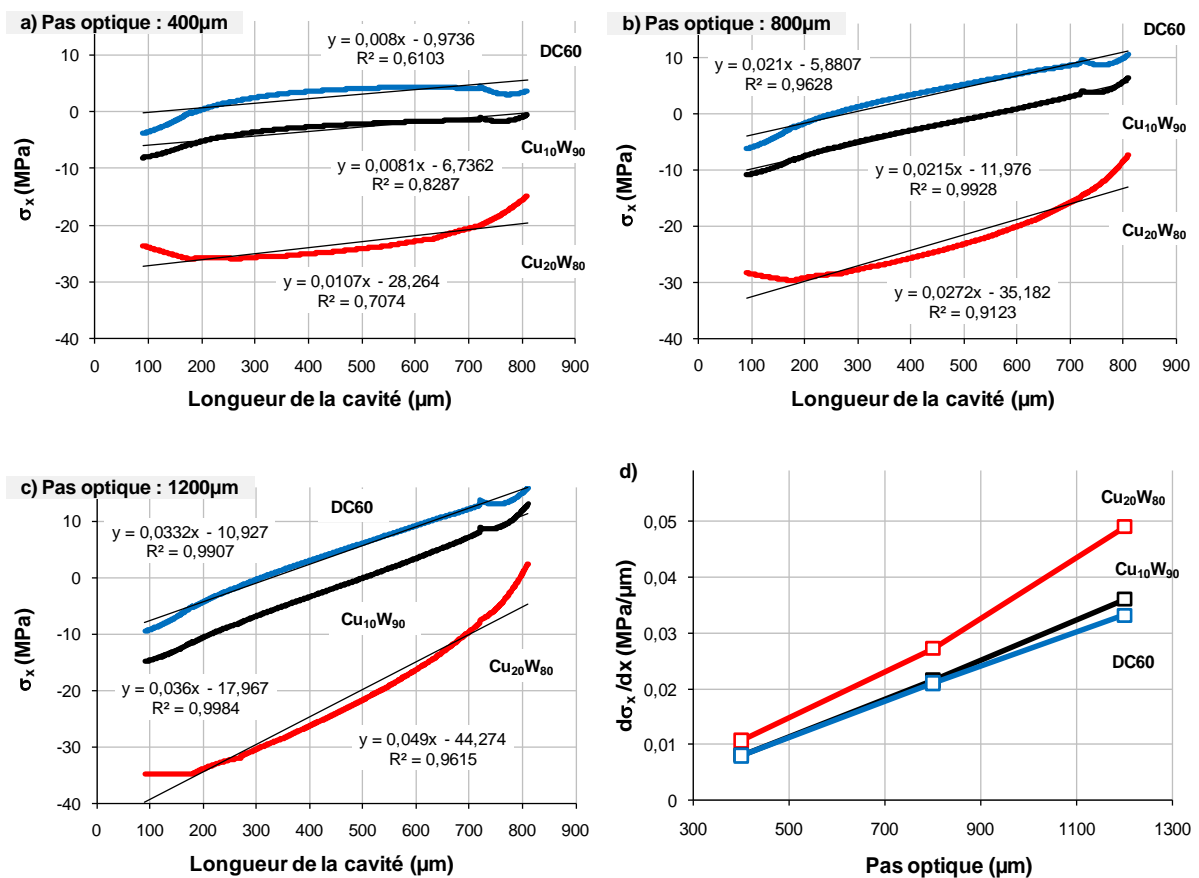


Figure I.18 - Distribution des contraintes mécaniques hydrostatiques le long de la cavité au centre de la barrette pour des pas optiques de 400 (a), 800 (b) et 1200µm (c)

- Estimation des contraintes mécaniques résiduelles le long de la barrette à 10µm de la face émissive

La comparaison de la distribution des contraintes mécaniques résiduelles le long de la barrette ( $\sigma_z$ ) est présentée dans la Figure I.19.

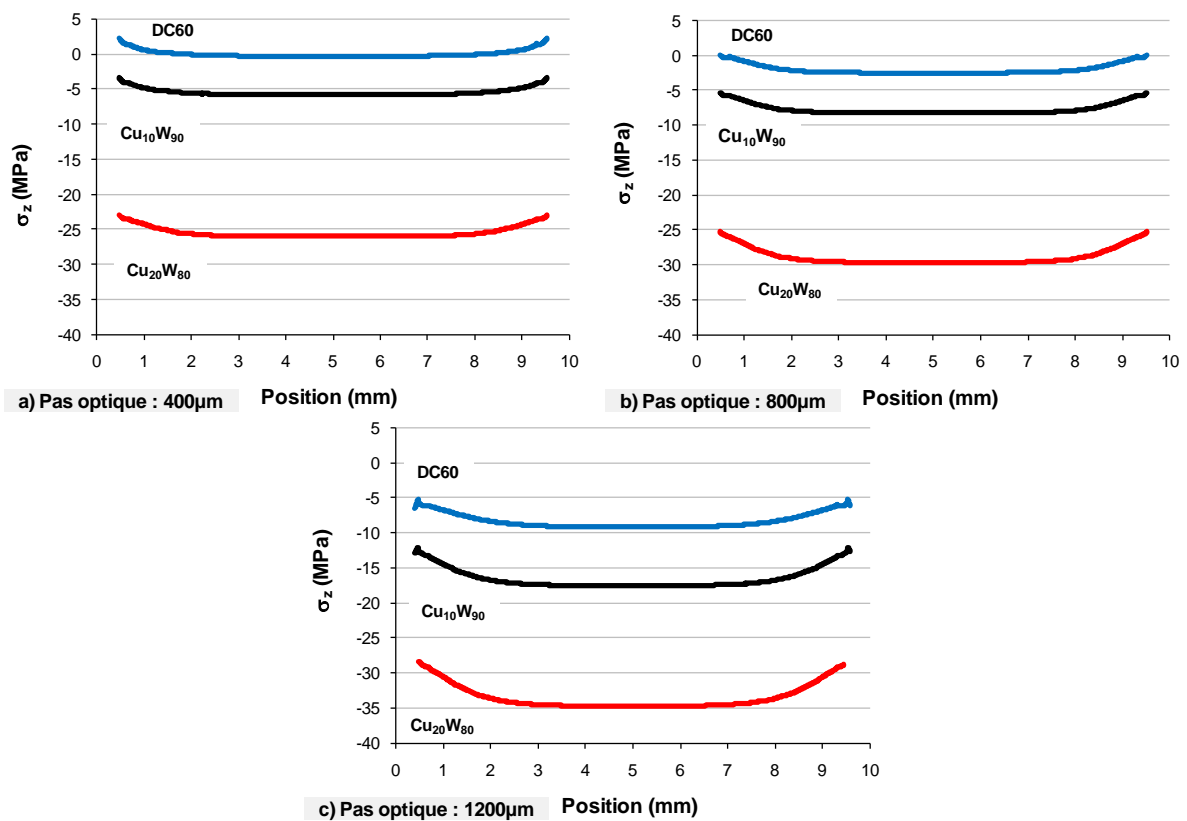


Figure I.19 - Distribution des contraintes mécaniques hydrostatiques le long de la barrette à 10µm de la face émissive pour des pas optiques de 400 (a), 800 (b) et 1200µm (c)

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus précédemment. En effet, la majorité des contraintes induites, par le  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  et le  $\text{Cu}_{20}\text{W}_{80}$ , sont en compression et leurs amplitudes augmentent avec l'épaisseur du dissipateur.

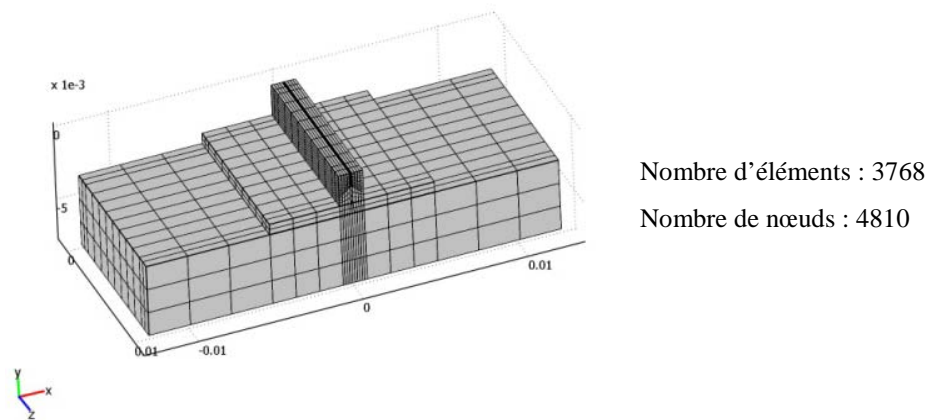
#### IV.2.b.4. Etape Stack mono-barrette

Dans cette dernière étape (Figure I.9), les étapes de brasage de l'empilement suivant ont été simulées dans la même phase :

- barrette "sandwichée" sur céramique,
- céramique sur embase.

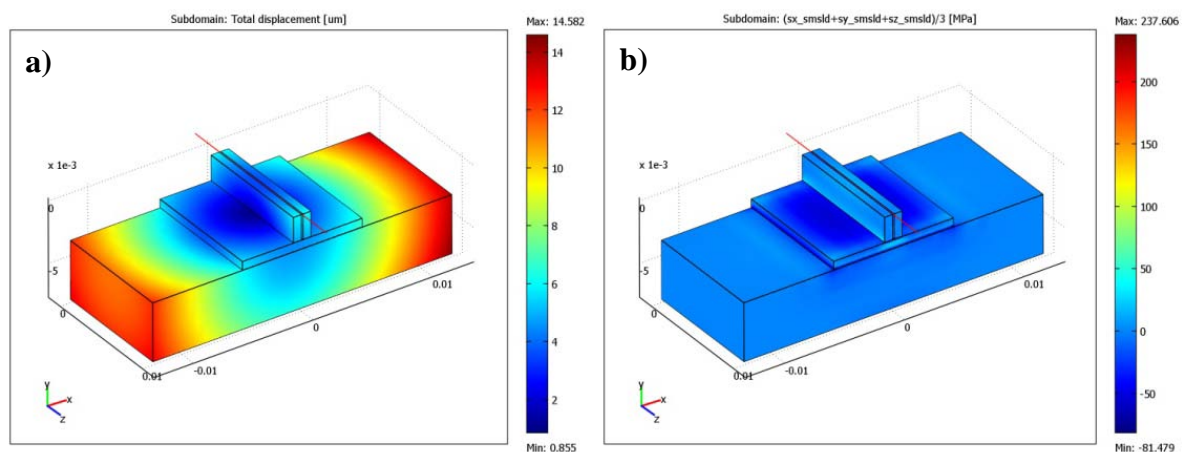
En effet, nous avons constaté dans l'étape précédente (report de la barrette sandwichée sur céramique) que les contraintes mécaniques résiduelles augmentent avec l'épaisseur des dissipateurs. Ces résultats doivent être mis en comparaison avec ceux de la simulation de l'empilement "barrette

sandwichée/céramique/embase" pour un composant mono-barrette QCW au pas optique de  $800\mu\text{m}$ . Le maillage 3D de la structure modélisée est présenté en Figure I.20.



**Figure I.20 - Maillage utilisé pour simuler le processus d'assemblage des composants mono-barrette QCW**

Les brasures utilisées correspondent à des préformes de type SnPbAg ( $T_{\text{fus}} = 176^\circ\text{C}$ ). Pour des raisons technologiques, notre analyse se limitera à la comparaison de l'influence de l'embase sur la barrette en simulant les deux matériaux suivants : Cuivre et  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ . La Figure I.21 illustre les cartographies des déplacements ( $x, y, z$ ) et des contraintes mécaniques hydrostatiques ( $\sigma_z$ ) après la simulation du processus d'assemblage d'un composant mono-barrette QCW au pas optique de  $800\mu\text{m}$  avec des dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ , et l'embase en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ .



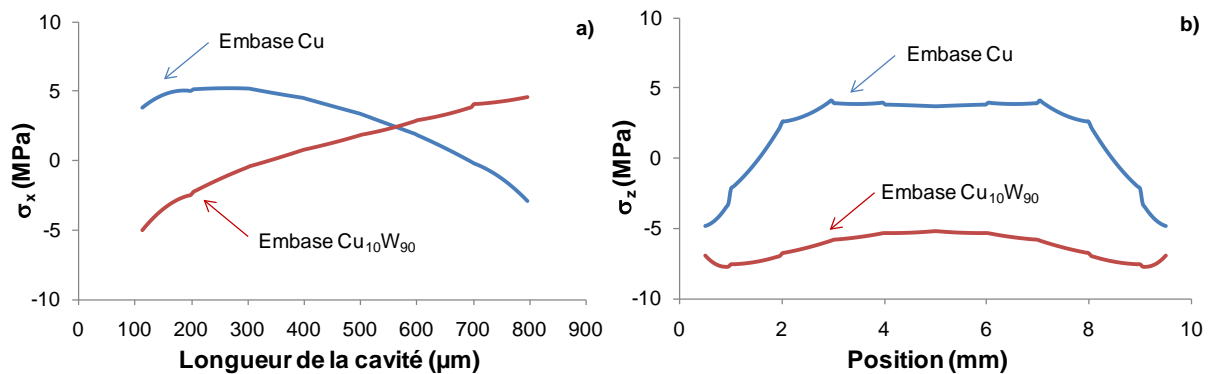
**Figure I.21 - Cartographies des déplacements suivant les axes  $x, y$  et  $z$  (a) et des contraintes mécaniques hydrostatiques résiduelles (b) après la simulation du processus d'assemblage du composant mono-barrette QCW (dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ , pas optique de  $800\mu\text{m}$  et embase en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ )**

Pour les deux types d'embase, nous avons représenté respectivement sur les Figures I.22-a et -b la distribution des contraintes mécaniques au centre de la barrette le long de la cavité ( $\sigma_x$ ) et le long de la barrette à  $10\mu\text{m}$  de la face émissive ( $\sigma_z$ ). les résultats sont les suivants :

- le long de la cavité : la face émissive est contrainte en tension pour une embase en cuivre et inversement, la contrainte est en compression pour une embase en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ ,

- le long de la barrette : on obtient une contrainte en tension quasi-uniforme pour l'embase en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ . Par contre, l'embase en cuivre induit au centre de la barrette des contraintes en compression et des contraintes en tension dans les extrémités de la barrette.

Dans ces deux cas, l'intensité des contraintes mécaniques calculées est inférieure à 5MPa en tension ou en compression. Ceci montre que les contraintes mécaniques induites par le procédé d'assemblage QCW sont très faibles (comprises ente -5 et 5MPa).



**Figure I.22 - Répartition des contraintes mécaniques résiduelles dans le composant mono-barrette QCW pour des embases en Cu et  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  : a) le long de la cavité et b) le long de la barrette**

Les Figures I.23-a, -b et -c présentent, à titre d'illustration, la cartographie des trois composantes diagonales du tenseur des contraintes normales :  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  (E- 10). Ces cartographies montrent clairement que la zone critique de l'assemblage QCW peut être située au niveau de l'interface céramique/dissipateurs, représentée par la composante  $\sigma_{yy}$  (Figure I.23-b). Cette dernière présente une forte contrainte mécanique en tension pouvant générer des délaminations des couches de métallisation au niveau des dissipateurs.



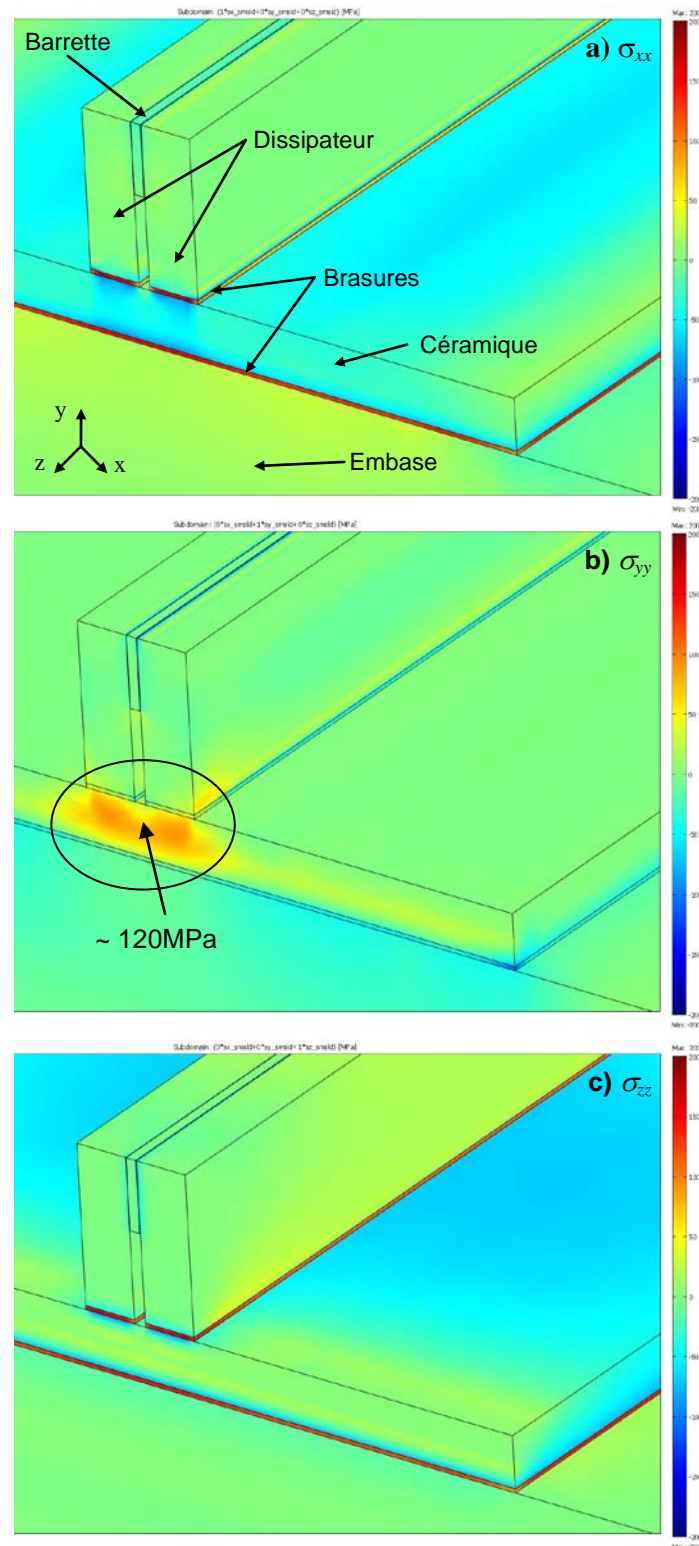


Figure I.23 - Cartographies des trois composantes de la contrainte mécanique résiduelle dans le composant mono-barrette QCW :  $\sigma_{xx}$  (a),  $\sigma_{yy}$  (b) et  $\sigma_{zz}$  (c)

### IV.3. Synthèse

Les résultats de simulation thermomécanique des étapes d'assemblage du composant mono-barrette QCW, en variant la composition des dissipateurs de la barrette ( $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ ,  $\text{Cu}_{20}\text{W}_{80}$  et DC60),



ont montré que les contraintes mécaniques induites dans la barrette sont très faibles notamment pour le  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  et le DC60.

Les différents matériaux considérés pour cette analyse ont conduit à proposer un compromis entre les propriétés thermiques et mécaniques des dissipateurs pour réaliser des composants QCW à haute fiabilité.

Etant donné que le coefficient de dilatation du dissipateur en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  est proche du GaAs, il est faiblement responsable des contraintes résiduelles générées. Dans l'étape SEB, l'épaisseur des dissipateurs  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  (de 250 à 1050 $\mu\text{m}$ ) induit de faibles contraintes mécaniques homogènes le long de la barrette et n'excédant pas ~2MPa en compression. Alors que le DC60 induit des contraintes mécaniques en tension allant de 0 à 5MPa pour des épaisseurs allant de 250 à 1050 $\mu\text{m}$ . En revanche, la résistance thermique simulée, lorsque les dissipateurs sont en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  est supérieure de 30% lorsque les dissipateurs sont en DC60.

Cependant la configuration finale du composant QCW avec des dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  montre qu'au niveau de la face émissive :

- pour une embase en Cu : les contraintes mécaniques résiduelles sont en tension au centre de la barrette (avec un maximum de l'ordre de 5MPa) et en compression aux extrémités de la barrette (atteignant un maximum de -5MPa),
- pour une embase en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  : les contraintes mécaniques résiduelles sont en compression avec un maximum aux extrémités de la barrette de l'ordre de -6MPa.

## V. Evaluation et validation expérimentale des contraintes mécaniques

### V.1. Techniques de mesure des contraintes

Les techniques de mesure des déformations mécaniques résiduelles se scindent, de manière générale, en trois types : les méthodes mécaniques, physiques et utilisant le principe de diffraction X [8].

- Les méthodes mécaniques nécessite d'ôter de la matière au composant par découpage ou par forage. Le relâchement qui en résulte est mesuré, généralement par des jauges de déformation de surface et la tension résiduelle de départ est alors calculée. Ces méthodes sont complètement ou partiellement destructrices et comprennent la perforation (progressive et profonde), la trépanation, le sectionnement et l'entaillage ;
- Les méthodes physiques sont généralement non-destructives et comprennent les méthodes acoustiques, magnétiques et optiques ;
- Les méthodes utilisant le principe de la diffraction comprennent les méthodes traditionnelles de rétrodiffusion des rayons X, les neutrons et les rayons X obtenus par synchrotrons. Ces

méthodes sont applicables à des matériaux polycristallins. Elles mesurent les changements de dimensions du réseau qui résultent des contraintes appliquées ou résiduelles en fonction de leur emplacement et de leur direction.

Les calculs nécessaires pour la méthode mécanique de suppression de matière peuvent être difficiles ou hasardeux lorsque l'échantillon possède une forme complexe. Cependant les méthodes mécaniques sont largement utilisées et tout à fait appropriées à de nombreuses applications. Les méthodes ultrasonores et électromagnétiques sont utiles quand il s'agit d'identifier rapidement des problèmes d'homogénéité, des défauts et des points de tension élevée mais elles sont moins efficaces quand il s'agit de dresser une cartographie quantitative des déformations directionnelles. Les méthodes traditionnelles attachées aux rayons X sont utiles pour la mesure de contraintes localisées en surface mais nécessitant des équipements de caractérisation lourds à mettre en œuvre [8].

La partie suivante reprend l'analyse expérimentale des contraintes mécaniques résiduelles au niveau de la face émissive des barrettes de DLP assemblées en utilisant une méthode physiques : la technique de photoluminescence polarisée. L'étude de la contrainte mécanique est réalisée pour les composants mono-barrette QCW (analysés par la simulation par éléments finis) et CW décrits à la fois dans le chapitre I et analysés dans le chapitre II.

## **V.2. Résultats expérimentaux de la photoluminescence polarisée**

L'analyse des contraintes mécaniques résiduelles dans les DLPs, nécessitent une technique physique non-destructive permettant de caractériser les contraintes mécaniques résiduelles hydrostatiques et en cisaillement. Pour cela, nous avons utilisé la photoluminescence polarisée développé par l'équipe de D.T. Cassidy du Département d'Ingénierie Physique de l'Université McMaster (Canada) [9]. Cette équipe a démontré que la polarisation de la photoluminescence des matériaux III-V est directement liée à l'axe de symétrie du matériau semi-conducteur. Cependant, les contraintes mécaniques résiduelles affectent la symétrie cristalline du matériau et par conséquent la polarisation de la photoluminescence du matériau. Cette technique est capable de fournir des informations sur le type et l'intensité des contraintes mécaniques résiduelles dans la barrette de DLP à travers la cartographie de la luminescence issue du miroir de sortie [10].

Ce paragraphe traitera des résultats des cartographies par DOP-PL et ROP-PL, définis dans le chapitre 1, obtenus sur des composants mono barrette QCW et CW. Elle permettra également d'estimer ses performances en vue d'une aide à l'interprétation des signatures de défaillance issues des tests accélérés de vieillissement.

### **V.2.a. Mono-barrette en régime QCW**

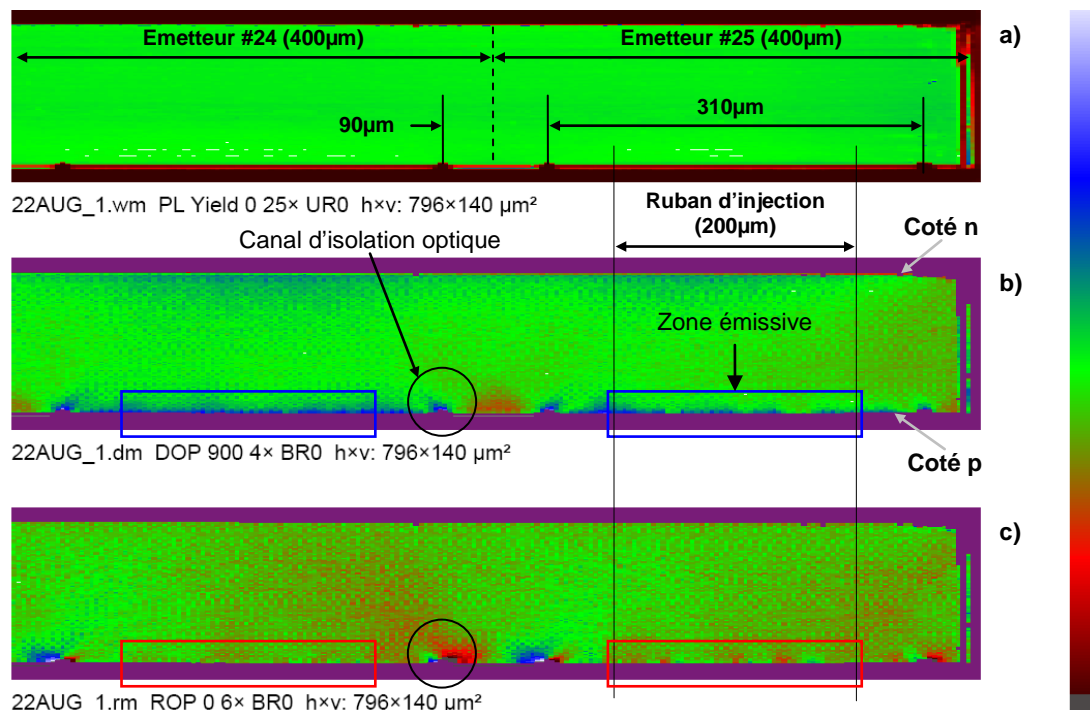
La Figure I.24 illustre les cartographies par DOP-PL (Figure I.24-b) et par ROP-PL (Figure I.24-c) des émetteurs #24 et #25 dans la barrette d'un composant mono barrette QCW. Ces

cartographies ont été obtenues avec une résolution spatiale de  $1\mu\text{m}$  vertical et  $4\mu\text{m}$  horizontal. Le traitement à posteriori des cartographies impose un codage spécifique de couleurs :

- La présence d'une contrainte en tension est codée en rouge.
- La couleur verte correspond à l'offset qui indique que les contraintes mécaniques sont nulles.
- La présence d'une contrainte mécanique en compression est codée en bleu.

La cartographie par DOP-PL présentée dans la Figure I.24-b montre clairement que la région coté "N" du substrat GaAs est contrainte en compression (bleu). Par contre, l'intensité de cette dernière est très faible voire quasiment nulle. Dans la région supérieure du substrat (verte) illustrée dans la Figure I.24-c, les signatures du ROP-PL indiquent l'absence de contraintes en cisaillement.

Le coté "P" des émetteurs (voir la Figure I.24-b) montre la présence d'une faible contrainte mécanique en compression (bleu). Cette dernière est principalement due à la couche de métallisation coté "P" et une contrainte en tension dans la zone de séparation électrique non-métallisée (rouge) qui isole électriquement chaque émetteur. En effet, l'absence de couches de métallisation conduit à l'accumulation de contraintes en tension. Par contre, comme l'indique la Figure I.24-c, les contraintes en cisaillement sont très faibles au niveau du ruban d'injection mais apparaissent au niveau des canaux d'isolation optique de chaque émetteur.



**Figure I.24 - Cartographies par PL (a), DOP-PL (b) et ROP-PL (c) des émetteurs #24 et #25 d'un composant mono barrette QCW**

Ces observations sont en accord avec les résultats de simulation de l'assemblage du composant mono-barrette QCW. En effet, la principale déformation mécanique visible par le DOP-PL

et le ROP-PL est biaxiale, suivant le plan (001). Les différents dépôts des couches de métallisation au niveau du contact "N" sont à l'origine de cette déformation. Ces résultats montrent clairement que :

- les contraintes mécaniques résiduelles au niveau de la zone active et au niveau des canaux d'isolation optique sont en compression mais très faibles,
- les contraintes mécaniques en cisaillement sont faibles et principalement localisées au niveau du ruban d'injection du courant (métallisation coté "P"), au niveau des canaux d'isolation électrique et dans la zone non métallisée de séparation électrique.

### V.2.b. Mono-barrette en régime CW

Dans cette partie, nous allons analyser l'impact du report direct de la barrette CW et en utilisant un intermédiaire au moyen de la photoluminescence polarisée (DOP-PL et ROP-PL).

#### V.2.b.1. Report direct

Cette partie aborde un composant dont la barrette est brasée directement sur embase en cuivre. La Figure I.25 présente les cartographies par DOP-PL et par ROP-PL au niveau de la face émissive de la barrette entière. Ces cartographies indiquent que :

- Le DOP-PL (Figure I.25-a) met en évidence une contrainte en compression avec un maximum localisé au centre de la barrette.
- Le ROP-PL (Figure I.25-b) révèle des contraintes en cisaillement au niveau du coté "P" de la barrette et plus particulièrement au niveau des canaux d'isolation des émetteurs.

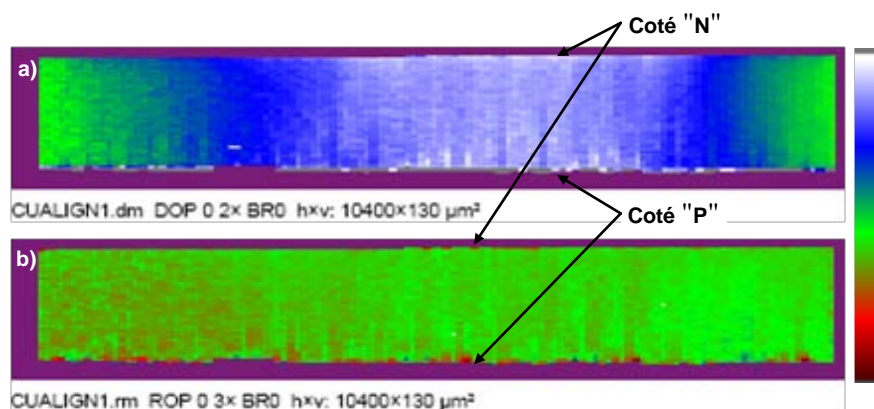


Figure I.25 - Cartographies par DOP-PL (a) et par ROP-PL (b) de la facette d'émission de la barrette reportée directement sur l'embase en cuivre

#### V.2.b.2. Report avec intermédiaire

La Figure I.26 illustre les cartographies par DOP-PL et par ROP-PL au niveau de la facette d'émission de barrette globale reporté avec intermédiaire en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ . Le DOP-PL (Figure -a) montre la présence d'une contrainte en compression dans la facette d'émission de la barrette. Le ROP-PL (Figure I.26-b) indique que les contraintes en cisaillement sont très faibles par rapport au report direct de la barrette sur embase en cuivre.

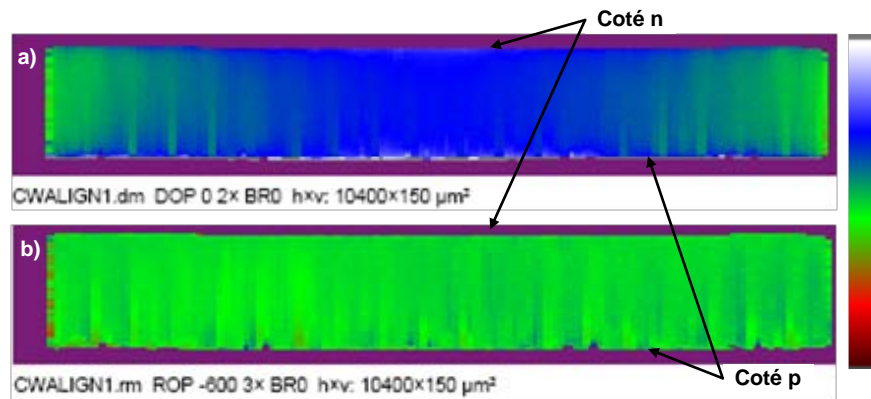


Figure I.26- Cartographies par DOP-PL (a) et ROP-PL (b) de la facette d'émission de la barrette reportée avec intermédiaire  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$

### V.3. Synthèse

Les cartographies par photoluminescence polarisée des composants mono-barrettes ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- Configuration QCW : les contraintes mécaniques induites sont très faibles voire quasi-nulles, et en accord avec les simulations mécaniques par éléments finis (<5MPa).
- Configuration CW :
  - Report direct : les contraintes mécaniques induites dans une barrette reportée directement sont importantes.
  - Report avec intermédiaire : le fait d'introduire un intermédiaire  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  entre la barrette et l'embase en cuivre permet de réduire l'amplitude des contraintes induites.

## VI. Influence des contraintes mécaniques sur les paramètres électro-optiques

Dans ce paragraphe nous allons analyser, au moyen de la caractérisation des émetteurs, l'influence des contraintes mécaniques appliquées expérimentalement dans la barrette. Le but est de montrer la relation entre les dérives électro-optiques des émetteurs d'une barrette Laser et la présence de contraintes mécaniques au sein de cette même barrette.

### VI.1. Description expérimental

Le principe de cette expérimentation est celui d'une poutre "encastrée-libre". En effet, ce principe a été choisi pour la simplicité de sa mise en œuvre permettant de générer de manière externe des contraintes mécaniques dans la barrette.

La barrette de DLP d'1cm de largeur, abordée dans cette partie, est constituée de 19 émetteurs d'une largeur de  $150\mu\text{m}$  au pas de  $500\mu\text{m}$  et émettant à  $808\text{nm}$  en mode TE. Le côté P de la barrette est brasé au centre d'une lamelle en laiton de 5cm de largeur.

Comme illustré dans la Figure I.27, la charge appliquée au moyen d'une table de déplacement micrométrique est concentrée en un point (A) situé à l'extrémité de la lamelle pendant que l'autre extrémité (O) reste bloquée. Cette expérimentation permet de produire des contraintes mécaniques inhomogènes le long de la barrette lorsqu'on déplace le point A vers le point A', avec  $AA' = y_v$ . Ce déplacement est géré par un nano-positionneur situé au niveau de l'extrémité libre de la lamelle. Ceci a été réalisé pendant toute l'étude en nous limitant à la déformation élastique de la lamelle en laiton.

La barrette a été caractérisée émetteur par émetteur pour 30A - 100Hz/100 $\mu$ s à température constante (25°C). Pour cela, une première sonde de température ( $S_{T1}$ ) est positionnée sous la barrette pour relever la température de la barrette en fonctionnement et une deuxième sonde ( $S_{T2}$ ) est fixée sur la semelle en cuivre pour faciliter la régulation par effet Peltier.

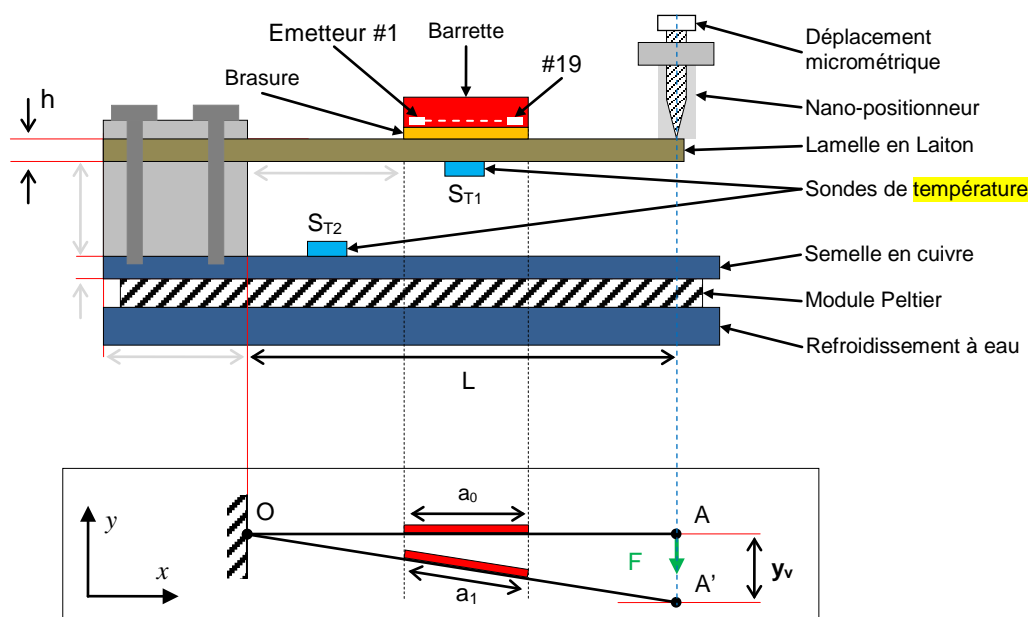


Figure I.27 - Schéma descriptif de l'expérimentation permettant de modifier l'état des contraintes mécaniques dans la barrette

Après le report de la barrette sur la lamelle en laiton, les émetteurs #1, #2 et #3 ont présenté une remontée de brasure au niveau de la facette d'émission coté "P", masquant ainsi totalement l'émission laser. De ce fait, ces émetteurs ont été exclus de notre étude et notre analyse sera focalisée sur un total de 16 émetteurs fonctionnant normalement le long de la barrette.

## VI.2. Résultats expérimentaux

L'analyse des résultats expérimentaux se compose en deux parties : l'impact des contraintes sur la courbure de la barrette, appelé "Smile" et l'impact des contraintes sur les paramètres  $P_{out}$ ,  $\lambda_{max}$  et DOP des émetteurs de la barrette.

## VI.2.a. Courbure de la barrette - "Smile"

### VI.2.a.1. Définition

Une barrette de DLP d'1cm de largeur conserve une courbure résiduelle par rapport au plan des couches épitaxiales après les étapes de fabrication plein plaque (épitaxie) et ceci même après les étapes de report sur embase. Ce défaut apparaît comme une courbure de la ligne des émetteurs et il est appelé "Smile" en anglais. Le "Smile" affecte principalement la collimation de l'axe rapide de la barrette au moyen de dispositifs micro-optiques placés. Cette caractéristique peut atteindre quelques microns et ne doit pas, typiquement, dépasser  $2\mu\text{m}$ .

Le "Smile" est mesuré à travers un système vidéo dédié en injectant un courant continu de quelques dizaines de milliampères dans la barrette [11]. La valeur du "Smile" correspond à la valeur crête à creux du profil obtenu (voir Figure I.28).

### VI.2.a.2. Evolution du "Smile" en fonction de la contrainte appliquée

La Figure I.28 illustre l'allure du "Smile" de la barrette en fonction du déplacement  $y_v$  appliqué. La principale observation qu'on peut tirer de ces allures est le changement de la forme initiale du Smile de la barrette qui est concave (Figure I.28 - a) et devient convexe (Figure I.28-d) lorsque le déplacement  $y_v$  passe de 0 à  $800\mu\text{m}$ . Ceci nous a permis d'obtenir différentes valeurs et formes du Smile pour la même barrette.

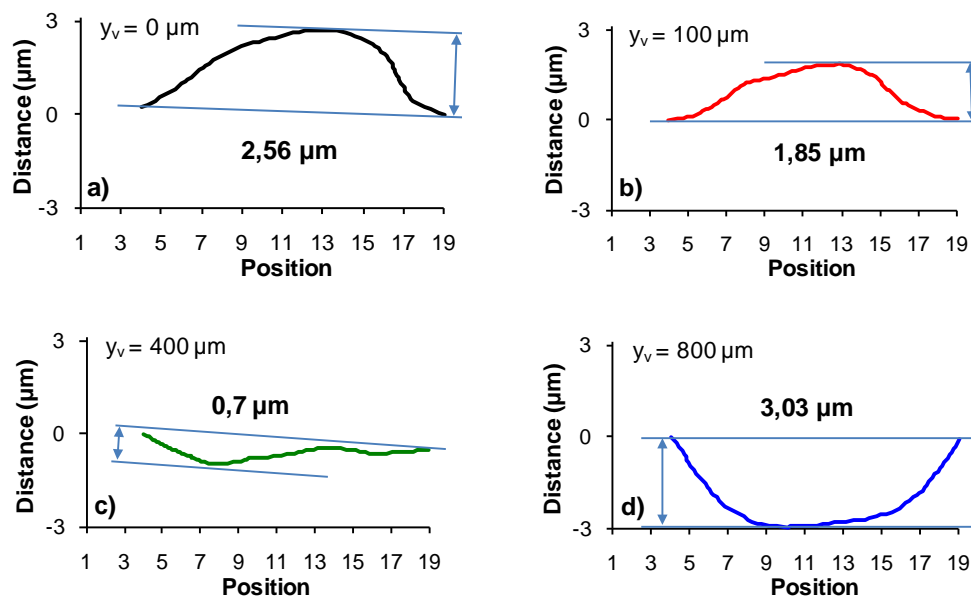
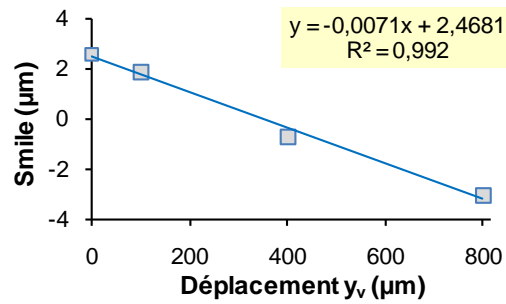


Figure I.28 - Variations de la courbure de de la barrette ("Smile") en fonction du déplacement  $y_v$  : 0 (a), 100 (b), 400 (c) et  $800\mu\text{m}$  (d)

Comme illustré dans la Figure I.29, les valeurs du "Smile" de la barrette mesurées en fonction du déplacement  $y_v$  obéissent à une loi linéaire.



**Figure I.29 - Courbure de la barrette en fonction du déplacement  $y_v$  appliqué**

Dans le paragraphe suivant, pour chaque allure du "Smile" nous avons effectué une caractérisation de la barrette au niveau émetteur. Le but étant de mettre en évidence l'influence des contraintes mécaniques sur la barrette à travers les paramètres électro-optiques au niveau émetteur.

### **VI.2.b. Paramètres électro-optiques des émetteurs**

Précédemment, nous avons modifié le "Smile" de la barrette en modifiant expérimentalement l'état des contraintes mécaniques dans la barrette. Ceci a été obtenu sans générer de dégradation prématurée de la barrette. Cependant, pour un courant injecté dans la barrette de 30A en régime QCW (100Hz/100 $\mu\text{s}$ ) à 25°C, nous exposons dans ce paragraphe les résultats et l'analyse des caractérisations au niveau émetteur pour chaque valeur du déplacement  $y_v$ .

#### **VI.2.b.1. Puissance optique**

Les profils du paramètre  $P_{\text{out}}$  dans la barrette, pour les différentes valeurs du déplacement  $y_v$ , sont présentés dans la Figure I.30. On constate que l'allure de  $P_{\text{out}}$  n'est quasiment pas affectée par la gamme des contraintes mécaniques appliquées. La moyenne de la pente  $dP_{\text{out}}/dy_v$  calculée pour chaque émetteur est de l'ordre de 0,008 a.u./ $\mu\text{m}$  avec un écart type de l'ordre de 0,006 a.u./ $\mu\text{m}$ . Ceci montre que l'influence des contraintes sur les variations de  $P_{\text{out}}$ , le long de la barrette, est très faible pour analyser l'état des contraintes dans la barrette.



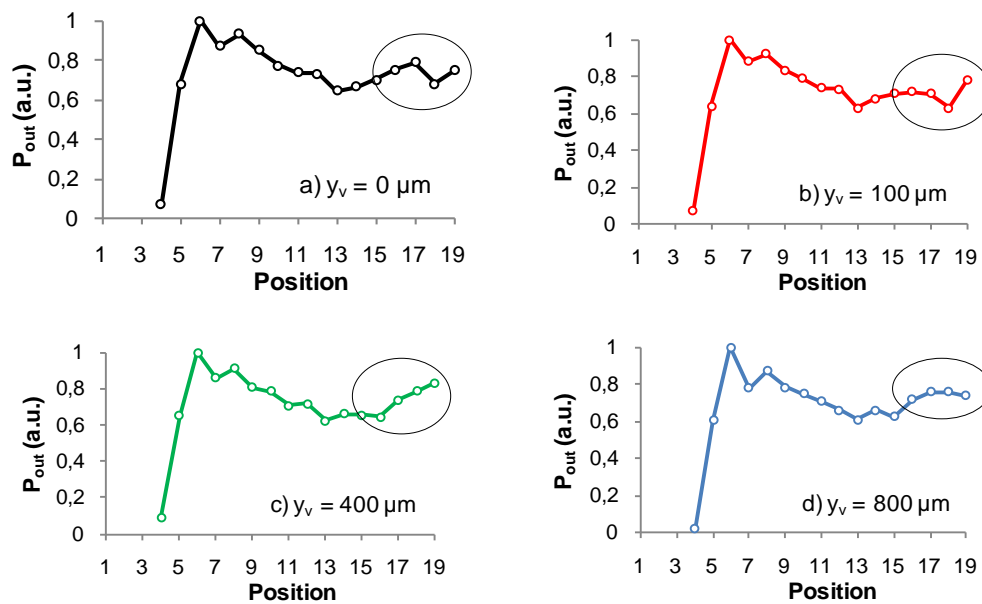


Figure I.30 - Profils de variation de  $P_{out}$  le long de la barrette pour différentes valeurs du déplacement  $y_v$  : 0 (a), 100 (b), 400 (c) et 800  $\mu\text{m}$  (d)

### VI.2.b.2. Degré de polarisation

La Figure I.31 présente l'évolution du DOP le long de la barrette pour les différentes valeurs du déplacement  $y_v$  appliquées. Ces courbes montrent que la position de l'émetteur ayant initialement ( $y_v = 0\mu\text{m}$ ) un DOP faible change sous l'effet de la force appliquée. Cela montre que l'intensité des contraintes mécaniques le long de la barrette contribue fortement à la polarisation de l'émission des émetteurs. Le DOP global de la barrette est resté égale à 0,92 sauf pour  $y_v=100\mu\text{m}$  (Figure I.31-d) puisque nous avons calculé un DOP égale à 0,86. Par conséquent, on peut déduire que le profil le long de la barrette du DOP est plus homogène pour  $y_v = 800\mu\text{m}$  (Figure I.31-d).

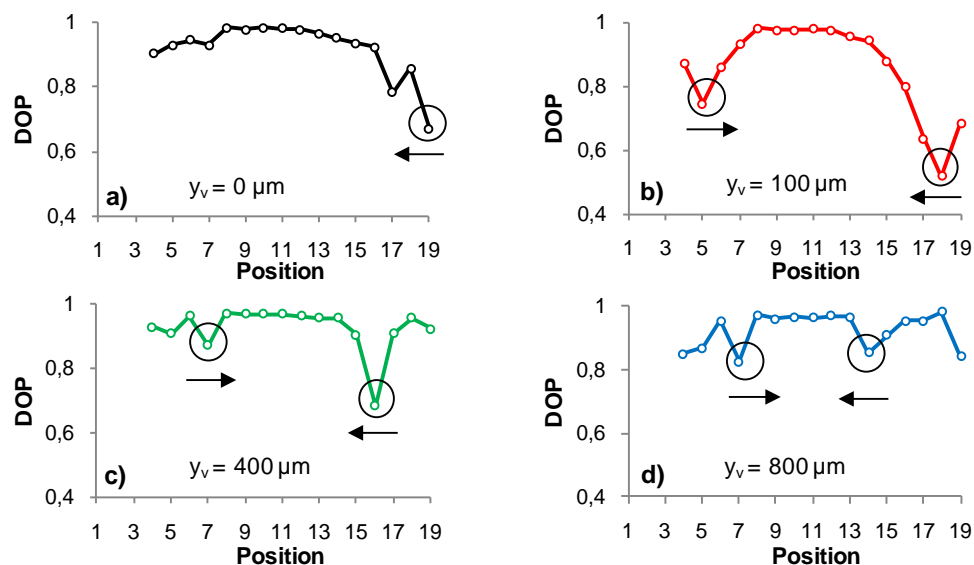


Figure I.31 - Profils de variation du DOP le long de la barrette pour différentes valeurs du déplacement  $y_v$ : 0 (a), 100 (b), 400 (c) et 800  $\mu\text{m}$  (d)

### VI.2.b.3. Paramètres spectraux

Les spectres optiques de la barrette globale, pour les différentes valeurs du déplacement  $y_v$ , sont illustrés dans la Figure I.32. La longueur d'onde centrale de la barrette est restée quasi constante quelle que soit la contrainte induite ( $803,8 \pm 0,4 \text{ nm}$ ). En revanche, nous avons observé une modification de l'enveloppe du spectre optique en fonction de la force appliquée. En effet, pour  $y_v = 100 \mu\text{m}$  on obtient une importante émission parasite à  $805 \text{ nm}$  et pour  $y_v = 400 \mu\text{m}$  cette émission est décalée d' $1 \text{ nm}$  pour apparaître à  $804 \text{ nm}$ .

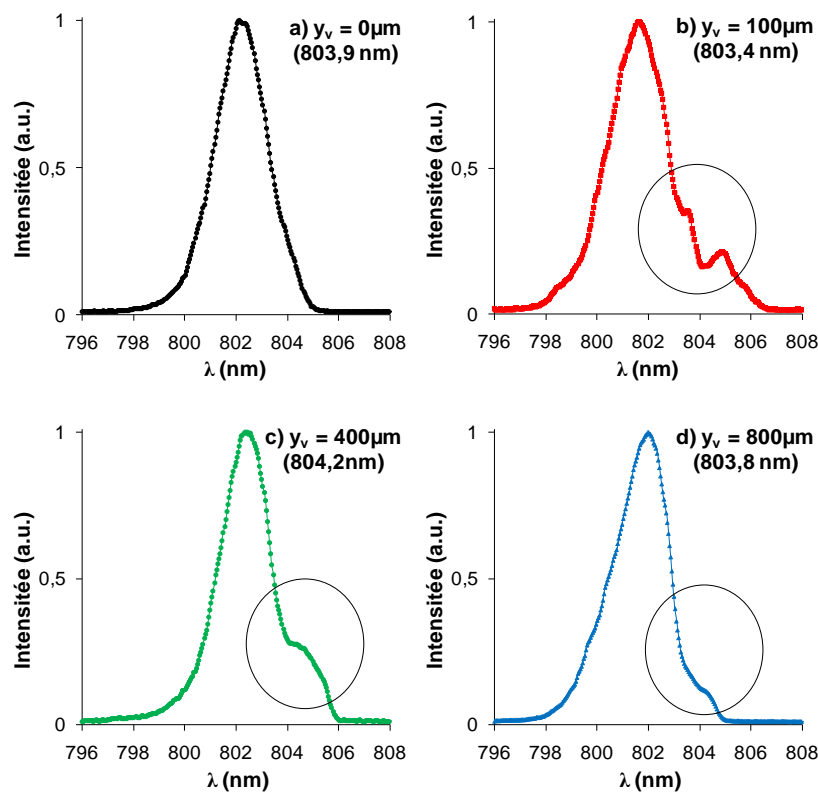


Figure I.32 - Spectres optiques de la barrette globale pour 30A (100Hz/100 $\mu\text{s}$ ) à 25°C pour différentes valeurs du déplacement  $y_v$ : 0 (a), 100 (b), 400 (c) et 800 $\mu\text{m}$  (d)

La Figure I.33 illustre l'évolution de la longueur d'onde centrale le long de la barrette pour différentes valeurs du déplacement  $y_v$ . Ces courbes montrent que la partie droite de la barrette est à l'origine des pics parasites dans le spectre global de la barrette et que la position des émetteurs à l'origine de ces pics change avec le déplacement  $y_v$ .

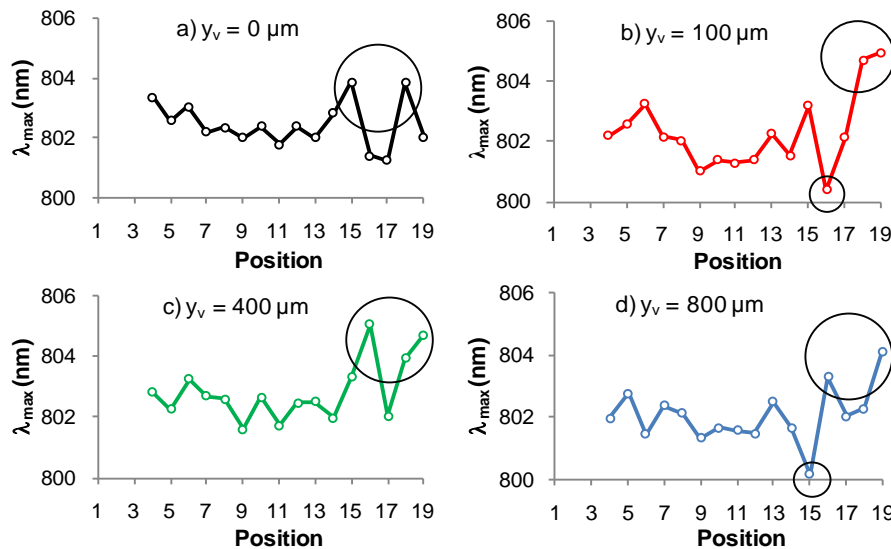


Figure I.33 - Evolution de  $\lambda_{\max}$  de chaque émetteur le long de la barrette pour différentes valeurs du déplacement  $y_v$  : 0 (a), 100 (b), 400 (c) et 800  $\mu\text{m}$  (d)

### VI.3. Synthèse

A travers l'introduction de contraintes mécaniques externes le long de la barrette, nous avons modifié le "Smile" de la barrette et le profil des paramètres DOP et  $\lambda_{\max}$  le long de la barrette. Nous avons ainsi pu mettre en évidence que les contraintes mécaniques sont à l'origine de :

- l'apparition des pics parasites dans le spectre optique global de la barrette,
- la dégradation du DOP global de la barrette,
- l'inhomogénéité du DOP et  $\lambda_{\max}$  le long de la barrette,

En revanche, il a été clairement mis en évidence que le profil de variations de  $P_{\text{out}}$  le long de la barrette est quasiment insensible aux contraintes mécaniques appliquées et, par conséquent, ne constitue pas un paramètre pertinent pour la détection de ces dernières.

## VII. Conclusion

Les résultats de simulation thermique et thermomécanique, par éléments finis des composants mono barrette-QCW utilisant différents types de matériau et épaisseur de dissipateurs, ont montré l'avantage évident du matériau DC60 combinant à la fois des propriétés thermiques et mécaniques bien supérieures aux alliages à base de CuW. Cependant, pour des applications QCW à 100Hz/200 $\mu\text{s}$ , le  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  montre également un très bon compromis de la dissipation de la chaleur et des propriétés mécaniques.

Les cartographies par photoluminescence polarisée, au niveau de la face émissive d'un composant mono barrette QCW, ont mis en évidence des contraintes mécanique très faibles. La barrette analysée est prise en sandwich par des dissipateur  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  confirmant les résultats issus des simulations mécaniques de l'assemblage d'un composant mono-barrette dans la même configuration.

L'étude de l'influence des contraintes mécaniques sur la barrette à travers le principe de la poutre "encastrée-libre" a permis de mettre en évidence l'intérêt de la caractérisation émetteur par émetteur développée dans le chapitre 2. En effet, les profils de variation des paramètres électro-optiques des émetteurs le long de la barrette sont sensibles à l'état de contrainte mécanique. Néanmoins, il a été clairement mis en évidence que le profil de variations de  $P_{out}$  le long de la barrette est quasiment insensible aux contraintes mécaniques appliquées, tandis que le DOP et le spectre optique en sont fortement dépendants. Ces observations ont été confortées par la courbure de la barrette ("smile") qui change de forme (concave-convexe) et de valeur en fonction de la contrainte mécanique appliquée.

Dans le dernier chapitre, nous allons évaluer, à travers de la caractérisation émetteur par émetteur, la fiabilité opérationnelle et l'amélioration des performances de composants de type mono barrette QCW et Stack microassemblés sur dissipateurs en  $Cu_{10}W_{90}$ .

---

## VIII. REFERENCES

- [1] "*Simulation multiphysique : l'approche Comsol*" cad-magazine - N° 129 - décembre-janvier 2006.
- [2] D. Pierścińska, A. Kozłowska, K. Pierściński, M. Bugajski and J.W. Tomm, M. Ziegler and F. Weik, "*Thermal processes in high-power laser bars investigated by spatially resolved thermoreflectance*", J Mater Sci: Mater Electron, 19, pp. 150-154 (2008).
- [3] Dorkel Jean-Marie "*Semi-conducteurs de puissance : Problèmes thermiques (partie 1)*", Techniques de l'ingénieur, Génie électrique, vol. D4, no D3112, pp. 1-19, (2003).
- [4] Sumitomo Electric (<http://www.sumitomoelectricusa.com>).
- [5] A. Kozłowska, A. Malag, "*Investigations of transient thermal properties of conductively cooled diode laser arrays operating under quasicontinuous-wave conditions*", Microelectronics Reliability 46, pp. 2079-2084, (2006).
- [6] R. Puchert, A. Bärwolff, M. Voß, U. Menzel, J.W. Tomm, and J. Luft, "*Transient Thermal Behavior of High Power Diode Laser Arrays*", IEEE TPMC PART A, Vol. 23, No. 1, pp. 95-100, (2000).
- [7] GaAs, Mechanical properties, elastic constants, lattice vibrations, (site web : <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM>).
- [8] P.J. Webster, "*Analyse des contraintes résiduelles et de la texture dans les matériaux : applications industrielles*", J. Phys. France, 103, pp. 305-319, (2003).
- [9] Cassidy, D.T., Lam, S.K.K., Lakshmi, B., Bruce, D.M., "*Strain mapping by measurement of the degree of polarization of photoluminescence*", Applied Optics, 43 (9), pp. 1811-1818, (2004).
- [10] D.T. Cassidy, "*Spatially-resolved and polarization-resolved photoluminescence for study of dislocations and strain in III-V materials*", Materials Science and Engineering B, 91-92, pp. 2-9, (2002).
- [11] N.U. Wetter, "*Three-fold effective brightness increase of laser diode bar emission by assessment and correction of diode array curvature*", Optics & Laser Technology, 33, pp. 181-187, (2001).

# Chapitre IV. Evaluation de la fiabilité opérationnelle et optimisation des composants QCW

---

## I. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré à travers la modélisation thermique et mécanique que l'utilisation de dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ , dans la réalisation des DLPs QCW, est un bon compromis entre la gestion de la dissipation de la chaleur et les niveaux de contraintes mécaniques résiduelles ( $\sim 5\text{MPa}$ ). L'approche expérimentale notamment conduite par l'intermédiaire de la photoluminescence polarisée a permis de démontrer que les contraintes mécaniques induites sont très faibles au niveau de la face émissive d'une barrette de DLPs microassemblée en configuration QCW. Nous avons également expérimentalement démontré que les paramètres  $\lambda_{\text{max}}$  et DOP des émetteurs de la barrette, extraits par une caractérisation individualisée des émetteurs, approche développée dans le chapitre II, sont très sensibles aux contraintes mécaniques extrinsèques.

Ce dernier chapitre est donc consacré à l'analyse des résultats de vieillissement de composants QCW, microassemblés sur dissipateur en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ , de type mono-barrette et multi-barrette (Stack). Lors de la réalisation de ces composants, il est nécessaire de prédire au mieux leurs durées de vie afin de réduire les essais nécessaires pour obtenir des composants hautement fiables ( $>4 \times 10^9$  tirs). En effet, l'analyse de la dégradation des barrettes de DLPs au niveau émetteur est essentielle pour focaliser l'objectif principal de ce chapitre sur la mise en place d'une méthodologie originale de tri des émetteurs fiables et par conséquent, la définition d'un indicateur précoce de défaillance des DLPs QCW. Dans ce cadre, et dans un premier temps, nous nous attacherons à analyser les résultats de vieillissement en courant d'un composant mono-barrette QCW "standard" (constitué de 25 émetteurs) au niveau barrette et au niveau émetteur individuel pour proposer un indicateur précoce de défaillance original basé sur la position initiale des émetteurs dans le plan  $(\lambda_{\text{max}}, \text{DOP})$ . Ce dernier se découpe en N cas et chaque cas sera évalué vis-à-vis de la fiabilité opérationnelle et des mécanismes de défaillance associés. Dans un deuxième temps, nous validerons cette approche avec un second composant mono-barrette optimisé en terme du couple  $(\lambda_{\text{max}}, \text{DOP})$  et vieilli dans les mêmes conditions que le composant standard.

Enfin, cette approche sera appliquée à des composants multi-barrettes (Stacks QCW) de forte puissance (150W), réalisés suivant différents processus de microassemblage sur dissipateur (processus appelé montage SEB), afin d'optimiser les étapes de report permettant de satisfaire aux conditions spécifiées dans le plan ( $\lambda_{\max}$ , DOP) à partir des résultats acquis sur les composants précédents.

## II. Rappel sur les modes génériques de dégradation des diodes laser

De manière générale, la fiabilité fait, à présent, partie intégrante des travaux de recherche menés sur les diodes Laser. Les résultats publiés à ce jour sont issus de tests de vieillissement régulièrement conduits en stockage actif (en courant et/ou en température) et démontrent traditionnellement une dégradation de la puissance optique émise souvent catastrophique pour un courant fixé, révélant ainsi diverses signatures de défaillance impliquant différents modes de dégradation [1, 2, 3, 4]. Une barrette de diodes laser étant constituée de plusieurs diodes élémentaires, il est opportun de s'appuyer sur ces modes de dégradation pour analyser la fiabilité des barrettes au niveau émetteur individuel. De manière générale, la variation de la puissance optique émise en fonction du temps pour un courant fixe se caractérise par 3 principaux modes génériques de dégradation :

- graduel,
- rapide,
- catastrophique.

Dans les paragraphes suivants, nous allons nous attacher à décrire sommairement les principales caractéristiques de chaque mode de dégradation avec des exemples sur les barrettes de DLPS à base du matériau GaAs.

### II.1. Mode de dégradation graduel

*Le mode de dégradation graduel* correspond à une faible dérive (souvent associée à une baisse) de la puissance optique émise après plusieurs milliers d'heures de fonctionnement. Le principal mécanisme à l'origine de cette dégradation est nommé REDR (Recombination Enhanced Defect Reaction) [5], dû à la formation de défauts ponctuels qui augmentent en fonction de la durée de fonctionnement et pour des conditions (I, T) maintenues constantes. Les niveaux profonds peuvent être observés par la technique de DLTS (Deep Level Transient Spectroscopie) dans des diodes laser à base d'hétérostructure AlGaAs/GaAs, la concentration de ces défauts augmentant en fonction de la durée de fonctionnement.

La dégradation graduelle peut être décrite par le mécanisme suivant : la recombinaison non-radiative des défauts ponctuels existants produisent de nouveaux défauts ponctuels par REDR; ces défauts ponctuels agissent comme des centres de recombinaison non-radiative et diminuent l'efficacité du laser en créant de nouveaux défauts ponctuels. Ce mécanisme de rétroaction conduit à la migration

et à la condensation des défauts ponctuels en formant des amas ou de petites boucles de dislocations, qui va contribuer à diminuer le rendement quantique de la diode laser. Le taux de la dégradation dépend essentiellement de :

- La concentration de défauts ponctuels intrinsèquement générée par le processus d'épitaxie.
- La distribution des contraintes le long du ruban de métallisation utilisé pour améliorer l'injection du courant.
- La qualité des interfaces métalliques ; la migration de l'Au contenu dans les métallisations peut être une source de défauts dans la structure épitaxiale. Actuellement, la réalisation de contact ohmique Ti/Pt/Au est privilégiée, créant ainsi une barrière à la migration de l'or.
- La contrainte mécanique contribue également à accélérer la dégradation graduelle. L'origine de cette contrainte peut être interne, générée par la désadaptation des couches composant la structure épitaxiée, ou externe, induite par les étapes de report de la barrette sur son embase. Pour le matériau GaAs, O. Ueda a proposé de fixer la valeur limite de la contrainte mécanique à 30MPa pour ne pas accélérer la dégradation graduelle [4].

L'optimisation de ces paramètres permet donc de limiter la dégradation et ainsi d'augmenter la durée de vie de la barrette laser.

## **II.2. Mode de dégradation rapide**

*Le mode de dégradation rapide* des diodes laser à base de GaAs correspond à la propagation des dislocations de type DLDs (Dark Line Defects) et DSDs (Dark Spot Defects) dans la couche active et/ou dans les couches de confinement. Ces défauts vont entraîner, par le biais du processus de recombinaison non radiative, une diminution de la puissance optique émise dans la zone de la barrette où de l'émetteur ou se situe le défaut. La propagation de ces défauts aux zones voisines va conduire à une diminution plus importante de la puissance optique de la diode laser. Le déplacement de ces défauts s'effectue dans les plans de plus grande densité d'atomes qui sont les plans (111) dans le cas de structures sur substrat GaAs (100).

M. Fukuda a répertorié deux types de défaut type DLD qui peuvent influencer le mode de dégradation rapide : Les DLDs qui se propagent dans la direction (100) et ceux qui se propagent dans la direction (110). L'origine des DLDs est la présence de dislocations consécutives à une accumulation de défauts ponctuels. La propagation d'une dislocation dans un semi-conducteur peut s'effectuer selon 2 grands mécanismes physiques [6, 10] :

- La "montée" des dislocations, fortement consommatrice de défauts ponctuels, tels que les lacunes ou d'atomes en sites interstitiels pour exister et se propager.



- Le glissement d'un plan par rapport à un autre, qui est accentué sous l'effet des forces de déformation plastique. Plus la contrainte est grande, plus la tendance au procédé de glissement d'une dislocation est importante.

Le mouvement privilégié dépend du type de défaut. Les DLDs de type (100) sont associés au mouvement de "montée" alors que les défauts de type (110) utilisent le mouvement de glissement. Ce mode de dégradation apparaît principalement durant les cents premières heures de fonctionnement [7-8]. Il est caractérisé par une diminution du rendement quantique auquel vient s'ajouter une augmentation du courant de seuil. En effet, la présence et la croissance de défauts de type DLD créent des centres de recombinaisons non-radiatives qui dégradent le gain du laser [6, 9].

### **II.3. Mode de dégradation catastrophique**

*Le mode de dégradation catastrophique* correspond souvent à la conjonction de ces deux phénomènes :

- La propagation rapide des défauts de type DLD dans la zone active, qui sous l'effet de recombinaisons non radiatives va dégrader les émetteurs de la barrette. Ce phénomène est dû à une concentration importante de défauts ponctuels dans la couche active, qui le différencie du mode de dégradation rapide susceptible d'apparaître après un mode de fonctionnement normal de plusieurs centaines d'heures [10].
- Un procédé d'emballage thermique, généré par une succession de recombinaisons non radiatives qui peuvent entraîner un point de fusion sur la face émissive de la barrette, appelé COMD (Catastrophic Optical Mirror Damage) [11].

R.G. Ahrens a étudié le comportement de plusieurs diodes laser de puissance (970nm) à base de GaAs en fonctionnement issues de trois fabricants différents [12]. La dégradation des diodes étudiées a été analysée au moyen de différentes techniques : microscopie optique, microscopie électronique à balayage, électroluminescence et en champ proche. Cette étude met clairement en évidence l'ensemble des modes de dégradation décrits précédemment. Certaines diodes subissent une diminution brutale de la puissance optique après un mode de dégradation graduel, mettant en évidence le processus de dégradation catastrophique. D'autres composants évoluent peu après plus de 1000h de vieillissement, mettent en évidence la dégradation graduelle. Enfin, les dégradations observées sur le dernier groupe de diodes laser révèlent un mode de dégradation rapide associé à un matériau sous contrainte générant et propageant un réseau de dislocations.

Les phénomènes décrits précédemment sont classés comme des dégradations internes car elles sont localisées dans la zone active ou dans les couches adjacentes. D'autres dégradations liées aux couches de métallisation des barrettes ou des embases peuvent intervenir. L'optimisation des procédés de report consiste à assurer un bon contact thermique et électrique, tout en minimisant les phénomènes

de diffusion et d'électro-migration qui peuvent être une source potentielle de dégradation des diodes laser [6, 13].

### **III. Evaluation de la fiabilité des composants mono-barrette QCW**

En général, l'étude des mécanismes de dégradation d'un composant semi-conducteur s'articule autour de deux grandes phases :

- La première est la caractérisation initiale du composant, réalisée à l'aide des différents dispositifs de mesure présentés dans le chapitre II.
- La seconde phase adresse le vieillissement du composant, au travers des tests de vieillissement accélérés ponctués par un ensemble de caractérisations réalisées à des intervalles de temps réguliers (reprises de mesure), correspondant à l'application de contraintes de fonctionnement sur le composant ; ces contraintes sont généralement supérieures à celles appliquées en conditions opérationnelles et déterminées par un facteur d'accélération dépendant des paramètres accélérés (courant, tension, température, humidité...).

Ce paragraphe s'attachera à analyser les résultats de vieillissement du composant mono-barrette QCW appelé "standard", au travers des courbes de vieillissement et de la caractérisation initiale émetteur par émetteur. Ensuite, nous allons croiser les mesures initiales et les dégradations observées pour mettre en place un nouvel indicateur de défaillance spécifique aux composants QCW. Enfin, cette approche sera validée par la réalisation et l'étude du vieillissement d'un second composant mono-barrette QCW appelé "optimisé".

#### **III.1. Composant QCW en architecture "standard"**

##### **III.1.a. Description du banc de vieillissement**

La phase de vieillissement est cruciale, principalement par le choix du niveau des contraintes, car elle va dépendre de la validité de notre étude. Le choix des contraintes doit donc être basé sur un profil de mission établi en relation étroite avec l'application finale, et sur la nature même du composant. Par exemple dans notre cas, le même type de vieillissement n'aura pas le même effet sur la dégradation de la puissance optique d'un composant désigné pour un régime CW et un régime QCW.

Les tests de vieillissements ont été conduits au moyen du banc de test schématisé dans la Figure I.1 mis en place au sein de Quantel Laser Diode. L'embase des composants testés est plaquée sur une semelle en cuivre refroidi avec un circuit à eau fermé, fixant ainsi la température de l'embase à 25°C. Les composants sont alimentés en série au moyen d'une alimentation électrique QCW et la température de chaque composant est contrôlée tout le long du test au moyen d'une sonde de température (Pt100) positionnée sur le flanc de l'embase de chaque composant. La température est mesurée avec une erreur de 0,1°C.

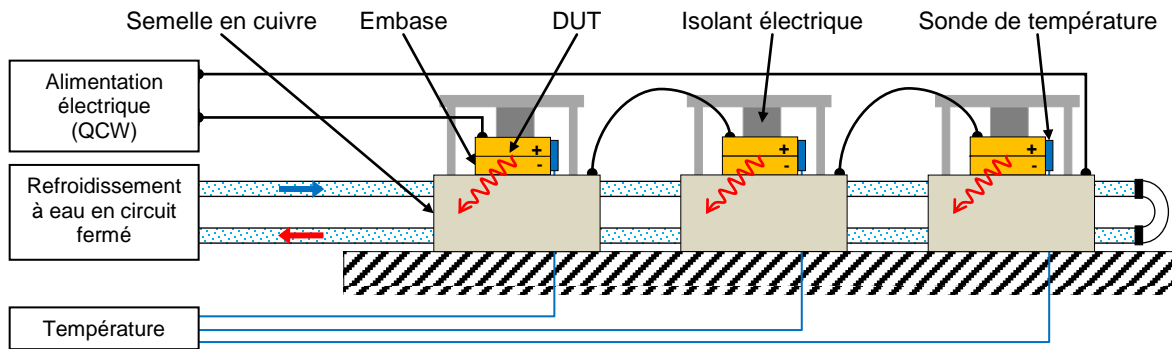


Figure I.1 - Schéma descriptif du banc de vieillissement des composants QCW et refroidissement associé

### III.1.b. Conditions du test de vieillissement

Le vieillissement du composant QCW standard a été effectué suivant les conditions décrites dans le Tableau I.1 qui correspondent à une approche "contraintes échelonnées". Ces conditions reflètent le profil de mission qui est de 100W optique en régime QCW (100Hz/200µs), correspondant à une puissance optique émise moyenne de 2W. Dans le cadre de ce test accéléré, la fréquence de répétition a été doublée (200Hz) dans la première étape pour obtenir une puissance optique moyenne de 4W puis dans une deuxième étape, l'amplitude des impulsions de courant a été augmentée tout en réduisant la fréquence de répétition (125Hz) afin de ne pas dépasser une puissance optique émise moyenne de 3W (limitée par la valeur maximale de l'alimentation utilisée); l'objectif étant d'augmenter la contrainte thermique sans modifier la durée de l'impulsion (200µs).

Etape	Courant	Régime QCW	Rapport cyclique	Température	Durée	Nbre de tirs
1	100A	200Hz/200µs	4%	25°C	2752h	$1,98 \times 10^9$
2	120A	125Hz/200µs	2,5%	25°C	5522h	$2,48 \times 10^9$

Tableau I.1 - Conditions de vieillissement accéléré du composant mono-barrette QCW standard

### III.1.c. Résultats de vieillissement accéléré en contraintes échelonnées

#### III.1.c.1. Dérives globales des caractéristiques électro-optiques

Les courbes de vieillissement, pour 30A en régime QCW (100Hz/100µs) à 25°C, sont présentées dans la Figure I.2. Après 8273h, correspondant à  $4,47 \times 10^9$  tirs, on observe une baisse globale de la puissance optique de l'ordre de 15% (Figure I.2-a). Rappelons que le profil de mission spatial fixe une baisse maximale de puissance de 10% après  $3 \times 10^9$  tirs à 100Hz/200µs, correspondant à 5000h de fonctionnement dans les conditions de vieillissement décrites dans le Tableau I.1, comme critère de défaillance. Après 1000h nous avons atteint 15% de baisse globale de la puissance optique. Cette dégradation est très significative pour notre étude. En effet, la dégradation s'est principalement produite, durant l'étape 1 du test, avant d'atteindre les  $1,1 \times 10^9$  tirs. En revanche, les caractéristiques spectrales du composant globales (Figure I.2-b, -c et -d) ont montré :

- un élargissement spectrale de 11% ( $t_0 : \Delta\lambda_i = 1,6\text{nm}$  et à 8272h :  $\Delta\lambda_f = 1,8\text{nm}$ ),

- un décalage de la longueur d'onde centrale ( $\lambda_c$ ) de -0,7nm.

L'évolution de cette dernière ( $\lambda_c$ ) est significative pour le profil de mission retenu qui impose :  $\lambda_{\max} \pm 0,5\text{nm}$  et  $\Delta\lambda < 2\text{nm}$ .

Un composant type mono-barrette QCW similaire au composant standard testé (DUT), appelé "référence", à été mesuré à chaque reprise du test de vieillissement. Les mesures effectuées sont validées et les éventuelles dérives des bancs de caractérisation électro-optiques sont régulièrement contrôlées.

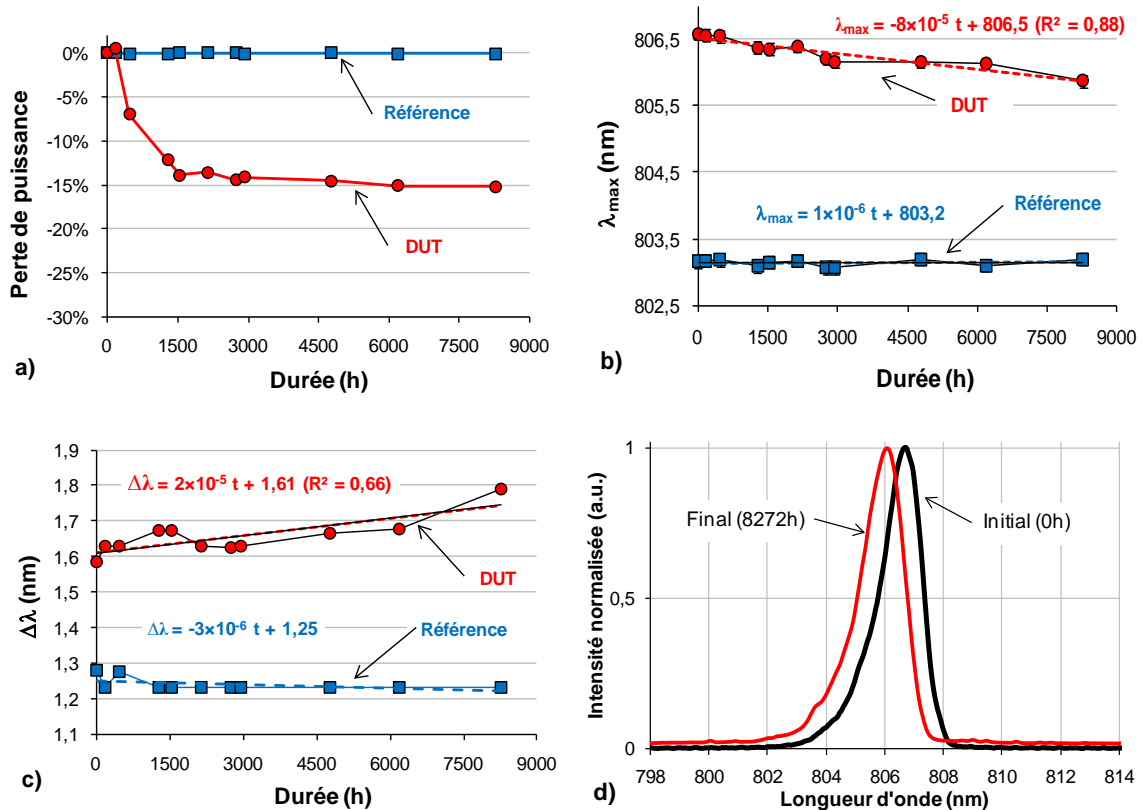


Figure I.2 - Dérives des principaux paramètres du composant mono-barrette QCW standard en vieillissement accéléré à 25°C (2752h à 100A-200Hz/200μs puis 5522h à 120A-125Hz/200μs) :  $P_{\text{out}}$  (a),  $\lambda_{\max}$  (b),  $\Delta\lambda$  (c) et spectre optique (d)

La dégradation globale de ce composant est importante, cependant l'analyse au niveau barrette de la dégradation ne permet pas d'obtenir des interprétations pertinentes sur l'origine de la dégradation. En effet, le champ proche montre que la dégradation est liée à la défaillance d'un certain nombre d'émetteurs sans aucune possibilité de quantifier les dérives observées. Dans la partie suivante, nous allons analyser l'évolution de chaque émetteur présent dans la barrette pour obtenir une interprétation de chaque émetteur dégradé.

### III.1.c.2. Dérives individualisées des caractéristiques électro-optiques

Parallèlement au suivi des caractéristiques globales du composant pendant le test, nous avons également mesuré les paramètres électro-optiques ( $P_{out}$ ,  $\lambda_{max}$  et DOP) de chaque émetteur à différents intervalles du test de vieillissement, comme illustré dans le Tableau I.2.

Étape	$t_0$	1 - (100A-200Hz/200 $\mu$ s)						2 - (120A-125Hz/200 $\mu$ s)			
Mesure #	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Nbre de tirs ( $\times 10^9$ )	0	0,12	0,34	0,92	1,11	1,53	1,98	2,07	2,89	3,53	4,47
Durée (h)	0	168	471	1282	1540	2132	2752	2938	4774	6190	8273

Tableau I.2 - Mesures de reprise du composant mono-barrette QCW standard et l'équivalence durée du test/nombre de tirs

L'analyse de l'évolution, dans le temps, des paramètres de chaque émetteur de la barrette sera scindée en deux parties :

- la puissance optique émise ( $P_{out}$ ),
- les caractéristiques spectrales ( $\lambda_{max}$ ) comparées par la suite au degré de polarisation (DOP).

#### Evolution du $P_{out}$ des émetteurs

La Figure I.3 présente la puissance optique ( $P_{out}$ ) de chaque émetteur dans le composant standard en fonction du nombre de tirs. Après  $4,5 \times 10^9$  tirs, la dégradation de sept émetteurs, correspondant à pratiquement 30% des émetteurs présents dans la barrette, a été mise en évidence avec comme répartition :

- cinq émetteurs présentant une dégradation catastrophique parvenue dans l'étape 1 du test,
- deux émetteurs révélant une baisse de 55% du  $P_{out}$  en fin de l'étape 2.

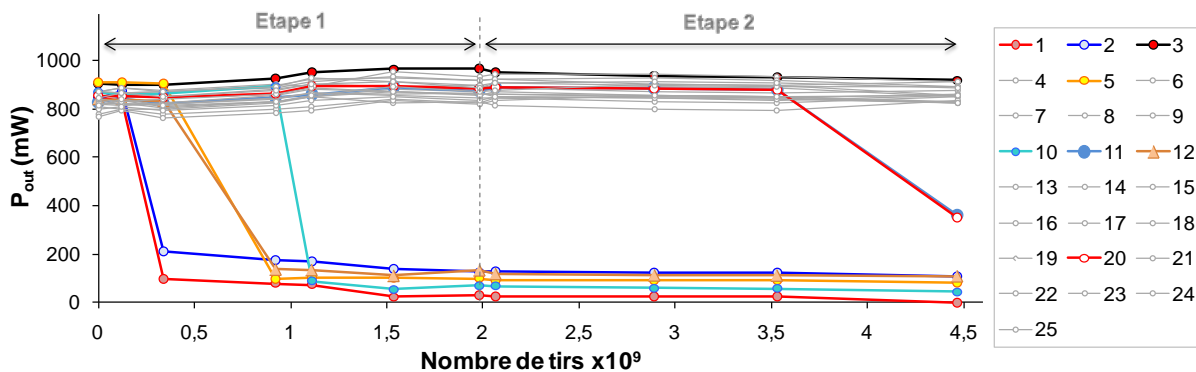


Figure I.3 - Impact du vieillissement sur le  $P_{out}$  des émetteurs dans le composant mono-barrette QCW standard pour 30A en QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C

La mesure initiale de  $P_{out}$  (Figure I.4-a) ne permet pas d'établir un critère de défaillance précoce puisque nous n'avons observé aucune corrélation évidente entre la baisse de puissance ( $\Delta P_{out} = P_{out-f} - P_{out-i}$ ) et la valeur initiale de la puissance optique  $P_{out-i}$  (Figure I.4).

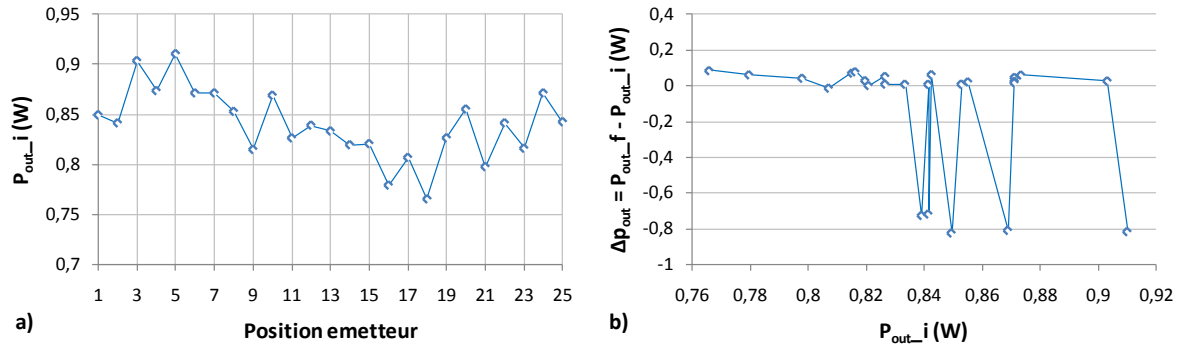


Figure I.4 - a) Variation de la puissance optique initiale en fonction de la position des émetteurs et b) mise en évidence d'une absence de corrélation  $\Delta P_{out}$ - $P_{out}$  initiale

### Evolution des paramètres $\lambda_{max}$ et DOP des émetteurs

Après le test de vieillissement, les variations des paramètres  $\lambda_{max}$  et DOP des émetteurs non dégradés n'ont montré aucune variation significative, comme l'indique la Figure I.5. En revanche, les émetteurs dégradés présentent des décalages significatifs en longueur d'onde et du DOP. En effet, suite à la dégradation catastrophique de ces émetteurs (pas d'effet laser), les mesures ont été réalisées sur l'émission spontanée et l'interprétation de ces décalages n'est plus appropriée.

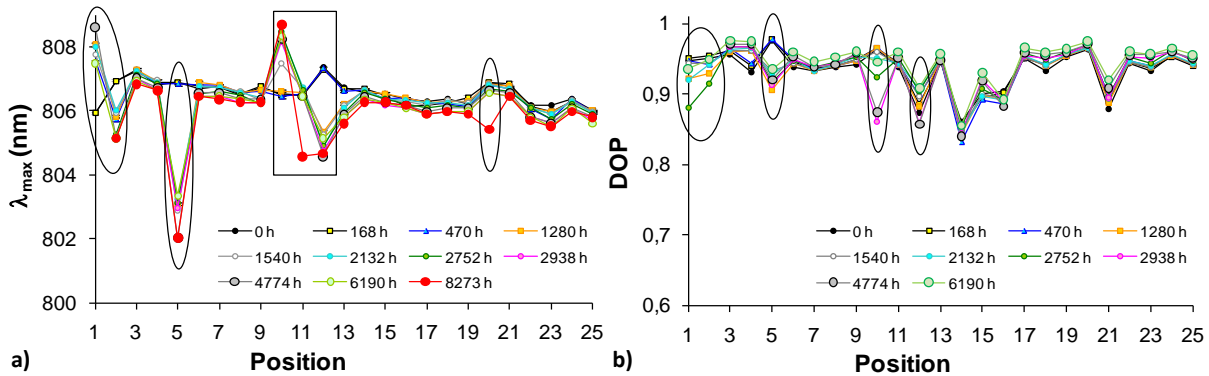


Figure I.5 - Variation de  $\lambda_{max}$  (a) et DOP (b) le long du composant standard en fonction du temps

Dans le but de mettre en place un indicateur précoce de défaillance des barrettes de DLPS QCW, la partie suivante aborde l'analyse des émetteurs dégradés en considérant simultanément les domaines de variation des paramètres spectraux et DOP mesurés avant vieillissement.

## III.2. Méthodologie d'extraction d'un indicateur précoce de défaillance

### III.2.a. Présentation de la méthodologie

Les résultats de vieillissement du composant standard montrent que la dégradation de la barrette correspond à la dégradation des émetteurs la constituant. En effet, ces émetteurs peuvent être

initialement prévus en mettant en place une méthodologie originale de sélection des émetteurs basée sur la caractérisation initiale des paramètres électro-optiques. Le but consiste à définir un critère de défaillance permettant d'évaluer la fiabilité des composants QCW. Pour cela, nous avons opté, conformément aux résultats des chapitres I et II, pour une focalisation sur les paramètres initiaux (DOP et  $\lambda_{\max}$ ) des émetteurs. En effet, nous avons vu dans le chapitre II que la gamme de température 15-45°C :

- Modifie le spectre d'émission des émetteurs.
- N'affecte pas le DOP de l'émission des émetteurs.

Cependant, dans le chapitre II, nous avons également démontré que l'application expérimentale des contraintes mécaniques sur une barrette, fonctionnant à 25°C pour 30A en QCW (100Hz/100µs), conduit à :

- Une faible évolution de la puissance optique  $P_{out}$  des émetteurs en fonction des contraintes mécaniques appliquées.
- La modification de l'allure de la courbure de la barrette "Smile" montrant ainsi que la barrette est assujettie à des niveaux plus ou moins importants de contraintes mécaniques.
- L'évolution du DOP et du décalage du spectre optique des émetteurs est fortement dépendant des contraintes mécaniques appliquées.

Le point de départ de cette méthode est présenté dans la Figure I.6. Cette dernière représente le décalage en longueur d'onde ( $\Delta\lambda_{Emetteur\_Bar} = \lambda_{\max} - \lambda_{c\_Bar}$ ) en fonction du DOP des émetteurs présents dans la barrette avant le vieillissement. L'atout de cette représentation réside dans sa facilité et sa rapidité à interpréter l'homogénéité des paramètres physiques de l'émission des émetteurs, vis à vis du couple ( $\lambda_{\max}, DOP$ ) dans un contexte de qualification industrielle. En effet, dans le cas du composant standard, on peut d'ores et déjà en déduire que les caractéristiques optiques des émetteurs ne sont pas homogènes.

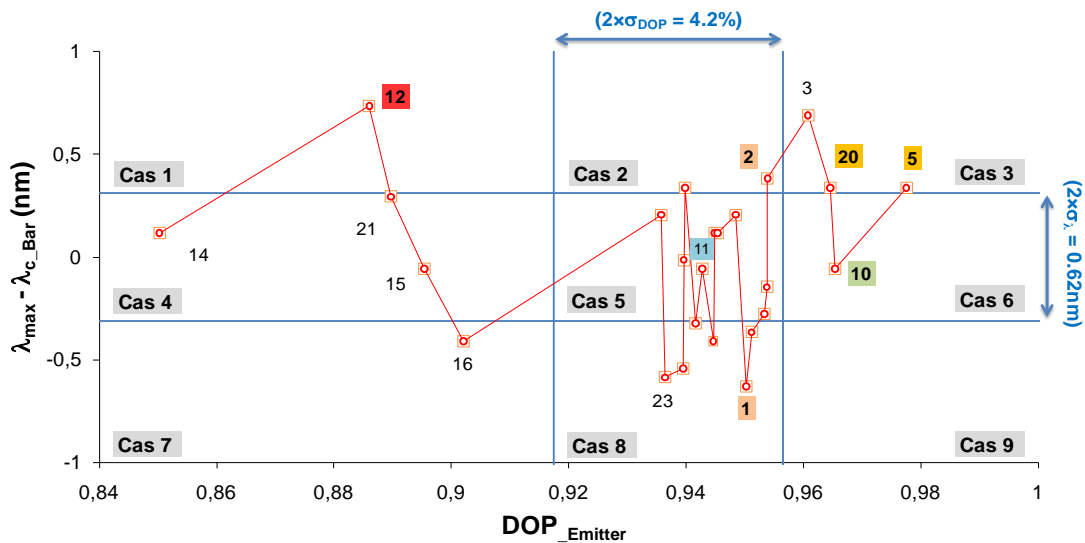
L'exploitation des données dans le plan ( $\lambda_{\max}, DOP$ ) permet de distinguer plusieurs possibilités. En effet, en considérant les écarts à la moyenne  $\delta_{\lambda}$  et  $\delta_{DOP}$ , respectivement par rapport  $\lambda_{\max}$  et DOP le long de la barrette, on positionne plusieurs groupes d'émetteurs en fonction du domaine de variations empiriques de  $\lambda_{\max}$  et du DOP, listé dans le Tableau I.3.

Condition relative à $\lambda_{\max}$		Condition relative au DOP	
a)	$\lambda_{\max} - \lambda_{c\_Bar} < -\beta \times \delta_{\lambda}$	d)	$DOP_{Em} - DOP_{bar} < -\alpha \times \delta_{DOP}$
b)	$ \lambda_{\max} - \lambda_{c\_Bar}  \leq \beta \times \delta_{\lambda}$	e)	$ DOP_{Em} - DOP_{bar}  \leq \alpha \times \delta_{DOP}$
c)	$\lambda_{\max} - \lambda_{c\_Bar} > \beta \times \delta_{\lambda}$	f)	$DOP_{Em} - DOP_{bar} > \alpha \times \delta_{DOP}$

**Tableau I.3 – Domaines de variation des paramètres  $\lambda_{\max}$  et DOP des émetteurs contribuant à établir un indicateur précoce de défaillance des composants QCW**

Les paramètres  $\lambda_{\max}$  et  $\lambda_{c\_bar}$  représentent, respectivement, la longueur d'onde centrale de l'émetteur et de la barrette,  $\alpha = 1$  et  $\beta = 1$  sont des paramètres dits "phénoménologiques",  $DOP_{Em}$  est le DOP d'un émetteur alors que  $DOP_{bar}$  représente le DOP de la barrette.

A partir de ces relations, on peut ensuite proposer un classement basé sur 9 cas potentiels comme indiqué en Figure I.6. En revanche, les émetteurs présentant initialement des défauts jugés critiques (remontée de brasure, manque de passivation et lichette de métallisation) ont été exclus de notre méthodologie puisque ces défauts conduisent invariablement à une dégradation catastrophique après l'étape de déverminage.



**Figure I.6 – Représentation des émetteurs dans le plan ( $\lambda_{\max}$ , DOP) du composant QCW mono-barrette standard avant vieillissement**

La chronologie de notre approche est à présent la suivante :

- Trier les émetteurs dans le plan ( $\lambda_{\max}$ , DOP).
- Corréler les résultats de vieillissement et les paramètres initiaux des émetteurs pour mettre en lumière les cas conduisant à une défaillance.
- Mettre en place un indicateur précoce de défaillance en se basant sur le couple ( $\lambda_{\max}$ , DOP).
- Valider l'approche proposée à travers l'étude de nouveaux composants optimisés au moyen du couple ( $\lambda_{\max}$ , DOP).

### III.2.b. Application au composant QCW standard

Pour le composant standard, nous avons listé dans le Tableau I.4 la position des émetteurs et le pourcentage d'émetteurs en fonction des cas identifiés en figure I.5 avant vieillissement. Il ressort clairement qu'une majorité d'émetteurs (32%) correspond à un cas particulier de variations (cas n°5) qui est le plus proche des paramètres globaux de la barrette soulignant la maturité de la technologie. En revanche, le cas n°8 est représentatif d'une grande partie des émetteurs (24%) ayant une valeur de



DOP proche de celle de la barrette mais émettant avec une longueur d'onde en dessous de celle de la barrette. Le reste des émetteurs (44%) est réparti sur les autres cas.

Cas		Conditions		Position dans la barrette	Pourcentage d'émetteurs/Cas
		$\lambda_{\max}$	DOP <sub>Em</sub>		
<b>1</b>	a & d	↗	↘	12	4%
<b>2</b>	a & e	↗	~	2 et 4	8%
<b>3</b>	a & f	↗	↗	3, 5 et 20	12%
<b>4</b>	b & d	~	↘	14, 15 et 21	12%
<b>5</b>	b & e	~	~	6 à 9, 11, 13, 19, et 24	<b>32%</b>
<b>6</b>	b & f	~	↗	10	4%
<b>7</b>	c & d	↘	↘	16	4%
<b>8</b>	c & e	↘	~	1, 17, 18, 22, 23 et 25	<b>24%</b>
<b>9</b>	c & f	↘	↗	---	<u>0%</u>

**Tableau I.4 - Tri des émetteurs dans le composant mono-barrette QCW standard avant vieillissement**

Cependant, après 8273h de vieillissement en contraintes échelonnées à 25°C (2752h à 100A-200Hz/200 $\mu$ s puis 5522h à 120A-125Hz/200 $\mu$ s), sept émetteurs ont mis en évidence une dégradation catastrophique. Le Tableau I.5 présente, pour chaque cas, le pourcentage des émetteurs dégradés et la signature visuelle correspondante. En revanche, nous avons constaté que trois émetteurs considérés comme dégradés ne révèlent aucune signature visuelle particulière mais peuvent être rattachés à un cas bien précis. Dans le paragraphe suivant, nous allons discuter les plausibles modes et mécanismes de défaillance relatifs aux cas exposés.

Cas	N° émetteur	Etape	Instant de défaillance	Nbre de tirs	Pourcentage des émetteurs	Signature de défaillance
-----	-------------	-------	------------------------	--------------	---------------------------	--------------------------

					dégradés / Cas	(type de défauts observés)
1	#12	1	1280h	$0,92 \times 10^9$	100%	Défauts de type "V"
2	#2	1	470h	$0,34 \times 10^9$	50%	Décollement coté P
3	#5	1	1280h	$0,92 \times 10^9$	66,7%	Pas d'observation
	#20	2	8272h	$4,47 \times 10^9$		
4	Aucun	-----	-----	-----	0%	-----
5	#11	2	8272h	$4,47 \times 10^9$	12,5%	Pas d'observation
6	#10	1	1540h	$1,11 \times 10^9$	100%	Brulure de la facette
7	Aucun		-----	-----	0%	-----
8	#1	1	470h	$0,34 \times 10^9$	16,7%	Décollement coté P
9	Aucun	-----	-----	-----	0%	-----

Tableau I.5 - Tri des émetteurs dégradés et signatures visuelles observées après vieillissement du composant standard

### III.2.c. Relation comportement (DOP, $\lambda_{\max}$ ) – mécanismes de défaillance

Pour chaque cas recensé dans le tableau I.4, nous allons proposer des hypothèses de mécanismes de dégradation des émetteurs en considérant les variations du couple  $(\lambda_{\max}, \text{DOP})$  en nous basant sur une bibliographie exhaustive.

- Cas 1 :  $\lambda_{\max} \nearrow$  et  $\text{DOP}_{\text{Em}} \searrow$  (Défauts de type "V")

Le défaut de type "V" a été observé sur la facette d'émission de l'émetteur #12 (Figure I.7). Il est apparu après 1280h de fonctionnement (durée de l'étape 1). Cet émetteur est caractérisé par un DOP faible et un décalage spectral est supérieur à +0,5nm (Figure I.6). Ceci montre la présence de contrainte additionnelles en tension et d'un échauffement important [1].

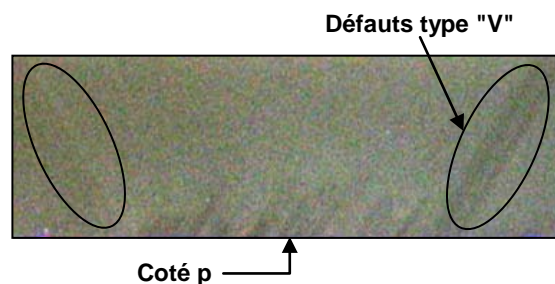
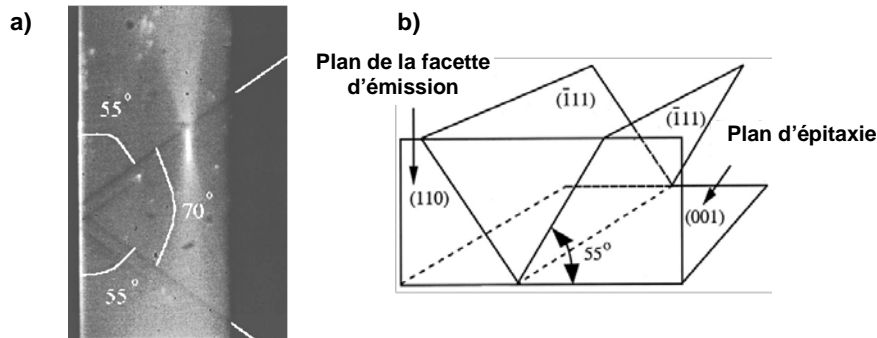


Figure I.7 - Défauts de type "V" observés sur la facette d'émission de l'émetteur #12 du composant QCW standard

Rappelons que les défauts type "V" apparaissent sur la facette d'émission de la DLP en présentant une ligne de dislocations faisant un angle d'environ  $55^\circ$  avec le plan des couches de l'épitaxie [14]. Ce nom ("V") provient du fait que l'intersection des lignes de dislocation est située au niveau du coté P de la barrette, décrivant ainsi une forme similaire à la lettre V (Figure I.8-a). Andrianov a caractérisé ces défauts avec les techniques de microscopie de photoluminescence (PLM),

d'électroluminescence et de spectroscopie de photo-courant. Comme illustré par la Figure I.8-b, l'orientation des lignes noires correspond à la propagation des défauts dans le plan cristallin (111). La formation d'un défaut type "V" est interprétée comme une relaxation d'une contrainte compressive dans le plan de l'épitaxie. Le résultat de cette contrainte conduit au mouvement des dislocations dans le plan (111) [14].

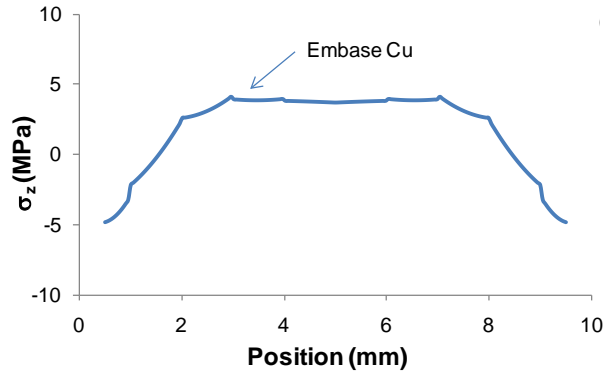


**Figure I.8 - Défaut de type "V" : a) observé par imagerie PLM<sup>7</sup> montrant les angles par rapport au plan d'épitaxie [14] et b) représentation de l'intersection des principaux plans cristallographique dans un cristal cubique [14]**

- Cas 2 :  $\lambda_{\max} \nearrow$  et  $DOP_{Em} \sim$  (Décollement côté P)

Après 470h de fonctionnement, la signature de dégradation de l'émetteur #2 est associé au décollement du contact métallique coté p. Cette dégradation s'est produite en même temps que l'émetteur #1 (cas 8). En effet, initialement le spectre optique montre un fort décalage vers les basses longueurs d'onde et un DOP de l'ordre de la valeur globale du composant. En effet, les simulations mécaniques (Figure I.9), traitées dans le chapitre III, indiquent que les deux extrémités de la barrette du composant mono-barrette assemblé sont soumises à des contraintes mécaniques en compression (-5Mpa) alors que le centre de la barrette est en tension (3MPa).

<sup>7</sup> Photoluminescence Microscopy



**Figure I.9 - Résultat de simulation de la distribution des contraintes mécaniques hydrostatiques ( $\sigma_z=1/3(\sigma_{xx}+\sigma_{yy}+\sigma_{zz})$ ) le long de la barrette d'un composant mono-barrette QCW (dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ ) au pas optique de  $800\mu\text{m}$**

Le mécanisme qui semble être à l'origine de cette dégradation correspond à l'accélération de la relaxation des contraintes mécaniques dû à l'échauffement induit par le fonctionnement menant à un décollement de la métallisation [6].

- Cas 3 :  $\lambda_{\text{max}} \nearrow$  et  $\text{DOP}_{\text{Em}} \nearrow$  (*Pas de signature visuelle*)

Les émetteurs appartenant à ce domaine de variations (#5 et #20) se sont dégradés durant les étapes 1 et 2 du test de vieillissement accéléré mais aucune signature visuelle n'a été constatée. Néanmoins initialement ces émetteurs présentaient un fort DOP ( $>0$ , en compression) associé à un décalage vers les hautes longueurs d'onde. La combinaison de ces décalages conduit à supposer que le mécanisme de dégradation est la présence de fortes contraintes mécaniques en compression ( $\text{DOP} > 0$ ) à l'interface « dissipateur coté P / barrette » et un échauffement local (décalage positif  $\delta\lambda$ ). Martin - Martin a montré au moyen d'observation par cathodoluminescence et de simulations thermomécaniques que la dégradation rapide, sans signature visuelle sur la face émissive, d'une barrette de diodes laser GaAs/AlGaAs est probablement liée à la présence d'un échauffement local augmentant les contraintes mécaniques en compression induites par l'assemblage [2].

- Cas 5 :  $\lambda_{\text{max}} \sim$  et  $\text{DOP}_{\text{Em}} \sim$  (*Pas de signature visuelle*)

Aucune signature visuelle n'a été observée sur la facette d'émission de l'émetteur #11. En revanche, cet émetteur est situé entre deux émetteurs déjà dégradé. Cette dégradation catastrophique peut être de type "Bulk" liée à la propagation des dislocations, des émetteurs voisins, dans la cavité et n'atteignant pas la facette d'émission [5].

- Cas 6 :  $\lambda_{\text{max}} \sim$  et  $\text{DOP}_{\text{Em}} \nearrow$  (*Brulure de la facette*)

La signature visuelle de dégradation de l'émetteur #10 correspond à la brûlure de la facette d'émission au niveau de la zone active. Le mécanisme de dégradation peut être l'instabilité chimique de la facette et la présence de polluants masquant l'émission laser [11, 15].

- Cas 8 :  $\lambda_{\text{max}} \searrow$  et  $\text{DOP}_{\text{Em}}$  (*décollement du contact P*)

La dégradation de l'émetteur #1 a pour signature le décollement du contact p dû à la présence d'une forte contrainte mécanique en tension [6].

- Cas 4, Cas 7 et Cas 9 (*pas de dégradation*)

Au total quatre émetteurs de la barrette remplissent les conditions des cas : 4 ( $\lambda_{\max} \sim$  et  $DOP_{Em} \searrow$ ), 7 ( $\lambda_{\max} \searrow$  et  $DOP_{Em} \searrow$ ) et 9 ( $\lambda_{\max} \searrow$  et  $DOP_{Em} \nearrow$ ). Après 8273h de fonctionnement, ces émetteurs n'ont montré aucune dégradation significative.

### III.3. Impact de l'optimisation technologique sur la fiabilité de la DLP

#### III.3.a. Description du composant optimisé

Les résultats obtenus sur le composant standard nous ont conduit à réaliser une étude sur un nouveau composant mono-barrette QCW que nous nommerons "composant optimisé" et ceci à travers l'amélioration de l'homogénéité des paramètres des émetteurs de la barrette dans le plan  $(\lambda_{\max}, DOP)$ . Cette optimisation a particulièrement porté sur la structure interne de la barrette mais pour des raisons de confidentialité, la structure interne des barrettes ne peut être décrite dans ce mémoire. Une nouvelle génération de barrettes de diodes laser (25 émetteurs) a été utilisée en vue d'obtenir une durée de vie supérieure à  $10 \times 10^9$  tirs. En effet, la structure interne de cette barrette permet d'émettre suivant le mode TE à 808nm pour 100W optique en régime QCW (100Hz/200 $\mu$ s) avec un DOP global de l'ordre de 0,98 supérieur au DOP globale du composant standard ( $\sim 0.93$ ) étudié précédemment. L'objectif de ce composant optimisé est d'évaluer la stabilité émetteurs dans le cas n°5 après vieillissement.

##### III.3.a.1. Paramètres électro-optiques initiaux des émetteurs

La Figure I.10 présente les caractéristiques initiales de chaque émetteur dans la barrette pour un courant de 30A-100Hz/100 $\mu$ s à 25°C. On obtient un écart moyen du  $P_{out}$  de 40mW le long de la barrette (Figure I.10-a) en rejetant l'émetteur #25. En effet, cet émetteur présente un défaut initial correspondant à une remontée de brasure, lié au processus de report, qui masque l'émission de la lumière et qui sera à l'origine de sa dégradation catastrophique par emballement thermique, après seulement quelques heures de fonctionnement.

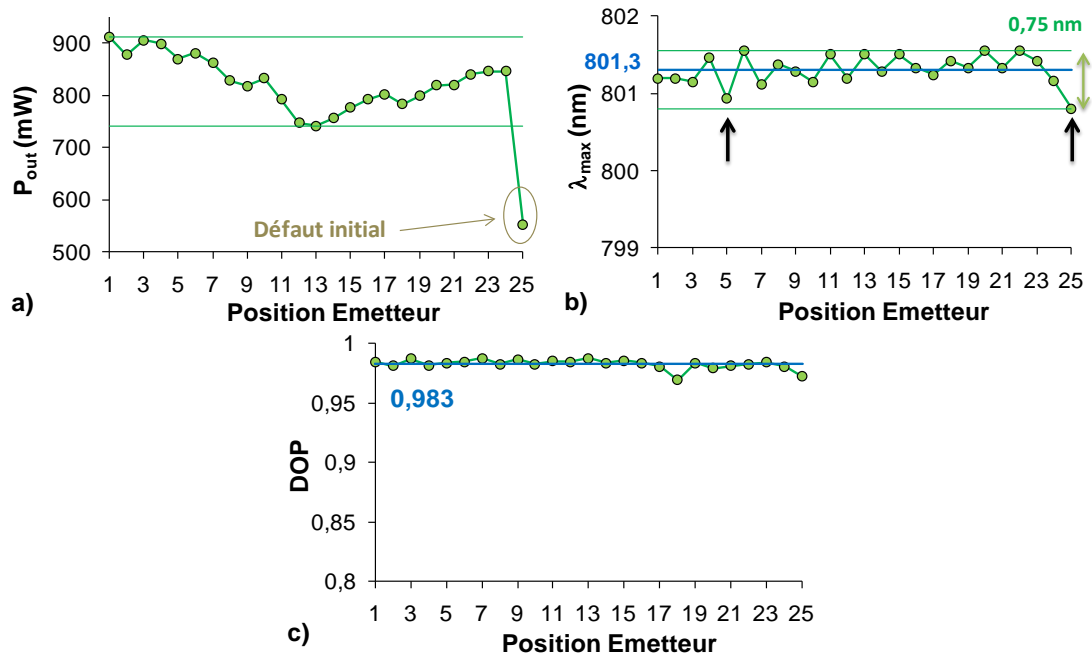


Figure I.10 - Paramètres :  $P_{out}$  (a),  $\lambda_{max}$  (b) et DOP (c) le long de la barrette du composant optimisé pour 30A-100Hz/100 $\mu$ s à 25°C avant vieillissement

### III.3.a.2. Estimation de la variabilité technologique initiale

En s'attachant à considérer le couple ( $\lambda_{max}$ , DOP), l'homogénéité des émetteurs a été clairement améliorée (Figure I.11) avec des écart à la moyenne  $\delta_\lambda$  et  $\delta_{DOP}$  très faibles par rapport au composant standard (réduction d'un facteur 2 pour  $\delta_\lambda$  et d'un facteur 7 pour  $\delta_{DOP}$ ). Notons que la majorité des émetteurs se positionne essentiellement dans le cas n°5 et qu'aucun émetteur n'appartient au cas n°1 image de la présence potentielle de dislocations cristallines (défauts de type "V").

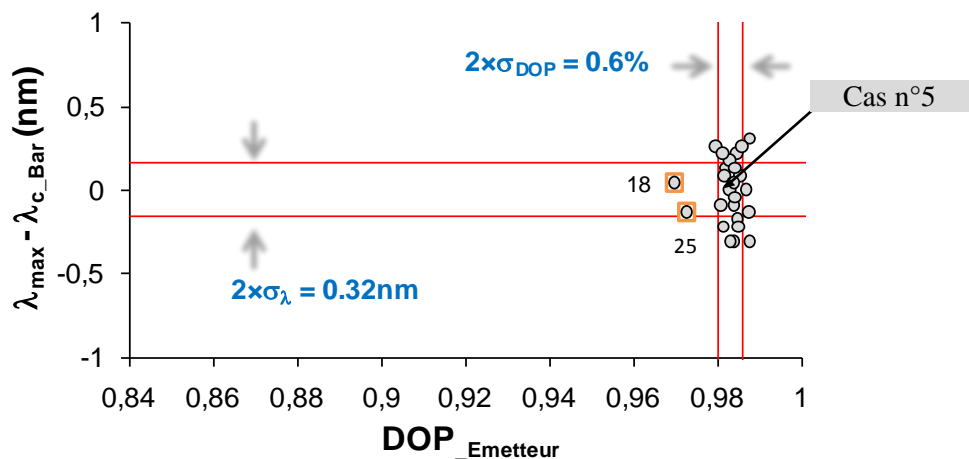


Figure I.11 - Représentation des émetteurs du composant mono-barrette optimisé dans le plan ( $\lambda_{max}$ , DOP)

Par la suite, nous allons analyser l'impact du vieillissement en courant sur ce composant optimisé afin de valider la méthodologie de sélection décrite auparavant.

### III.3.b. Validation de la méthodologie de sélection

#### III.3.b.1. Conditions de vieillissement accéléré

Pour valider le critère de défaillance défini auparavant, nous avons soumis le composant optimisé à un test de vieillissement accéléré sous contraintes échelonnées (Tableau I.6) quasiment identique à celui appliqué sur le composant "standard". En effet, pour ce composant, la première étape du test a duré 2283h au lieu de 2752h pour le composant standard.

Etape	Courant	Régime QCW	Rapport cyclique	Température	Durée	Nbre de tirs
1	100A	200Hz/200 $\mu$ s	4%	25°C	2283h	1,64 $\times 10^9$
2	120A	125Hz/200 $\mu$ s	2,5%	25°C	5522h	2,48 $\times 10^9$

Tableau I.6 - Conditions de vieillissement accéléré du composant mono-barrette QCW optimisé

#### III.3.b.2. Résultats du test de vieillissement

##### *Caractéristiques globales du composant*

Pour un courant de 30A en QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C, la Figure I.12 présente l'impact du vieillissement sur le composant optimisé. Cette dernière, montre l'évolution de la puissance optique, la longueur d'onde centrale et la largeur à mi-hauteur du spectre optique en fonction du temps.

Après les premières heures de fonctionnement, on observe une baisse de la puissance optique globale atteignant 5%. Ceci est le résultat de la dégradation catastrophique de deux émetteurs (#24 et #25). Cette dégradation est causée par la présence initiale d'une remontée de brasure (coté P) sur la facette d'émission de l'émetteur #25. La destruction (fusion) de ce dernier a entraîné la dégradation catastrophique de l'émetteur en position 24 par effet thermique. L'emballement thermique à l'interface zone active au niveau de la facette d'émission et la remontée de brasure constitue une hypothèse de mécanisme de dégradation [16]. Cette dernière constitue un centre d'absorption des photons menant à une forte augmentation de la température au niveau de la facette d'émission. Cependant, cette dégradation ne sera pas gênante dans la suite de l'étude puisque notre approche sera appliquée sur la population des composants intègres (au total 23 émetteurs). Après 7805h de fonctionnement (4,13 $\times 10^9$  tirs), la puissance optique globale est quasiment constante (Figure I.12-a) et les propriétés spectrales n'ont montré aucune variation significative ( $\sim 0,1$ nm).

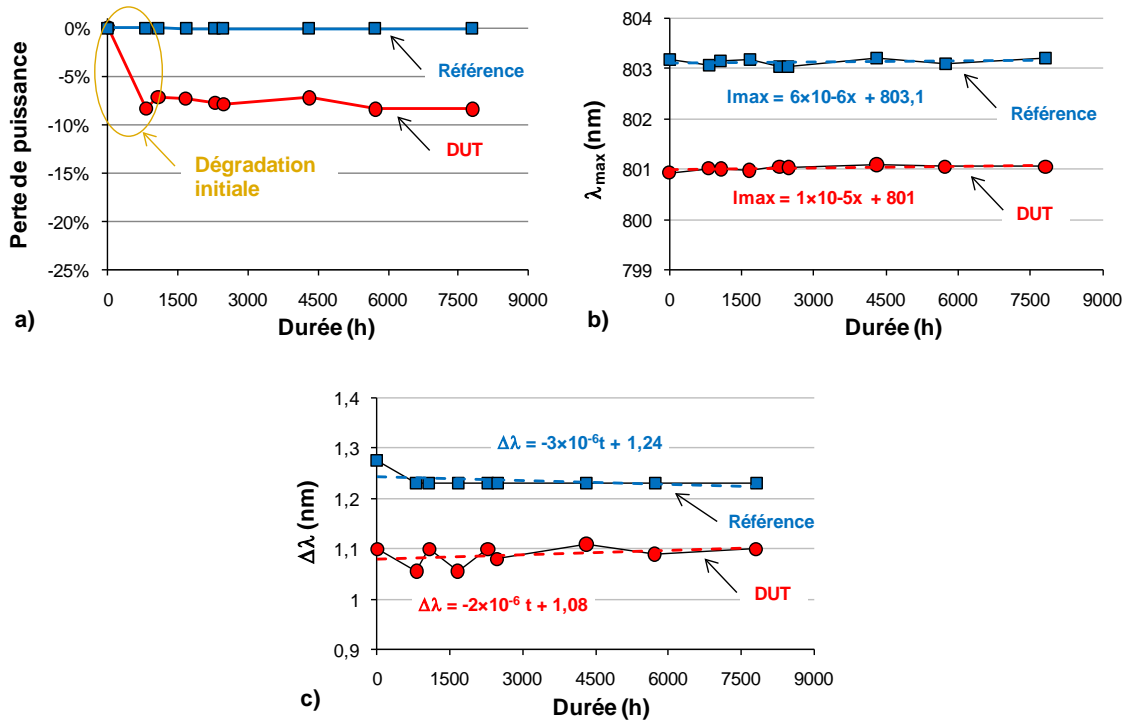


Figure I.12 – Dérives observées en vieillissement des paramètres électro-optiques du composant optimisé

*Comportement individualisé des émetteurs de la barrette*

De façon identique au composant standard, nous avons procédé à un suivi de chaque émetteur pendant le test de vieillissement. Les points de la caractérisation sont donnés dans le Tableau I.7.

	$t_0$	Etape 1 (100A-200Hz/200µs)					Etape 2(120A-125Hz/200µs)			
Mesure	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	
Nombre de tirs ( $\times 10^9$ )	0	0,58	0,77	1,19	1,64	1,73	2,55	3,19	4,13	
Durée (h)	0	810	1070	1662	2283	2470	4305	5721	7805	

Tableau I.7 – Définition des points de reprise du composant optimisé et équivalence durée - nombre de tirs

La Figure I.13 présente les courbes de vieillissement des émetteurs montrant l'évolution du  $P_{out}$  dans le temps. Après  $4,13 \times 10^9$  tirs, aucune dégradation rapide ou catastrophique n'a été mis en lumière. En revanche, l'émetteur position #5 qui est située à la limite du "cas  $8\lambda$  ( $\lambda_{max} \searrow$  et  $DOP_{Em}$  : décollement contact P) montre un mode de dégradation graduel entrainant une baisse de 20% du  $P_{out}$  qui est difficile à révéler lorsqu'on caractérise le champ proche de la barrette complète.



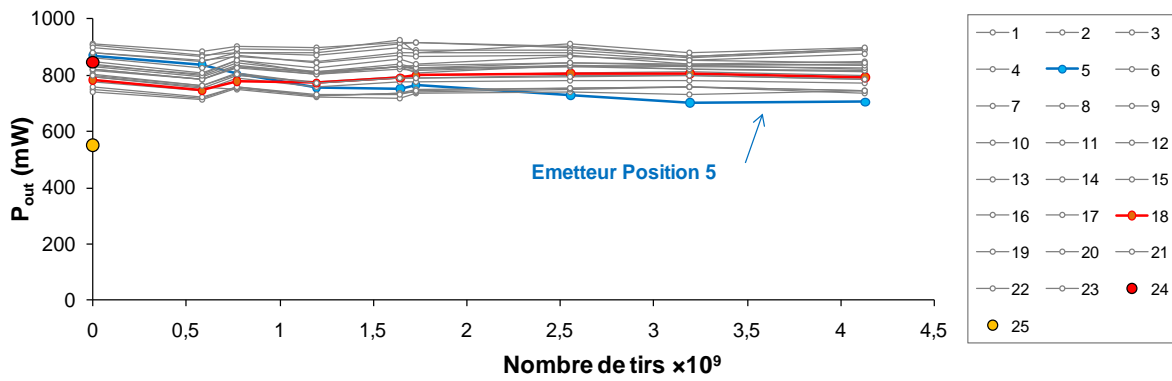


Figure I.13 – Variations de la puissance optique des émetteurs du composant optimisé en fonction de la durée de vieillissement

L'évolution de la puissance optique de l'émetteur #5 en fonction du nombre de tirs est présentée dans la Figure I.14. Le mode de dégradation de cet émetteur est graduel mais il peut être scindé en deux phases :

- Une première dégradation de l'ordre de 12,5% après  $1,2 \times 10^9$  tirs suivi d'une stabilisation jusqu'à la fin de l'étape 1 ( $1,64 \times 10^9$  tirs),
- La seconde dégradation est observée pour atteindre une baisse de 20% de la puissance optique après  $3,2 \times 10^9$  tirs, suivi d'une stabilisation jusqu'à la fin de l'étape 2.

Cette dégradation est fortement liée à l'amplitude et la fréquence du courant injecté dans la barrette. On peut conclure que cet émetteur (#5) présente initialement un décalage négatif de la longueur d'onde centrale et un DOP identique à celui de la barrette globale qui le situe plus au moins dans le cas n°8.

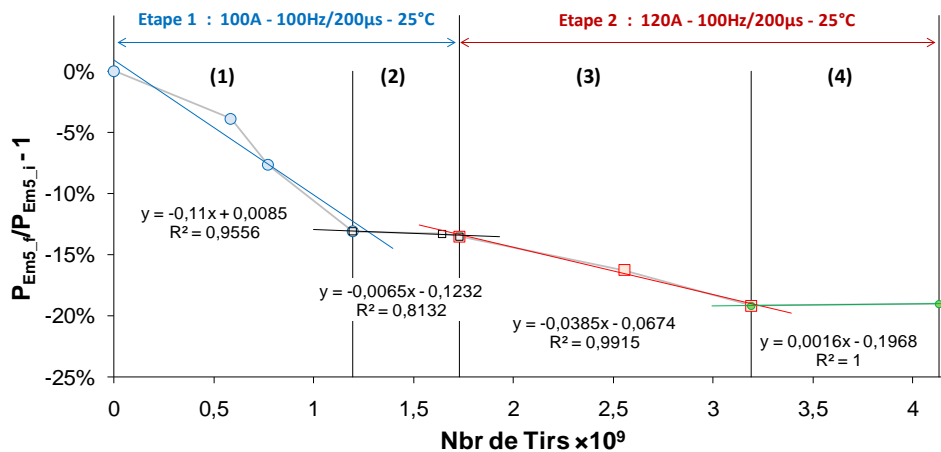
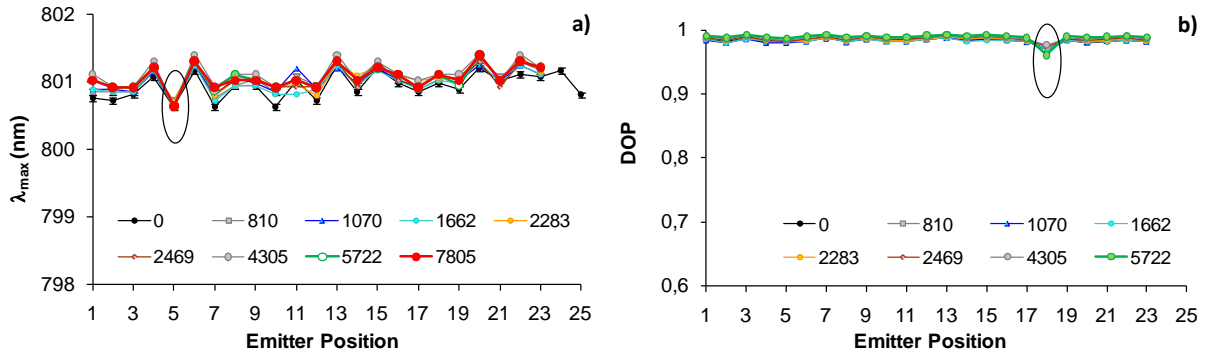


Figure I.14 - Variations de la puissance optique de l'émetteur #5 issu du composant optimisé

La Figure I.15 présente le profil de variations, le long du composant optimisé, de  $\lambda_{max}$  et du DOP, à différents instants de reprise de mesure. Aucune variation significative n'a été observée après  $4,13 \times 10^9$  tirs. Cette observation est en accord avec notre critère de défaillance défini précédemment puisque l'ensemble des émetteurs remplissent les conditions des cas n°4 et 5 dans le plan  $(\lambda_{max}, DOP)$ .



**Figure I.15 - Variations des paramètres  $\lambda_{\max}$  (a) et du DOP (b) pour chaque émetteur du composant optimisé**

### III.4. Synthèse

L'analyse des résultats de vieillissement d'un composant mono-barrette QCW a permis de mettre en place une méthodologie originale de tri individualisé des émetteurs pour évaluer leur fiabilité opérationnelle. Les défaillances observées sur les émetteurs après vieillissement ne présentent pas, la plupart du temps, de signatures visuelles évidentes.

Cette méthodologie se base sur la valeur initiale de paramètres électro-optiques initiaux des émetteurs. Nous avons démontré que les valeurs initiales (caractérisées à  $t=0$ ) du couple  $(\lambda_{\max}, \text{DOP})$  des émetteurs de la barrette constituent un critère de défaillance pertinent accessible dans un contexte de qualification industrielle. Parallèlement, les actions de stabilisation technologique de l'homogénéité de ce couple ont clairement contribué en l'amélioration des performances des DLPs fonctionnant en régime QCW ainsi que leur fiabilité puisque aucun émetteur n'a été défaillant après 7500h (ou  $4,1 \times 10^9$  tirs) de vieillissement et la majorité des émetteurs appartient au cas n°5. A titre de comparaison, rappelons que pour le composant standard, dès 1500h, nous avons observé une diminution de l'ordre de 15% de la puissance optique mesurée globalement et avant d'atteindre  $1 \times 10^9$  tirs, avec quasiment 20% des émetteurs qui ont subi une dégradation catastrophique.

Parallèlement, nous avons attribué aux lignes de dislocations, traités dans plusieurs travaux [14,17,18], appelé défauts "type V", apparentes sur la face émissive, les paramètres  $\lambda_{\max}$  et DOP des émetteurs dans le cas 1 : une émission laser caractérisée par un décalage positif du spectre optique ( $> +0,5\text{nm}$ ) et un DOP faible par rapport à l'émission globale de la barrette.

Dans la suite de ce mémoire, nous allons décrire et analyser l'applicabilité de cette méthodologie aux composants de type "Stack" QCW avec comme objectif d'optimiser le processus d'assemblage "SEB" au moyen du couple  $(\lambda_{\max}, \text{DOP})$ .

## IV. Optimisation et évaluation des Stacks QCW

Dans ce paragraphe, nous allons étudier plusieurs configurations de Stacks QCW (composants constituées de plusieurs barrettes empilées) en se focalisant en particulier sur la corrélation entre le

processus de report du côté p de la barrette sur son dissipateur (ensemble appelé SEB) et l'évolution du couple ( $\lambda_{\max, DOP}$ ) de chaque émetteur.

## IV.1. Description des Stacks QCW

### IV.1.a. Technologie des Stacks étudiés

Cette partie s'attache à étudier et optimiser des Stacks QCW avec un pas optique de  $400\mu\text{m}$  au travers de la caractérisation des émetteurs. Pour cela, nous allons utiliser l'indicateur précoce de défaillance, proposé précédemment pour les composants mono-barrettes QCW, afin à la fois de contribuer à améliorer leurs performances électro-optiques intrinsèques et évaluer la fiabilité opérationnelle de ce type de composants.

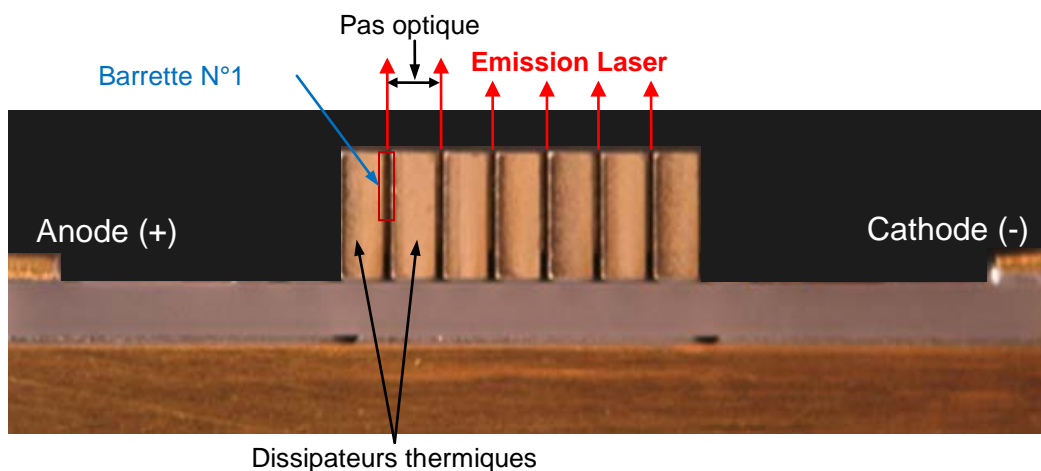


Figure I.16 – Vue optique générale d'un composant en configuration "Stack" QCW à 6 barrettes

Dans un premier temps, nous allons caractériser tous les émetteurs d'un premier Stack constitués de 6 barrettes et monté avec des SEBs réalisés suivant un processus de report standard ( $V_0$ ). Dans ce Stack, des défauts type "boules de brasure" ont été observés à l'interface " côté P de la barrette/dissipateur CuW" (SEB) et pouvant atteindre  $\sim 30\mu\text{m}$  de sur-plan par rapport à la face émissive des barrettes. Ces défauts de brasure sont liés à des problèmes de mouillabilité lors du report SEB et ont été observés sur un lot de Stacks réalisés suivant un même processus de report " $V_0$ " des SEBs. De manière identique aux composants en mono-barrette, les Stacks ont révélé des dégradations catastrophiques à  $t_0$  lors du test de l'application finale. Cependant, notre étude sera effectuée sur un Stack (AD33075) issu de ce lot et qui a présenté des performances électro-optiques acceptables ( $100\text{W}/\text{bar}$ ).

La 1<sup>ère</sup> étape d'assemblage des Stacks, décrite dans le chapitre I, nécessite une optimisation et pour cela, il est primordial d'améliorer le montage des SEBs en adaptant les conditions du cycle de brasage. Pour des raisons de confidentialité, l'outillage et l'allure du cycle de report ne peuvent pas être détaillés dans ce manuscrit. Cependant, nous nous focaliserons sur les trois principaux paramètres caractérisant un cycle de report que sont :

- la température maximum du cycle ( $T_{br}$ ),
- la pression (compression isostatique) appliquée pendant la fusion de la brasure ( $P_{br}$ ),
- la durée du palier de fusion de la brasure ( $t_{br}$ ).

Au travers du relevé des paramètres initiaux de chaque émetteur, nous allons évaluer l'influence des processus de report des SEBs sur la fiabilité opérationnelle du Stack. L'étude des Stacks s'effectuera en trois étapes résumées dans le Tableau I.8 :

- la première étape concerne l'optimisation de la réalisation des SEBs,
- la deuxième réside en la caractérisation électro-optique et le contrôle visuel,
- la dernière partie traite du vieillissement des Stacks sous contraintes accélérées.

Etape	Description	Caractéristique	Paramètre	Valeurs/Actions				
<b>I</b>	1	Barrette	808nm	Nbre d'émetteurs	25			
	2	Dissipateur	$Cu_{90}W_{10}$	Epaisseur	250 $\mu$ m			
	3	Fabrication SEB	Cycle de Brasage	$T_{br}$ $P_{br}$ $t_{br}$	330 - 341°C 200 - 600g 15 - 25s			
	4	Stack	Pas optique : 400 $\mu$ m	Nbre de Barrettes	4 à 6			
<b>II</b>	1	Contrôle Visuel	Microscope optique	$\times 500$	Défauts initiaux ( $t_0$ )			
	2	Caractérisation E-O	Globale (Banc T1)	M : EO <sup>8</sup>	Mesure initiale (M1)			
	3	Emetteur Individuel	Banc E/E	$P_{out} / DOP / \lambda_{max}$	$t_0$			
<b>III</b>	1	Vieillissement (110A à 25°C)	Régime QCW	Frq (Hz) $t_p$ ( $\mu$ s)	100 200	20 1000	200 200	111 400
	2	Caractérisation E-O	Globale (Banc T1)	M : EO	Mesure de reprise (M 1+m)			
	3	Contrôle Visuel	Microscope optique	$\times 500$	Défauts après vieillissement ( $t_0+nh$ )			
	4	Emetteur Individuel	Banc E/E	$P_{out} / DOP / \lambda_{max}$	$t_0+nh$			

**Tableau I.8 - Description des étapes relatives à l'analyse de l'influence des montages SEB sur la fiabilité opérationnelle des Stacks**

#### IV.1.b. Influence des conditions de report utilisées

Les Stacks réalisés avec des SEBs assemblés suivant différents cycles de brasage se présentent sous la forme suivante :

- Le premier Stack étudié « AD33075 » est constitué de SEBs réalisés avec le processus de report SEB V0, comme détaillé dans le chapitre II. Rappelons que ce Stack est constitué de 6 barrettes issues de la même plaque.
- Le deuxième Stack « AD33020 » est constitué de SEBs assemblés avec différents paramètres :  $T_{br}$  (température maximum du cycle) et  $t_{br}$  (durée du palier du cycle), en utilisant une pression de maintien ( $P_{br}$ ) identique à celle utilisé pour le premier Stack (600g). Ce Stack est composé

<sup>8</sup> Mesure des caractéristiques électro-optiques globales du composant

de 6 barrettes issues de la même plaque (Tableau I.9). Notons que les barrettes #2 et #6 ont été reportées avec les mêmes paramètres du cycle de brasage. Ceci va nous permettre d'évaluer l'impact de la position de la barrette au sein du Stack.

Barrette N°	Plaque	Cycle de brasage			
		T <sub>br</sub> (°C)	t <sub>br</sub> (s)	P <sub>br</sub> (g)	Version
1	A1	341	18	600	V1
2		338	15		V2
3		335	15		V3
4		331	18		V4
5		341	15		V5
6		338	15		V2

Tableau I.9 - Paramètres technologiques du processus de réalisation des SEBs du Stack AD33020

- Le troisième Stack « AD33019 » est constitué de SEBs assemblés en utilisant les paramètres du Tableau I.10. Ce Stack est composé de 4 barrettes issues de la même plaque.

Barrette N°	Plaque	Cycle de brasage			
		T <sub>br</sub> (°C)	t <sub>br</sub> (s)	P <sub>br</sub> (g)	Version
1	A1	338	15	600	V2
2				450	V6
3				300	V7
4				200	V8

Tableau I.10 - Paramètres technologiques du processus de réalisation des SEBs du Stack AD33019

#### IV.1.b.1. Paramètres électro-optiques initiaux et globaux des Stacks

Les mesures électro-optiques globales des Stacks ont été effectuées en mode QCW : 100Hz/200µs à 25°C pour un courant de 100A. Le Tableau I.11 liste les principaux paramètres électro-optiques initiaux (à t = 0h) et associé à chaque configuration de Stack. On en déduit que les caractéristiques de ces trois Stacks sont quasi-homogènes et ne présentent aucune anomalie apparente avant vieillissement.

Paramètre/Stack	AD33075	AD33020	AD33019
$V_d$ (V)	10,94	10,92	7,26
$\lambda_{\max}$ (nm)	802,0	803,4	802,8
$\Delta\lambda$ (nm)	2,5	2,3	2,1
$I_{th}$ (A)	15,4	14,7	14,6
$\eta$ (W/A)	7,24 (1,20/bar)	7,20 (1,20/bar)	4,87 (1,21/bar)
Rnd EO <sup>9</sup> (%)	55,8%	56,1%	57,0%
$R_s$ (m $\Omega$ )	13,6 (2,27/bar)	12,9 (2,15/bar)	8,4 (2,1/bar)
$P_{out}$ (W)	684,9 (114,14/bar)	686,16 (114,36)	464,60 (116,15)

**Tableau I.11 - Principaux paramètres électro-optiques initiaux des Stacks étudiés en régime QCW (100Hz/200 $\mu$ s) à 25°C-100A**

#### IV.1.b.2. Paramètres électro-optiques initiaux des émetteurs de chaque Stack

La caractérisation des émetteurs est effectuée en régime QCW (100Hz/100 $\mu$ s) pour 30A à 25°C. Les paramètres  $P_{out}$ , DOP et  $\lambda_{\max}$  de chaque émetteur sont présentés en fonction de la position dans chaque barrette constituant le Stack. Rappelons que les résultats de mesure initiales des émetteurs du Stack AD33075 ont été présentés dans le chapitre II.

- Stack AD33020

Les Figure I.17-a et -b montrent que les valeurs de  $P_{out}$  et le DOP sont faibles dans l'extrémité droite de l'ensemble des barrettes (émetteurs position #23, 24 et 25). En revanche, la longueur d'onde centrale varie peu mais présente un décalage vers les hautes longueurs d'onde dans le rouge pour les émetteurs en position #23, 24 et 25 (barrettes n°4, 5 et 6), de l'ordre de +1nm et cela quel que soit le processus de report utilisé. On constate donc que les variations de ces paramètres en fonction de la position des émetteurs ne sont pas homogènes après les cycles de report SEB utilisés, mais on remarque une amélioration de l'homogénéité des émetteurs lorsqu'on réduit la durée du cycle de brasage ( $t_{br} = 15s$ ) en fixant  $T_{br}$  à 338°C correspondant en particulier aux barrettes N°2 et N°6 assemblées avec le processus de montage SEB V2 (Tableau I.9).

<sup>9</sup> Rendement électro-optique pour un courant donné avec  $Rnd = P_{out}/(I \times V)$ .

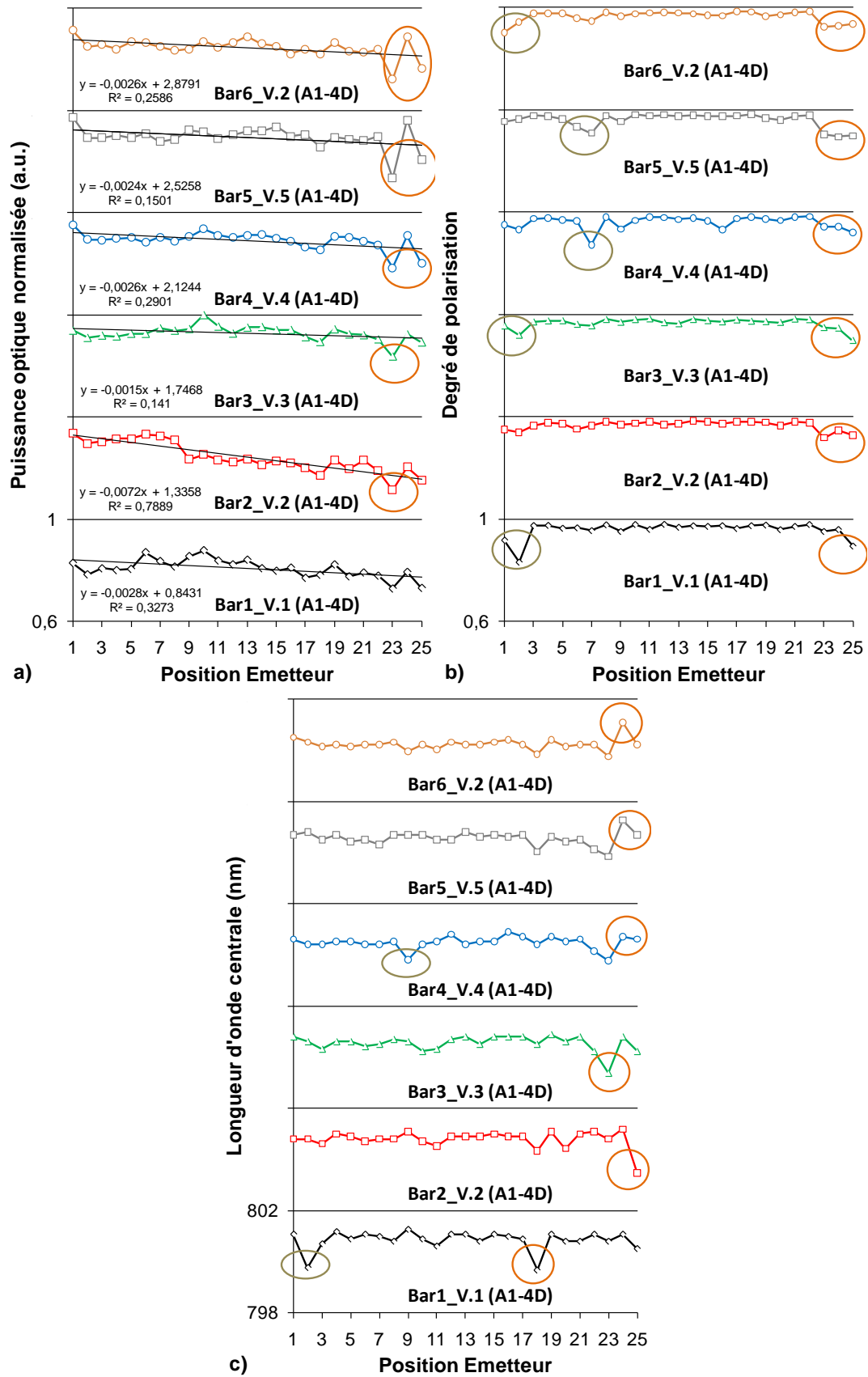


Figure I.17 - Distribution des paramètres électro-optiques le long de chaque barrette dans le Stack AD33020:  $P_{out}$  normalisé (a), DOP (b) et  $\lambda_{max}$  (c)

Les écarts à la moyenne  $\delta_{DOP}$  et  $\delta_{\lambda}$ , respectivement du DOP et  $\lambda_{max}$  le long des barrettes du Stack AD 33020 sont listés dans Tableau I.12. De faibles valeurs sont obtenues pour les barrettes N°2 et N°6 du processus de microassemblage barrette version V2 ( $T_{br} = 338^{\circ}C$ ,  $t_{br} = 15s$  et  $P_{br} = 600g$ ), montrant ainsi une bonne homogénéité des émetteurs les constituant.

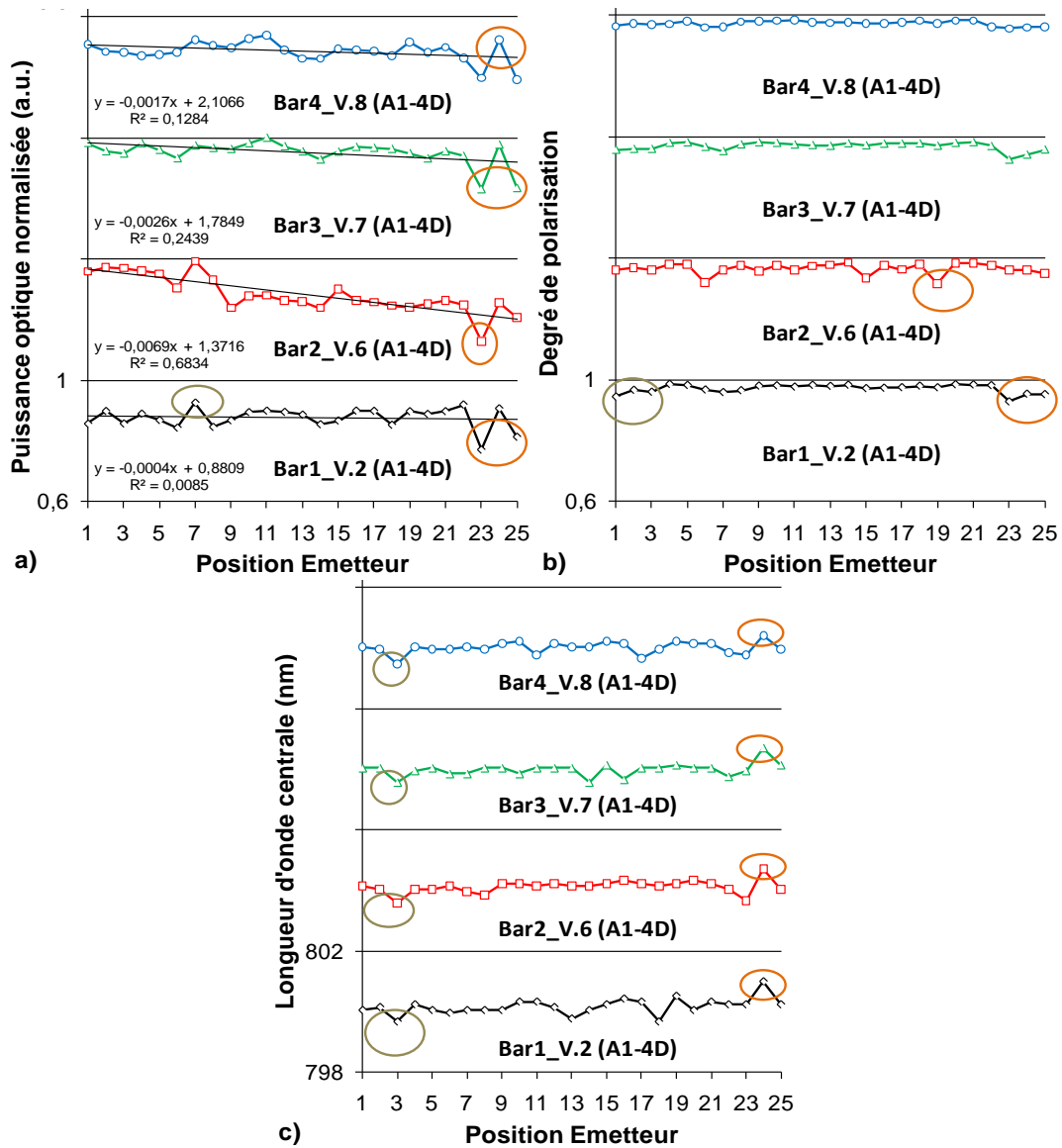
Barrette N°	AD33020					
	1	2	3	4	5	6
Version	V1	<b>V2</b>	V3	V4	V5	<b>V2</b>
$\delta_{DOP}$ (%)	2,0	<b>1,3</b>	1,4	2,0	2,2	<b>1,7</b>
$\delta_{\lambda}$ (nm)	0,25	<b>0,22</b>	0,22	0,17	0,20	<b>0,14</b>

**Tableau I.12 – Ecart à la moyenne du DOP et  $\lambda_{max}$  ( $\delta_{DOP}$  et  $\delta_{\lambda}$ ) des émetteurs dans chaque barrette constituant le Stack AD33020 étudiés pour 30A en QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C**

- Stack AD33019

La Figure I.18 illustre les variations de  $P_{out}$ , DOP et  $\lambda_{max}$  des émetteurs le long de chaque barrette du Stack AD33019. Si on compare ces résultats à ceux obtenus pour le Stack précédent (AD33020), nous pouvons observer une très bonne homogénéité des paramètres DOP et  $\lambda_{max}$  pour les barrettes N°3 et N°4 correspondant aux processus V7 et V8 (338°C/15s/300g et 200g). On confirme également la forte homogénéité des paramètres électro-optiques caractérisés initialement avec le processus V2 (Tableau I.13).





**Figure I.18 - Distribution des paramètres électro-optiques le long de chaque barrette dans le Stack AD33019:  $P_{out}$  normalisé (a), DOP (b) et  $\lambda_{max}$  (c)**

Les écarts à la moyenne  $\delta_{DOP}$  et  $\delta_{\lambda_s}$ , respectivement du DOP et  $\lambda_{max}$  le long des barrettes du Stack AD 33019 sont listés dans le Tableau I.13. De faibles valeurs sont obtenues pour les barrettes N°3 et N°4 du processus de microassemblage barrette respectivement version V7 ( $T_{br} = 338^\circ\text{C}$ ,  $t_{br} = 15\text{s}$  et  $P_{br} = 200\text{g}$ ) et V8 ( $T_{br} = 338^\circ\text{C}$ ,  $t_{br} = 15\text{s}$  et  $P_{br} = 300\text{g}$ ), montrant ainsi une bonne homogénéité des émetteurs les constituant.

Barrette N°	AD33019			
	1	2	3	4
Version	V2	V6	V7	V8
$\delta_{DOP}$ (%)	1,1	1,4	1,0	0,7
$\delta_\lambda$ (nm)	0,20	0,15	0,15	0,15

Tableau I.13 – Ecart à la moyenne du DOP et  $\lambda_{max}$  ( $\delta_{DOP}$  et  $\delta_\lambda$ ) des émetteurs dans chaque barrette constituant le Stacks AD33019 étudiés pour 30A en QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C

## IV.2. Analyse des résultats avant vieillissement

L'analyse des caractéristiques initiales des émetteurs est focalisée sur le couple ( $\lambda_{max}$ ,DOP). Le tracé du couple ( $\lambda_{max}$ ,DOP) permet une distinction rapide des émetteurs ayant une caractéristique atypique. Nous avons vu précédemment que l'homogénéité de ce couple présente un précurseur pertinent de la fiabilité des composants mono-barrette QCW. Dans une configuration de type Stack, nous allons utiliser le couple ( $\lambda_{max}$ ,DOP), extrait pour chaque Stack, afin :

- dans un premier temps, de valider notre approche en soumettant ces composants à un test de vieillissement jusqu'à  $1 \times 10^9$  tirs à 25°C pour un courant de 110A crête et différents régimes QCW,
- et dans un second temps, d'évaluer la fiabilité opérationnelle de ces Stacks.

### IV.2.a. Répartition des signatures visuelles de dégradation prématurée

Avant de débiter les tests de vieillissement, il est impératif d'effectuer un contrôle visuel de la facette d'émission de chaque barrette constituant les différents Stacks étudiés afin de relever les défauts initialement présent dans les Stack et pour ne pas perturber notre analyse. Le nombre de défauts visuels ainsi que leur nature sont répertoriés en Figure I.19 pour chaque Stack. Ces défauts ont été observés essentiellement par voie optique et décrits dans la figure II.9 du Chapitre II.

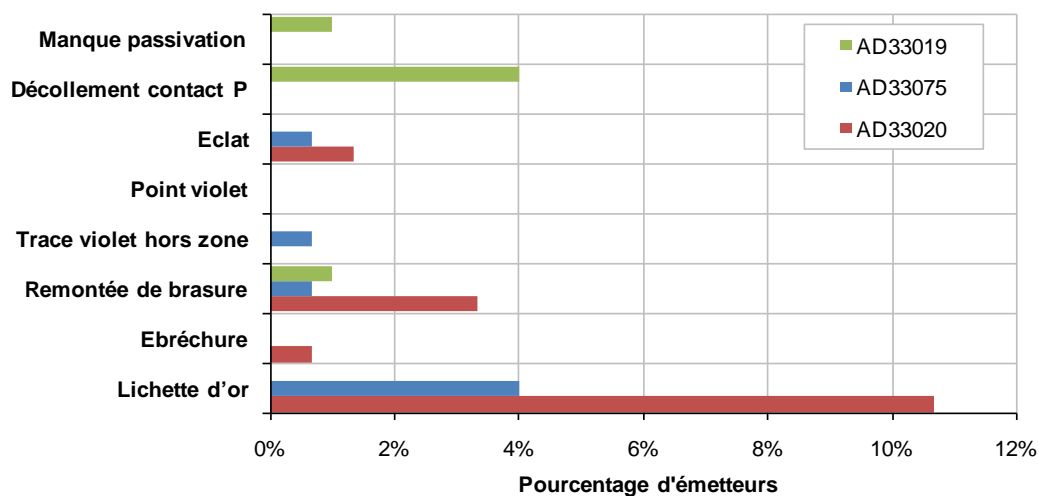
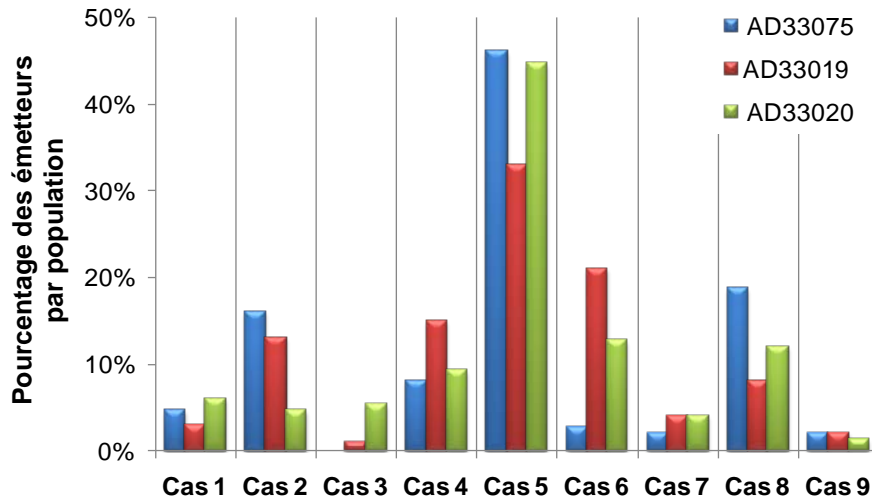


Figure I.19 - Défauts visuels initialement présents après les phases d'assemblage SEB au niveau de la facette d'émission des émetteurs des trois Stacks étudiés

**IV.2.b. Répartition des émetteurs dans le plan ( $\lambda_{max}, DOP$ )**

La Figure I.20 présente le pourcentage des émetteurs présents dans chaque Stack et remplissant l’une des conditions de tri correspondant aux domaines de variations défini précédemment pour la technologie mono-barrette QCW (Cf. Tableau I.3). Dans le cas des trois Stacks étudiés, on constate que l'ensemble des cas est adressé puisque une population d'émetteurs couvre le 9<sup>ème</sup> cas, non couvert avec les composants en mono-barrette.



**Figure I.20 - Pourcentage des émetteurs remplissant les différents cas de variations du couple ( $\lambda_{max}, DOP$ ) dans les trois Stacks étudiés**

Des faibles valeurs des écarts à la moyenne  $\delta_{DOP}$  et  $\delta_{\lambda}$ , respectivement du DOP et  $\lambda_{max}$  le long de la barrette, sont obtenues pour les barrettes N°3 et N°4 du Stack AD33019, montrant ainsi une bonne homogénéité des émetteurs les constituant. Le Tableau I.15 liste des écarts moyens  $\delta_{DOP}$  et  $\delta_{\lambda}$  des émetteurs dans chaque barrette constituant les Stacks.

	AD33075						AD33020						AD33019			
Bar N°	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
Version	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V2	V2	V6	V7	V8
$\delta_{DOP}$ (%)	4,6	3,6	4,2	3,8	3,6	4,2	2,0	1,3	1,4	2,0	2,2	1,7	1,1	1,4	1,0	0,7
$\delta_{\lambda}$ (nm)	0,15	0,15	0,22	0,33	0,24	0,24	0,25	0,22	0,22	0,17	0,20	0,14	0,20	0,15	0,15	0,15

**Tableau I.14 – Ecart à la moyenne du DOP et  $\lambda_{max}$  ( $\delta_{DOP}$  et  $\delta_{\lambda}$ ) des émetteurs dans chaque barrette constituant les trois Stacks étudiés pour 30A en QCW (100Hz/100µs) à 25°C**

**IV.2.c. Caractéristiques ( $\lambda_{max}, DOP$ ) globales des barrettes**

Le DOP et la longueur d’onde centrale ( $\lambda_c$ ) de chaque barrette dans les Stacks sont donnés dans le Tableau I.15. On observe que les caractéristiques des barrettes ne dépendent pas de la position dans le Stack. Aussi, nous avons amélioré les paramètres électro-optiques des barrettes en passant du processus V0 à V8.

	AD33075						AD33020						AD33019			
Bar N°	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
Version	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V2	V2	V6	V7	V8
DOP	0,94	0,95	0,94	0,94	0,95	0,94	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
$\lambda_c$ (nm)	798,8	798,8	799,0	799,2	799,5	799,4	800,8	800,8	800,5	800,5	800,6	800,2	800,2	800,1	800,0	800,0

Tableau I.15 - DOP et longueur d'onde centrale de chaque barrette dans les Stacks étudiés pour 30A en QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C

### IV.3. Impact du vieillissement en configuration "Stack"

Afin de valider l'efficacité de l'indicateur de défaillance précoce, proposé, sur la technologie Stack QCW, un test de vieillissement en fonctionnement sans phase de déverminage a été effectué pour évaluer également l'impact du déverminage sur les paramètres initialement mesurés.

Le test de vieillissement est réalisé suivant plusieurs conditions du régime QCW, dans le but d'évaluer leur tenue vis-à-vis de différents profils de mission envisagés pour les Stacks QCW. Le principal objectif reste l'analyse de la fiabilité des Stacks jusqu'à  $\sim 1 \times 10^9$  tirs.

#### IV.3.a. Conditions des tests de vieillissement

Les tests de vieillissement sont effectués à 25°C pour un courant de 110A crête pour 4 régimes de fonctionnement en QCW comme listé dans le Tableau I.16. Ce vieillissement peut être considéré comme un test en contraintes échelonnées (dit "step-stress"), pour évaluer différents profils de mission de 100W/bar en régime QCW.

	Etape 1	Etape 2	Etape 3	Etape 4
<b>Durée du pulse</b>	200 $\mu$ s	1ms	200 $\mu$ s	400 $\mu$ s
<b>Fréquence</b>	100Hz	20Hz	200Hz	110Hz
<b>Rapport Cyclique</b>	2%	2%	4%	4,44%
<b>P<sub>out</sub> moyen</b>	2,2W	2,2W	4,4W	4.84W

Tableau I.16 - Conditions du test de vieillissement des Stacks à 25°C pour 110A en régime QCW

#### IV.3.b. Résultats de vieillissement des Stacks

- Stack AD33075: *Influence du cycle de brasage*

Les conditions du test de vieillissement et l'évolution des principaux paramètres du Stack AD33075 sont listés dans le Tableau I.17. On constate qu'après 2281h de fonctionnement, aucune variation significative n'a été observée.

AD33075	t <sub>0</sub>	Etape 1		Etape 2	Etape 3		Etape 4	
Mesure	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Durée (h)	0	242	742	865	1219	1482	1781	2281
Nbre de tirs	0	8,71×10 <sup>7</sup>	2,67×10 <sup>8</sup>	2,76×10 <sup>8</sup>	5,31×10 <sup>8</sup>	7,20×10 <sup>8</sup>	8,40×10 <sup>8</sup>	1,04×10 <sup>9</sup>
λ <sub>max</sub> (nm)	802	802,0	802,1	802,0	802,1	801,9	801,9	801,8
Δλ (nm)	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,4	2,5	2,4
I <sub>th</sub> (A)	15,4	15,2	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,3
Eff (W/A)	7,24	7,25	7,2	7,21	7,07	7,25	7,15	7,22
Rnd (%)	55,8	56,4	56,0	56,1	55,0	56,4	55,6	56,1
R <sub>s</sub> (mΩ)	13,6	12,8	12,8	12,8	12,8	12,9	12,9	12,9

Tableau I.17 - Evolution dans le temps des paramètres électro-optiques du Stack AD33075 pour 100A en QCW (100Hz/200μs) à 25°C

- Stack AD33020 : Influence de la température de brasage

Les conditions de vieillissement et l'évolution des principaux paramètres du Stack AD33020 sont listées dans le Tableau I.18. Après 1937h de fonctionnement, aucune variation significative n'a été observée.

AD33020	t <sub>0</sub>	Etape 1	Etape 2	Etape 3		Etape 4	
Mesure	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Durée (h)	0	232	521	875	1138	1437	1937
Nbre de tirs	0	8,35×10 <sup>7</sup>	1,04×10 <sup>8</sup>	3,59×10 <sup>8</sup>	5,49×10 <sup>8</sup>	6,68×10 <sup>8</sup>	8,68×10 <sup>8</sup>
λ <sub>max</sub> (nm)	803,4	803,6	803,7	803,6	803,6	803,5	803,5
Δλ (nm)	2,3	2,2	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2
I <sub>th</sub> (A)	14,7	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,6
Eff (W/A)	7,2	7,08	6,93	6,76	6,93	6,82	6,87
Rnd (%)	56,1	55,5	54,4	53,1	54,3	53,5	53,8
R <sub>s</sub> (mΩ)	12,9	12,8	12,6	12,6	12,7	12,7	12,7

Tableau I.18 - Evolution des paramètres électro-optiques du Stack AD33020 pour 100A en QCW (100Hz/200μs) à 25°C

- Influence de la pression de maintien lors du report SEB (Stack AD33019)

Les conditions du vieillissement et l'évolution des principaux paramètres du Stack AD33019 sont listés dans le Tableau I.19. Après 2119h de fonctionnement aucune variation significative n'a été observée.

AD33019	t0	Etape 1	Etape 2		Etape 3			Etape 4	
Mesure	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Durée (h)	0	168	277	413	703	1057	1320	1619	2119
Nbre de tirs	0	$6,05 \times 10^7$	$6,83 \times 10^7$	$7,81 \times 10^7$	$2,87 \times 10^8$	$5,42 \times 10^8$	$7,31 \times 10^8$	$8,51 \times 10^8$	$1,05 \times 10^9$
$\lambda_{\max}$ (nm)	802,8	802,8	802,8	802,8	802,6	802,7	802,6	802,5	802,5
$\Delta\lambda$ (nm)	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1
$I_{th}$ (A)	14,6	14,5	14,4	14,4	14,5	14,4	14,4	14,4	14,5
Eff (W/A)	4,87	4,76	4,75	4,74	4,77	4,62	4,75	4,68	4,72
Rnd (%)	57	56,1	56,0	55,9	56,2	54,5	56,1	55,2	55,6
$R_s$ m $\Omega$ )	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,3	8,4	8,4	8,4

Tableau I.19 - Evolution des paramètres électro-optiques du Stack AD33019 pour 100A en QCW (100Hz/200 $\mu$ s) à 25°C

### IV.3.c. Analyse de l'impact du vieillissement accéléré

#### IV.3.c.1. Impact au niveau Stack

La variation de la puissance optique globale des trois Stacks en fonction du nombre de tirs est présentée dans la Figure I.21, mesurée pour un courant égal à 100A en QCW (100Hz/200 $\mu$ s) à 25°C.

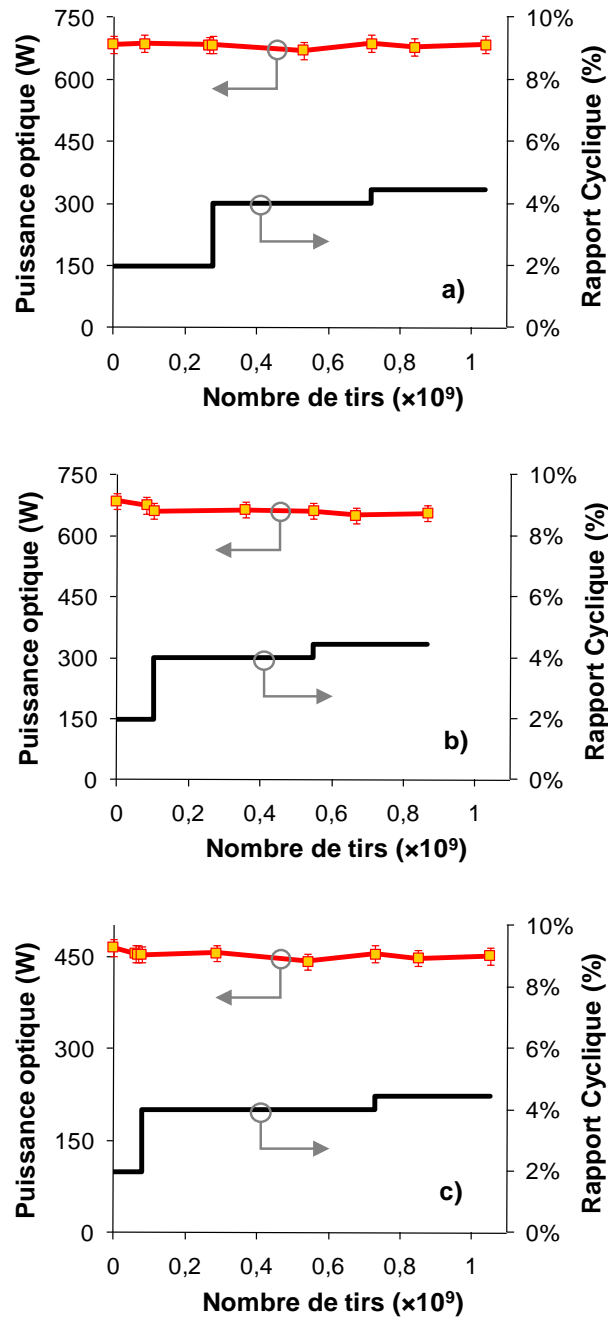


Figure I.21 - Courbes de vieillissement des Stacks étudiés pour 100A (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C en fonction du nombre de tirs : AD33075 (a), AD33020 (b) et AD33019 (c)

Le Tableau I.20 résume, pour chaque Stack, la baisse de la puissance optique ( $1-P_f/P_i$ ) et le nombre d'émetteurs dégradés après le test de vieillissement. Aucune corrélation n'est constatée entre le nombre d'émetteurs dégradés et la baisse de puissance des Stacks.

	Nbre de barrettes	Perte de la puissance optique (%)	Nbre d'émetteurs dégradés
AD33075	6	-1%	7
AD33020	6	-4,5%	17
AD33019	4	-3%	7

Tableau I.20 - Perte de puissance et nombre d'émetteurs dégradés dans chaque Stack après vieillissement

### IV.3.c.2. Impact au niveau émetteur

La principale dégradation catastrophique des émetteurs se situe dans l'étape N°1 du test. Le pourcentage des émetteurs dégradés dans chaque Stack est présenté par la Figure I.22. Il ressort que :

- Le nombre des émetteurs dégradés dans le Stack AD33020 est important et évolue dans le temps.
- Le pourcentage de dégradation des émetteurs du Stack AD33075 s'est stabilisé pendant l'étape 1 du test (après  $8,71 \times 10^7$  tirs).
- La dégradation des émetteurs du Stack AD33019 s'est produite dans l'étape N°1 et N°4 du test.

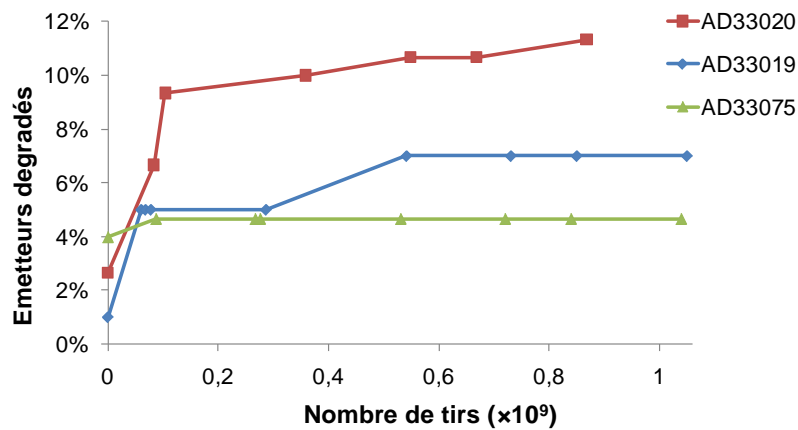
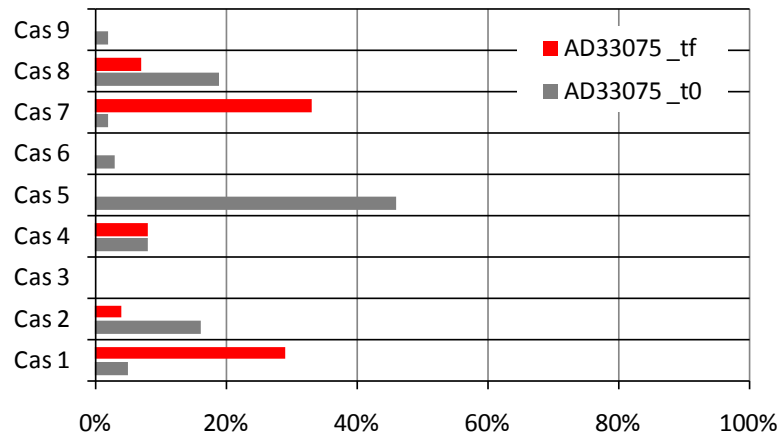


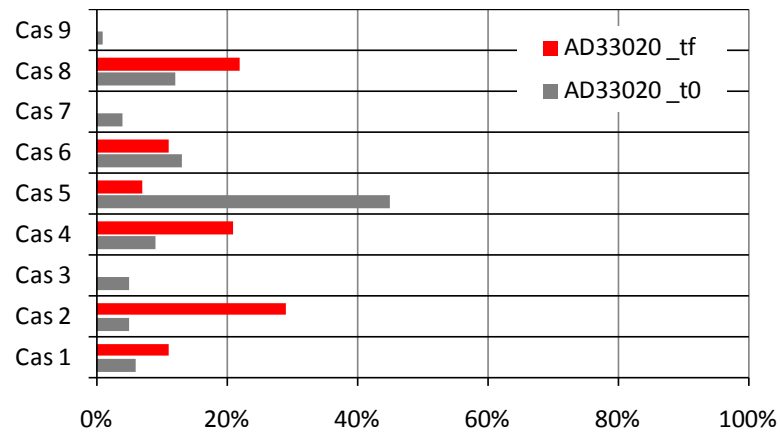
Figure I.22 - Pourcentage des émetteurs dégradés pour chaque Stack en fonction du nombre de tirs

Le pourcentage d'émetteurs dégradés pour chaque condition du couple  $(\chi_{\max}, \text{DOP})$  est donné dans la Figure I.23. Jusqu'à  $1 \times 10^9$  tirs, la dégradation des émetteurs dans le cas n°5 est très faible comparée aux autres cas possibles. Ceci confirme que l'homogénéité du couple  $(\chi_{\max}, \text{DOP})$  autour de la valeur globale du composant constitue un indicateur précoce de dégradation pertinent pour les composants QCW en architecture Stack.

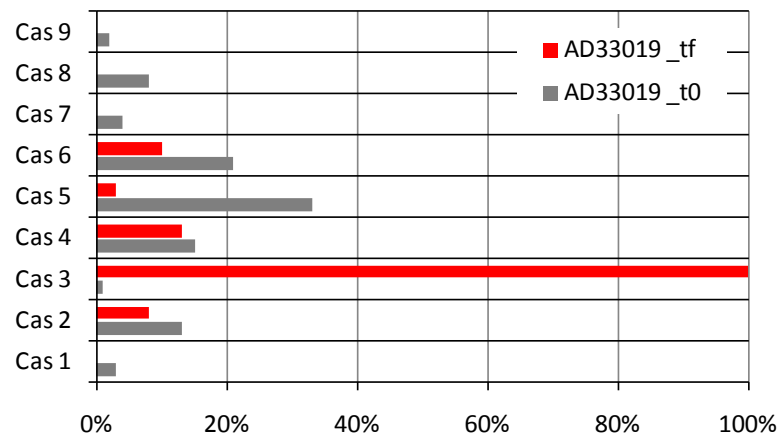




a) Taux d'émetteur : t0, et taux de dégradation : tf



b) Taux d'émetteur : t0, et taux de dégradation : tf



c) Taux d'émetteur : t0, et taux de dégradation : tf

**Figure I.23 - Population d'émetteur par cas du couple ( $\lambda_{max}, DOP$ ) ( $t_0$ ) et pourcentage des émetteurs dégradés par cas ( $t_f$ ) après le vieillissement des trois Stacks étudiés : a) AD33075, b) AD33020 et c) AD33019**

Afin de mieux illustrer la validité de notre approche dans une configuration Stack, nous allons présenter pour chaque barrette du Stack le pourcentage d'émetteurs dans chaque cas et le pourcentage de dégradation correspondant.

- Stack AD33075

Le Tableau I.21 liste le pourcentage d'émetteurs initialement présent dans chaque cas et le taux de dégradation correspondant après vieillissement. Initialement, nous avons 46% des émetteurs (un total de 75 émetteurs) remplissant la condition du cas 5. Après un vieillissement de 2281h (25°C) à 110A en régime QCW (voir Tableau I.16), aucune dégradation n'a été observée dans les émetteurs du cas 5 confirmant la validité de notre indicateur précoce de défaillance. Pour le cas 1, indicateur de défauts "V", nous avons initialement 2% des émetteurs remplissant cette condition dont 33% montrant une dégradation catastrophique après vieillissement.

Cas	AD 33075	Bar1 V0	Bar2 V0	Bar3 V0	Bar4 V0	Bar5 V0	Bar6 V0	Stack
1	% t0	0%	4%	4%	0%	4%	0%	2%
	HS	---	0%	0%	---	100%	---	33%
2	% t0	24%	20%	8%	20%	20%	20%	19%
	HS	0%	0%	0%	0%	20%	20%	7%
3	% t0	0%	0%	0%	8%	0%	4%	2%
	HS	---	---	---	0%	---	0%	0%
4	% t0	8%	4%	8%	4%	12%	12%	8%
	HS	0%	0%	0%	0%	0%	33%	8%
5	% t0	52%	52%	52%	44%	40%	36%	46%
	HS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6	% t0	0%	4%	8%	4%	0%	0%	3%
	HS	---	0%	0%	0%	---	---	0%
7	% t0	4%	4%	8%	8%	0%	4%	5%
	HS	0%	0%	50%	50%	---	0%	29%
8	% t0	12%	12%	12%	12%	24%	24%	16%
	HS	0%	0%	0%	0%	17%	0%	4%
9	% t0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	HS	---	---	---	---	---	---	---

**Tableau I.21 - Pourcentage d'émetteurs initialement (% t<sub>0</sub>) dans chaque cas et pourcentage d'émetteurs dégradés (HS) après vieillissement dans chaque barrette du stack AD33075**

- Stack AD 33020

Le Tableau I.22 liste le pourcentage d'émetteurs initialement présent dans chaque cas et le taux de dégradation correspondant après un vieillissement de 2281h à 25°C pour 110A en régime QCW (voir Tableau I.16). On en déduit que le pourcentage des émetteurs dégradé dans le cas 5 a atteint 12% pour 42% émetteurs initialement remplissant cette condition. Rappelons que ce stack présentée initialement plusieurs défauts types lichettes d'or (voir Figure I.9).

case	0	Bar1 V1	Bar2 V2	Bar3 V3	Bar4 V4	Bar5 V5	Bar6 V2	Stack
1	% t0	0%	4%	4%	4%	4%	8%	4%
	HS	---	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	% t0	8%	12%	24%	12%	8%	8%	14%
	HS	0%	0%	50%	0%	0%	50%	29%
3	% t0	0%	0%	4%	4%	0%	0%	2%
	HS	---	---	0%	0%	---	---	0%
4	% t0	4%	16%	4%	12%	8%	12%	10%
	HS	0%	25%	0%	33%	50%	0%	30%
5	% t0	60%	36%	32%	40%	60%	40%	42%
	HS	20%	0%	0%	10%	7%	0%	12%
6	% t0	16%	16%	8%	16%	4%	16%	11%
	HS	0%	25%	0%	0%	0%	25%	18%
7	% t0	8%	4%	8%	4%	8%	4%	6%
	HS	0%	0%	0%	0%	50%	0%	17%
8	% t0	4%	4%	4%	4%	4%	8%	4%
	HS	0%	0%	0%	100%	0%	50%	50%
9	% t0	0%	8%	12%	4%	4%	4%	7%
	HS	#DIV/0!	0%	0%	0%	0%	0%	0%

**Tableau I.22 - Pourcentage d'émetteurs initialement (% t<sub>0</sub>) dans chaque cas et pourcentage d'émetteurs dégradés (HS) après vieillissement dans chaque barrette du Stack AD33020**

- Stack AD33019

Le Tableau I.23 liste le pourcentage d'émetteurs initialement présent dans chaque cas et le taux de dégradation correspondant après un vieillissement de 2281h à 110A en régime QCW (voir Tableau I.16). 32% d'émetteurs de la barrette N°4 est de dans le cas 5 avec aucune dégradation après test. Les écarts moyens calculés dans ces barrettes sont très faible (voir Tableau I.14).

Cas	0	Bar1 V2	Bar2 V6	Bar3 V7	Bar4 V8	Stack
1	% t0	4%	0%	8%	4%	4%
	HS	0%	---	0%	0%	0%
2	% t0	8%	8%	8%	8%	8%
	HS	0%	0%	0%	0%	0%
3	% t0	0%	4%	0%	4%	2%
	HS	---	0%	---	0%	0%
4	% t0	16%	12%	12%	16%	14%
	HS	25%	0%	33%	0%	14%
5	% t0	32%	48%	32%	32%	36%
	HS	13%	0%	13%	0%	6%
6	% t0	24%	12%	24%	16%	19%
	HS	17%	33%	0%	0%	11%
7	% t0	4%	0%	0%	8%	3%
	HS	0%	---	---	0%	0%
8	% t0	12%	16%	16%	8%	13%
	HS	0%	0%	0%	50%	8%
9	% t0	0%	0%	0%	4%	1%
	HS	---	---	---	0%	0%

**Tableau I.23 - Pourcentage d'émetteurs initialement (%  $t_0$ ) dans chaque cas et pourcentage d'émetteurs dégradés (HS) après vieillissement dans chaque barrette du stack AD33019**

#### IV.4. Synthèse des résultats

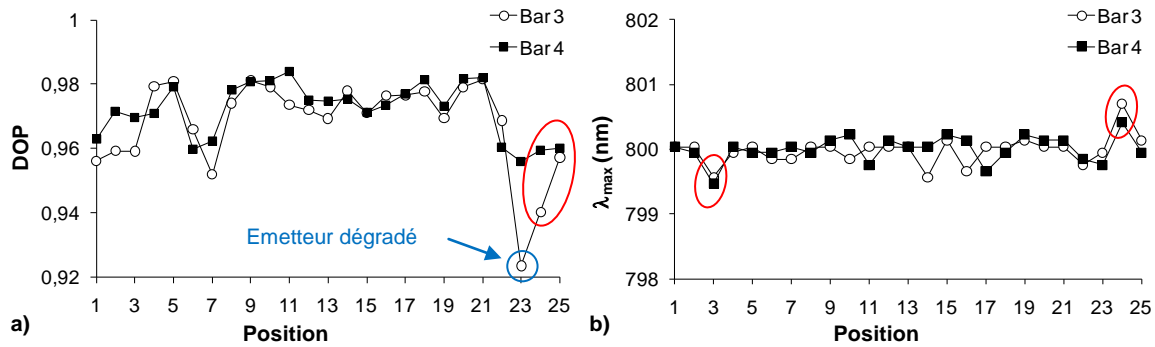
Nous venons d'évaluer la fiabilité de trois architectures de Stacks 808nm constitués de 6 barrettes (AD33075 et AD33020) et 4 barrettes (AD33019) destinées, respectivement, à des applications de 400 et 600W optique en QCW (100Hz/200 $\mu$ s) à 25°C. Ces Stacks ont été assemblés en considérant différents processus de report sur embase (SEB) comme illustré dans le Tableau I.24. En fait, l'analyse des Stacks est équivalente à l'analyse de 16 barrettes de diodes laser comportant 400 émetteurs. L'étude des processus de montage SEB en utilisant les paramètres initiaux de chaque émetteur a permis d'optimiser les composants QCW afin de satisfaire aux exigences d'augmentation de la durée de vie des composants sollicitées par les nouveaux profils de mission pour de futures applications en environnement spatial.

Stack		Position de la barrette dans le Stack					
		1	2	3	4	5	6
<b>AD33075</b> (6 Barrettes)	Plaque	A	B	B	C	C	C
	Cycle de report	V0	V0	V0	V0	V0	V0
<b>AD33020</b> (6 Barrettes)	Plaque	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	Cycle de report	V1	V2	V3	V4	V5	V2
<b>AD33019</b> (4 Barrettes)	Plaque	A1	A1	A1	A1	-----	-----
	Cycle de report	V2	V6	V7	V8	-----	-----

**Tableau I.24 - Récapitulatif technologique des Stacks étudiés**

L'étude de neuf processus d'assemblage SEB (V0 à V8) et l'analyse des Stacks au niveau émetteur, avant et après les tests de vieillissement, montre que l'indicateur de défaillance retenu est applicable aussi bien au niveau barrette qu'au niveau Stack. L'homogénéité du couple ( $\lambda_{\max}$ , DOP) des émetteurs est meilleure pour les barrettes montées suivant les processus V7 ( $T_{br}=338^\circ\text{C}$   $t_{br}=15\text{s}$ ,  $P_{br}=300\text{g}$ ) et V8 ( $T_{br}=338^\circ\text{C}$   $t_{br}=15\text{s}$ ,  $P_{br}=200\text{g}$ ), la Figure I.24 illustre la comparaison de la variation des paramètres  $\lambda_{\max}$ , et DOP le long des barrettes N°3 (V7) et N°44 (V8).

Après les tests accélérés de vieillissement (2119h), la barrette reportée avec le processus V7 a montré la dégradation de l'émetteur position #23 durant l'étape 1 du test, dans le quel on a observé un défaut type manque de passivation au niveau de la zone active. Pour, le processus V8, nous avons observé pendant l'étape 3, deux émetteurs (#9 et #17) présentant une dégradation rapide. La brûlure de la passivation de la facette d'émission constitue la principale signature de dégradation de l'émetteur #17 tandis que l'émetteur #9 n'a révélé aucune signature visuelle apparente.



**Figure I.24 - Comparaison des distributions du DOP (a) et de  $\lambda_{max}$  (b) le long des barrettes montées avec les processus V7 (Bar N°3) et V8 (Bar N°4)**

L'extrémité droite des deux barrettes présente des valeurs de DOP faibles, ceci est dû à la présence d'une forte émission en mode TM qui est créée par l'existence d'une contrainte dans le sens inverse (en tension) de la contrainte initialement présente dans la couche active (puits quantique). La longueur d'onde centrale des émetteurs #3 et #24 dans les deux barrettes sont décalées respectivement de  $-0,5\text{nm}$  et  $0,5\text{nm}$ ; ce décalage pouvant s'expliquer par la présence d'une contrainte mécanique en cisaillement.

## V. Mono-barrettes QCW à très forte puissance - 150W

Cette partie s'attache aux premiers tests d'évaluation prospective de composants mono-barrettes QCW constituées d'une nouvelle génération de barrettes QCW, émettant à  $808\text{nm}$ , destinées à des applications à forte puissance ( $150\text{W}/\text{bar}$  à  $100\text{Hz}/200\mu\text{s}$ ). Les barrettes sont reportées selon différents processus de montage SEB et avec différents épaisseurs du dissipateur. A nouveau, l'objectif est de valider la pertinence de l'indicateur précoce de défaillance proposé précédemment.

### V.1. Descriptif technologique des composants

Les composants sont réalisés avec des barrettes constituées de 25 émetteurs émettant à  $808\text{nm}$  en mode TE et destinées à un fonctionnement de  $150\text{W}$  optique en régime QCW ( $100\text{Hz}/200\mu\text{s}$ ) à  $25^\circ\text{C}$ ; rappelons que jusqu'ici nous avons évalué des barrettes émettant  $100\text{W}$  optique. Les SEBs sont assemblées sur des dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  avec les épaisseurs suivantes :  $345$  et  $650\mu\text{m}$ , correspondant respectivement des pas optiques de  $500$  et  $800\mu\text{m}$ . Le pas optique est un paramètre technologique qui dépend de l'application finale des composants QCW. Les principaux paramètres technologiques de ces composants sont listés dans le Tableau I.25.

Composant	Plaque	Cycle de brasage			Epaisseur Cu <sub>10</sub> W <sub>90</sub>
		T <sub>br</sub> (°C)	t <sub>br</sub> (s)	P <sub>br</sub> (g)	
38763	A2	338	15	100	345μm
38769				150	345μm
38780				200	650μm

Tableau I.25 - Paramètres technologiques des mono-barrettes QCW 150W

## V.2. Paramètres électro-optiques des émetteurs

### V.2.a. Variations des paramètres électro-optiques dans les composants

- Puissance optique émise

La distribution du P<sub>out</sub> (normalisé), représentée par émetteur, dans la barrette de chaque composant est présentée en Figure I.25. Une variation de l'ordre de 10% dans les composants 38763 et 38769 est mise en lumière. En revanche, cette variation atteint 30% dans le composant 38780. Nous avons expérimentalement démontré dans la dernière partie du chapitre II que la variation du P<sub>out</sub> le long de la barrette est peu sensible aux contraintes mécaniques externes. Les variations de la puissance optique ne peuvent pas être considérées comme indicateur précoce de dégradation et la valeur maximum de cette variation ne donne aucune indication sur la fiabilité du composant.

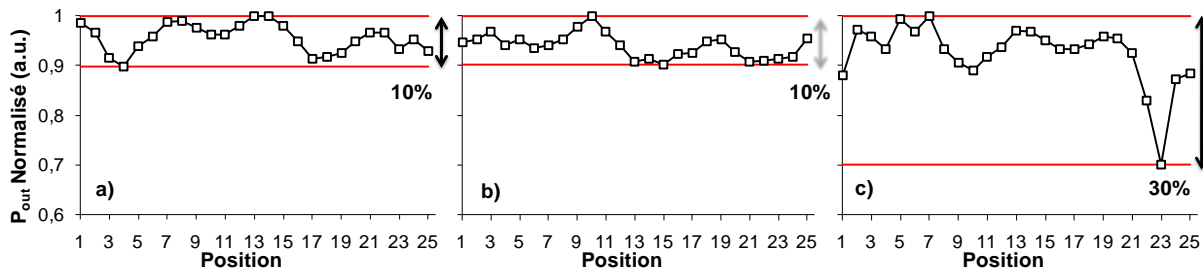


Figure I.25 - Distribution du P<sub>out</sub> normalisé par émetteur : 38763 (a), 38769 (b) et 38780 (c)

- Degré de polarisation

La variation du DOP des émetteurs le long de chaque barrette est indiquée dans la Figure I.26. Nous observons des émetteurs avec des DOP faibles à l'extrémité gauche des barrettes constituant les composants 38763 et 38769. En revanche, le composant 38780 présente un DOP quasi-homogène le long de la barrette. En effet, les résultats issus du chapitre 3 ont clairement montré que l'augmentation de l'épaisseur du dissipateur Cu<sub>10</sub>W<sub>90</sub> permet d'améliorer l'homogénéité du DOP le long de la barrette en réduisant les contraintes mécaniques résiduelles. En fait, l'extrémité gauche de la barrette présente une faible émission en mode TE par rapport aux autres émetteurs. Ceci résulte de la présence de fortes contraintes mécaniques en tension induites intrinsèquement par le processus d'assemblage (cf. Chapitre III).

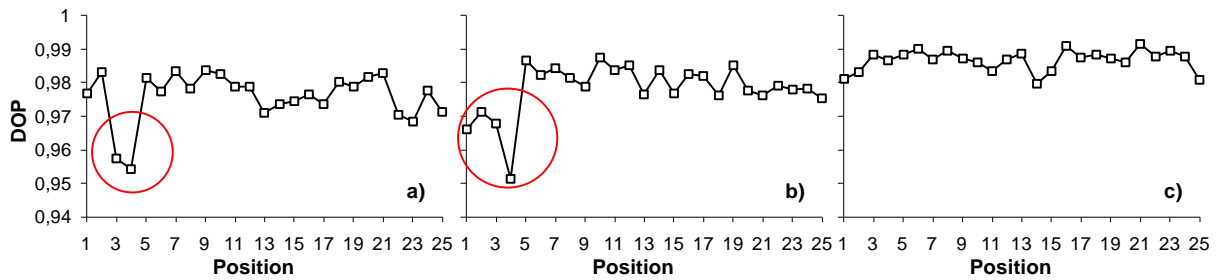


Figure I.26 - Distribution du DOP par émetteur : 38763 (a), 38769 (b) et 38780 (c)

- Longueur d'onde centrale

La Figure I.27 présente les variations de  $\lambda_{\max}$  des émetteurs de chaque composant. On observe un décalage de  $\lambda_{\max}$  dépendant de la position de l'émetteur dans les barrettes des composants 38763 et 38769, de l'ordre de 0,076nm/mm en partant de l'émetteur #1. Ceci montre que les contraintes mécaniques ne sont pas homogènes le long de la barrette. Le décalage observé est à l'origine de l'élargissement du spectre global de la barrette (voir Figure I.32).

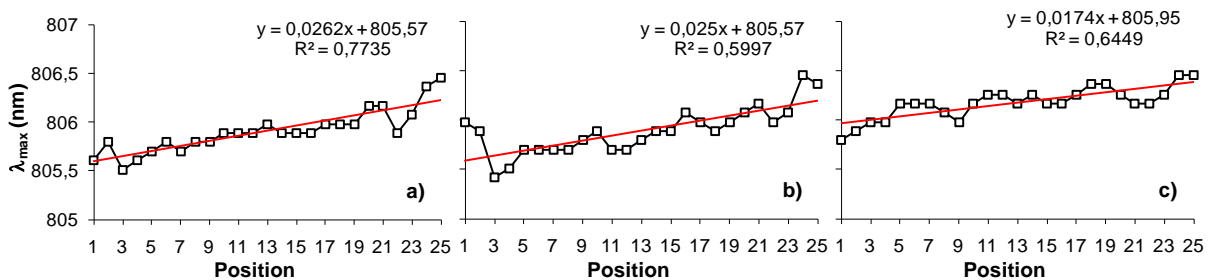


Figure I.27 - Variation de  $\lambda_{\max}$  le long des composants étudiés : 38763 (a), 38769 (b) et 38780 (c)

### V.2.b. Répartition statistique dans le plan ( $\lambda_{\max}$ ,DOP)

Comme l'indique la Figure I.28, le composant 38763 présente un grand nombre d'émetteurs (45%) dans le cas 5 en comparaison avec les composants 38769 et 38780. En revanche presque 25% des émetteurs du composant 38769 sont situés dans le cas 5 et dans le cas 2. Par conséquent, on peut conclure que les contraintes mécaniques résiduelles sont très importantes dans la barrette du composant 38769 au niveau de ces émetteurs.

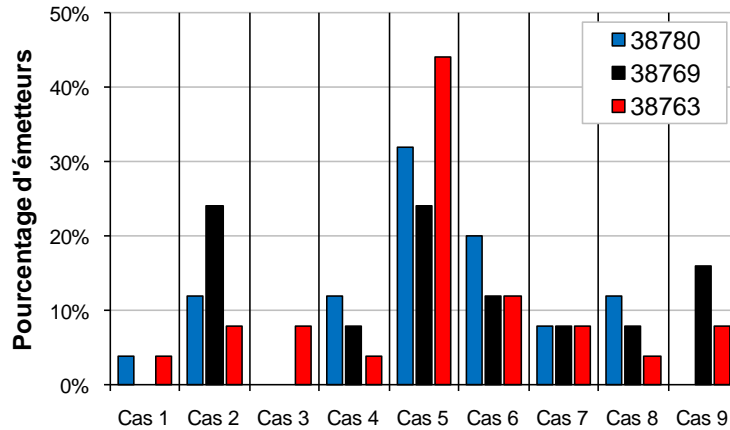


Figure I.28 – Répartition statistique des émetteurs dans le plan ( $\lambda_{\max}$ ,DOP) pour les trois composants étudiés

### V.3. Résultats du test de vieillissement accéléré

#### V.3.a. Description du banc de test

Le système utilisé pour réaliser le vieillissement de ces composants permet de mesurer, in-situ et de manière continue, la puissance optique émise de chaque composant en fonctionnement. Les composants sont répartis dans des compartiments qui possèdent 3 emplacements. Chaque compartiment est connecté à une alimentation électrique, qui impose la même condition de courant pour les 3 composants. Ces derniers sont maintenus en contact avec une semelle en cuivre qui est refroidi par un module Peltier permettant de fixer la température de l'embase à 25°C.

Les trois composants ont été soumis, pendant 120h, à un courant de 150A crête en régime QCW (100Hz/200µs) à 25°C équivalent à un total de  $43,2 \times 10^6$  tirs. Le but de cette étude est de faire les premières évaluations de cette nouvelle technologie de barrette 808nm conçues pour un fonctionnement de 150W en régime QCW. Ceci nécessite alors la mise en place d'un nouveau processus d'assemblage adapté au report de ces barrettes sur dissipateur au moyen de la caractérisation émetteur par émetteur.

#### V.3.b. Analyse des courbes de vieillissement globales

Comme l'indique la Figure I.29, après 120h de fonctionnement, une dégradation de la puissance optique de l'ordre de 20% a globalement affecté le composant 38769 alors que les composants 38763 et 38780 n'ont présenté aucune variation significative. La dégradation du composant 38769 apparaît comme une conséquence de la dégradation catastrophique d'un certain nombre d'émetteurs dans la barrette. Pour l'analyse de cette dégradation, nous allons procéder avec une approche similaire aux composants étudiés précédemment dans ce chapitre.



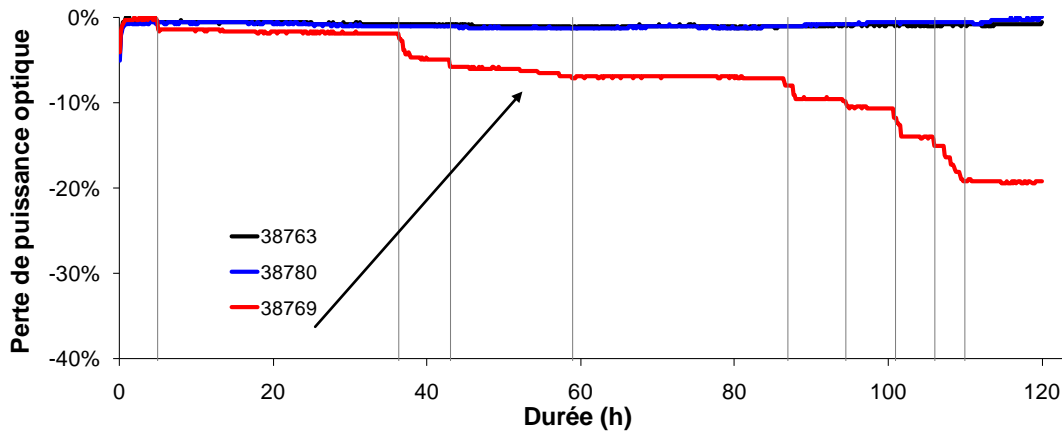


Figure I.29 - Evolution dans le temps de puissance optique globale des composants mono-barrette QCW de très forte puissance

### V.3.c. Analyse des émetteurs de chaque barrette

La comparaison des profils de variation de la puissance optique  $P_{out}$ , avant et après vieillissement, le long des trois composants sont présentés en Figure I.30. Les deux composants 38763 et 38769 ne montrent aucune variation significative de la puissance optique globale. En revanche, nous confirmons que la dégradation catastrophique de 11 émetteurs, situés au centre de la barrette, sont responsables de la dégradation du composant 38769 (Figure I.32-b). On note également que l'émetteur de l'extrémité droite du composant 38763 montre une perte de 10% de la puissance optique difficilement quantifiable en analysant uniquement la puissance optique globale de la barrette.

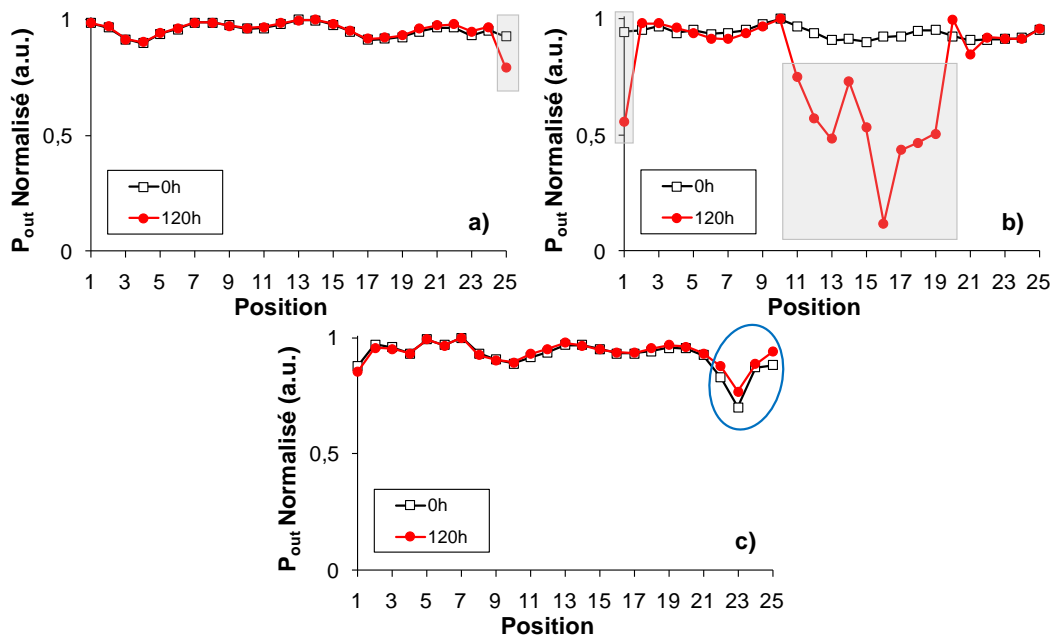
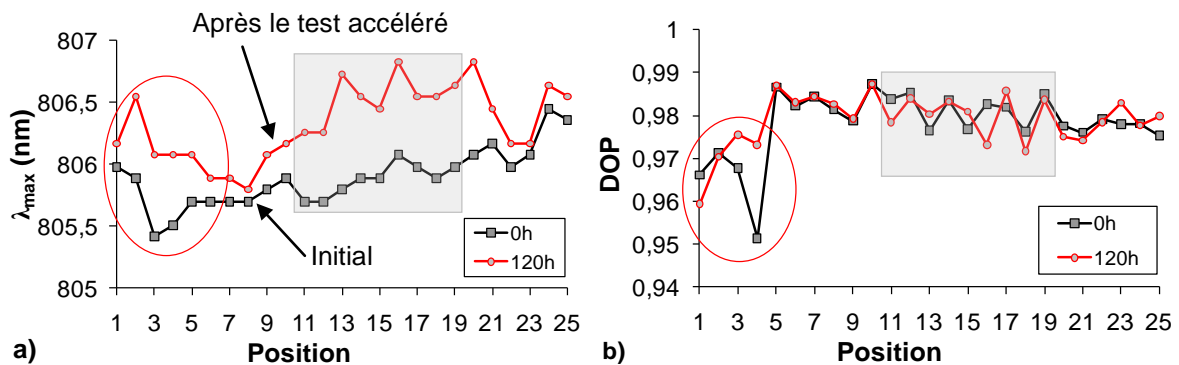


Figure I.30 - Comparaison des variations de la puissance optique  $P_{out}$  avant et après 120h de vieillissement pour les composants 38763 (a), 38769 (b) et 38780 (c)

L'évolution du DOP  $\lambda_{et \max}$  le long de chaque composant avant et après 120h de fonctionnement est illustrée par la Figure I.31. Après 120h de fonctionnement, le composant 38780 montre clairement deux comportements atypiques de la technologie QCW mono-barrette :

- Le premier correspond à un décalage en longueur d'onde des émetteurs situés à l'extrémité gauche de la barrette.
- Le second réside dans l'amélioration de la valeur du DOP au niveau de l'extrémité gauche de la barrette des émetteurs non dégradés #3 et #4.

Après vieillissement, les mesures effectuées sur le composant 38769 montrent une évolution en terme du couple ( $\lambda_{\max}$ , DOP). Cette évolution peut être le résultat d'un fort échauffement thermique conduisant à une relaxation des contraintes mécaniques. En effet, nous avons observé à l'extrémité gauche de la barrette (émetteurs non dégradés) un décalage positif de la longueur d'onde et une amélioration significative du DOP. Dans tous les composants que nous avons étudiés précédemment, nous n'avons observé aucune évolution des paramètres DOP et  $\lambda_{\max}$  après vieillissement et l'hypothèse avancée correspond à l'existence de phénomènes de stabilisation de l'assemblage pendant les premières heures de fonctionnement comme l'a proposé ...[ref].



**Figure I.31 - Variations du DOP (a) et  $\lambda_{\max}$  (b) des émetteurs du composant 38769 avant et après 120h de fonctionnement**

Les spectres optiques des composants à forte puissance, pour 30A en QCW (100Hz/100 $\mu$ s) à 25°C, avant et après fonctionnement de 120h sont présentés par la Figure I.32. Après vieillissement, le spectre optique du composant 33769 s'est décalé de +0,4nm suite à une dégradation de l'évacuation thermique dans la barrette (le décalage positif de  $\lambda_{\max}$ ). En revanche, les autres composants n'ont montré aucune évolution significative.

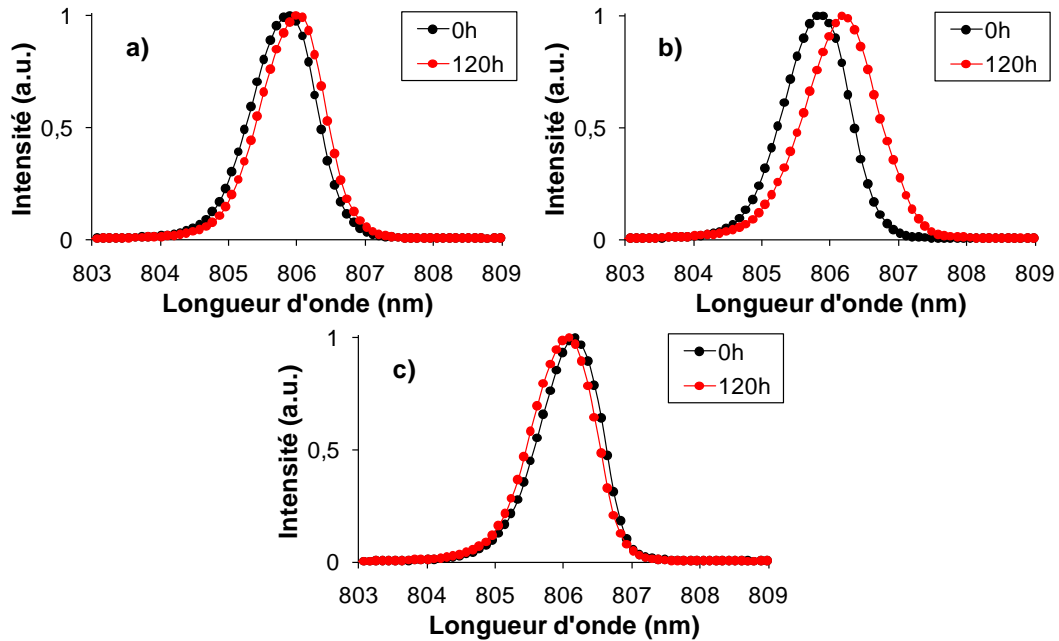


Figure I.32 - Spectres optiques avant et après 120h de fonctionnement des composants : 38763 (a), 38769 (b) et 38780 (c)

## VI. Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à l'analyse des résultats de vieillissement de composants QCW, microassemblés sur dissipateur en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$ , de type mono-barrette et multi-barrette (Stack).

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les résultats de vieillissement à  $25^\circ\text{C}$ , jusqu'à  $4,47 \times 10^9$  tirs ( $2752\text{h}$  à  $100\text{A}-200\text{Hz}/200\mu\text{s}$  +  $5522\text{h}$  à  $120\text{A}-125\text{Hz}/200\mu\text{s}$ ), d'un composant mono-barrette QCW "standard" qui a présenté une baisse significative (15%) de la puissance optique globale. L'analyse de la dégradation de la barrette microassemblée, au moyen des paramètres électro-optiques des émetteurs de la barrette, nous a permis de mettre en place un indicateur précoce de défaillance défini par ce cas regroupe des caractéristiques optiques ( $\lambda_{\text{max}}$  et DOP) très proches de ceux de la barrette globale.

La validation de cette nouvelle méthodologie a été confortée par l'évaluation d'un second composant mono-barrette QCW optimisé en terme du nombre d'émetteurs dans le cas 5 du plan ( $\lambda_{\text{max}}, \text{DOP}$ ) pour améliorer la fiabilité opérationnelle. Le composant optimisé a été vieilli en contraintes échelonnées jusqu'à  $4,13 \times 10^9$  tirs ( $2283\text{h}$  à  $100\text{A}-200\text{Hz}/200\mu\text{s}$  +  $5522\text{h}$  à  $120\text{A}-125\text{Hz}/200\mu\text{s}$ ). Nous avons montré que l'amélioration de la fiabilité de composants QCW est en accord avec la stabilisation de l'homogénéité de la position des émetteurs dans le plan ( $\lambda_{\text{max}}, \text{DOP}$ ). En effet, lorsque les écarts à la moyenne de  $\lambda_{\text{max}}$  et du DOP, mesurés  $30\text{A}$  à  $25^\circ\text{C}$  en QCW ( $100\text{Hz}/100\mu\text{s}$ ), sont respectivement inférieurs ou égaux à  $0,15\text{nm}$  et  $0,3\%$ , un nombre important d'émetteurs ( $\sim 90\%$ ) sera situé dans le cas n°5 ( $\lambda_{\text{max}} \sim$  &  $\text{DOP} \sim$ ) démontrant ainsi une durée de vie

opérationnelle, à 25°C pour 100W/bar, supérieure à  $4 \times 10^9$  tirs pour 100Hz/200µs, satisfaisant donc les conditions du profil de mission.

Par la suite, l'analyse de la fiabilité de composants multi-barrettes (Stacks QCW) au pas optique de 400µm a également été corrélée à la position initiale ( $t_0$ ) des émetteurs dans le plan ( $\lambda_{\max}, \text{DOP}$ ). Les Stacks étudiés ont été microassemblés suivant différents processus de montage SEB et ceci a permis l'étude de l'impact du processus de report de la barrette sur son embase (appelé SEB) au sein d'un seul composant dans le but d'optimiser les paramètres de montage pour améliorer les performances des Stacks et de démontrer leur fiabilité jusqu'à  $10^9$  tirs. Nous avons montré que l'augmentation du pourcentage d'émetteurs répartis dans le cas n°5 du plan ( $\lambda_{\max}, \text{DOP}$ ) est liée aux paramètres du cycle de report pour la réalisation des SEBs. Les paramètres de report optimums ont pu ainsi être déduits et correspondent à ...

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons utilisé l'indicateur précoce de défaillance en vue d'une étude prospective d'une nouvelle technologie de barrettes 150W (25 émetteur) en régime QCW, émettant à 808nm en mode TE, montées suivant différents processus de montage SEB avec des dissipateurs en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  ayant des épaisseurs différentes. Nous avons mis en évidence que l'épaisseur du dissipateur en  $\text{Cu}_{10}\text{W}_{90}$  conduit à une augmentation du pourcentage d'émetteurs dans le cas n°5 du plan ( $\lambda_{\max}, \text{DOP}$ ) et par conséquent améliorent les performances ainsi que la fiabilité des DLPs. Ce dernier chapitre a permis de conclure que la caractérisation des barrettes au niveau émetteur se révèle être aussi un outil d'aide à la caractérisation mais plus largement d'aide à la conception s'inscrivant ainsi dans une stratégie de fiabilité « construite » (built-in reliability) des technologies de composants optiques à forte puissance pour la société Quantel Laser Diode.

## VII. REFERENCES

- [1] J. Jiménez, "*Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes*", Comptes Rendus Physique, Vol 4, Issue 6, pp. 663-673, (2003).
- [2] A. Martín-Martín, M. Avella, M. P. Iñiguez, J. Jiménez, M. Oudart, and J. Nagle, "*A physical model for the rapid degradation of semiconductor laser diodes*", Appl. Phys. Lett. **93**, p. 171106, (2008).
- [3] E.W. Kreutz, N. Wiedmann, J. Jandeleit, D. Hoffmann, P. Loosen and R. Poprawe, "*Reliability and degradation mechanisms of InGa(Al)As/GaAs DQW high-power diode lasers*" Journal of Crystal Growth, 210, pp. 313-317, (2000).
- [4] O. Ueda, "*Reliability Degradation of III-V Optical Devices*" Artech House Publishers, Boston, London, (1996).
- [5] A. Bonfiglio, M.B. Casu, M. Vanzi, R. De Palo, F. Magistrali, and G. Salmini, "Early signatures for REDR-based laser degradations", Microelectronics Reliability, Vol 38, pp. 1215-1220, (1998).
- [6] M. Fukuda, "*Reliability and Degradation of Semiconductors Lasers and LEDs*", Artech House Publishers, Boston. London, (1991).
- [7] K. Ishida, T. Kamejima, Y. Matsumoto, and K. Endo. "*Lattice defect structure of degraded InGaAsP-InP double-heterostructure lasers*", Appl. Phys. Lett. 40 (1), pp. 16-17, (1982).
- [8] H. Temkin, C.L. Zipfel, and V.G. Keramidis. "*High-temperature degradation of InGaAsP/InP light emitting diodes*", J. Appl. Phys., 52 (8), pp. 5377-5380, (1981).
- [9] T. Egawa, Y. Hasegawa, T. Jimbo, and M. Umeno. "*Degradation mechanism of AlGaAs/GaAs laser diodes grown on Si substrates*", Appl. Phys. Lett., 67 (20) p. 2995, (1995).
- [10] M. Vanzi, A. Bonfiglio, F. Magistrali, and G. Salmini. "*Electron Microscopy of Life-tested Semiconductor Laser Diodes*", Micron, 31 (3), pp.259-267, (2000).
- [11] P.G. Eliseev. "*Optical strength of semiconductor laser materials*", Prog Quant Electr, 20 (1), pp.1-82, (1996).
- [12] R.G. Ahrens, J.J. Jacques, N.K. Dutta, M.J. LuValle, A.B. Piccirilli, R.M. Camarda, A.B. Fields, and K.R. Lawrence. "*Failure mode Analysis of High Power Laser Diodes*" Proc. SPIE., 4973, (2002).
- [13] S. Nakahara, and R. J. McCoy. "*Kirkendall void formation in thin-film diffusion couples*", App. Phys. Lett., 37, pp. 42-44, (1980).
- [14] A.V. Andrianov, S.R.A. Dods, J. Morgan, J.W. Orton, T.M. Benson, I. Harrison, E.C. Larkins, F.X. Daiminger, E. Vassilakis, and J.P. Hirtz. "*Optical and photoelectric study of mirror facets in degraded high power AlGaAs 808 nm laser diodes*", J. Appl. Phys., 87 (7), p. 3227, (2000).
- [15] M.B. Sanayeh, P. Brick, W. Schmid, B. Mayer, M. Müller, M. Reufer, K. Streubel, S. Schwirzke-Schaaf, J.W. Tomm, A. Danilewsky, and G. Bacher. "*Defect investigation and temperature analysis of high-power AlGaInP laser diodes during catastrophic optical damage*", J Mater Sci: Mater Electron, Vol 19, pp. 155-159, (2008).
- [16] R. Puchert, J.W. Tomm, A. Jaeger, A. Bärwolff, J. Luft, W. Späth. "*Emitter failure and thermal facet load in high-power laser diode arrays*", Appl. Phys. A, Vol. 66, pp. 483-486, (1998).
- [17] Martín-Martín, A., Avella, M., Pommiès, M., Jiménez, J., Iñiguez, M.P., Oudart, M., Nagle, J. "*Study of the degradation of AlGaAs-based high-power laser bars: V defects*", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 19, pp. S140-S144, (2008).
- [18] Pommies, M., Avella, M., Martin, A., Jimenez, J., Oudart, M., Nagle, J. "*Cathodoluminescence study of V-defects in AlGaAs-based high-power laser bars*" Materials Research Society Symposium Proceedings 994, pp. 157-162, (2007).

# Conclusion générale

---

## Annexe - A : Données matériaux

	Matériaux	CTE (10 <sup>-6</sup> /K)	K <sub>th</sub> (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	M Young (GPa)	Coef. Poisson	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	Résistivité 10 <sup>-4</sup> Ω.m	σ <sub>elec</sub> (10 <sup>4</sup> /Ω.cm)	T <sub>fusion</sub> (°C)	Chaleur spécifique		T <sub>cond</sub> (°C)	REF	
										J/Kg.K	Cal/g.°C			
DL	GaAs (wafer)	6,4 - 6,63	54	85,3	0,29	5,317	3,8×10 <sup>-2</sup>		1240	158			□	
	Al <sub>0,13</sub> Ga <sub>0,87</sub> As	6,24	18,2										□	
	Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> As	6,04 - 6,17	11,11										□	
	Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	5,73-0,53x	55-212x+248x <sup>2</sup>	85,3-1,8x	5,32-1,56x	5,32-1,56x			1240-58x+558x <sup>2</sup>	330+120x		27	□	
Dissipateur	Cu <sub>10</sub> W	Std	6,5	180	330	0,29	17,00	5,3×10 <sup>-4</sup>	24		160	0,039	25	□
		S	6,5	210	330		17,00	5,3×10 <sup>-4</sup>			160		25	□
	Cu <sub>15</sub> W	Std	7,2	190	310		16,40	4,6×10 <sup>-4</sup>			170	0,041	25	□
		S	7,2	220	310		16,40	4,6×10 <sup>-4</sup>			170			□
	Cu <sub>20</sub> W	Std	8,3	200	280	0,29	15,65	4,0×10 <sup>-4</sup>			180	0,044		□
		S	8,3	230	280		15,65	4,0×10 <sup>-4</sup>			180			□
	DC40	4	600	620	0,13	4,44	3,5				470			□
DC60	6	550	410	0,15	4,87	2,6				450			□	
Métaux	Cu	16,5	393,48	130	0,34	8,96	1,7×10 <sup>-4</sup>	59	1083	385	0,092	25		
	W	4,5	170	411		19,30	5,5×10 <sup>-4</sup>		3410					
	Au	14	318	112	0,42			45,5	1064	130		85		
	Sn	22	66		0,36			9	230					
	Pb	28,9	35	16	0,44									
	Mo	5,1	159	320		10,22	5,7 10 <sup>-4</sup>	18		250				
Céramiques	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,7	16,74	270		3,6	1,00×10 <sup>16</sup>			795		25	□	
	SiC												□	
	AlN	4,5	217,6	340	0,25	3,26				670		25	□	
	BeO	7,6	251,16	330	0,26	2,9	1,00×10 <sup>17</sup>			963		25		
	Cu <sub>15</sub> Mo <sub>85</sub>	6,6 - 7	184			9,9		53						
	Cu-Diamond	6 - 9	500 - 1000											
	Diamond	1 - 2	1000 - 2400	1050	0,1	3,515						27		
Brasures	Sn <sub>62</sub> Pb <sub>36</sub> Ag <sub>2</sub>	27	50,9	32	0,38	8,4			176	173		0-180		
	Au <sub>80</sub> Sn <sub>20</sub>	16	57	59,3	0,42	14,51			280	15		85		
	Indium	29 - 32,1	86	11	0,25 - 0,3	7,31			157	243		85		
	Sn <sub>96,5</sub> Ag <sub>3,5</sub>	30	33 - 55,3	44,3	0,3	7,5	6,66 - 10	9	221			85		

# Annexe - B : Champs proches des Stacks étudiés

Stack AD33019 - Champs proche à 25°C pour 110A-100Hz/200µs.

<b>M1: 0h</b> AD33019 $t_0$ (1HS)	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	4																											
	2	No																											
	3	No																											
	4	No																											
<b>M2: 168h</b> 110A-25°C 100Hz/200µs (5HS)	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	4;22;23																											
	2	14																											
	3	23																											
	4	No																											
<b>M3: 109h</b> 110A-25°C 20Hz/1ms (5HS)	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	4;22;23																											
	2	14																											
	3	23																											
	4	No																											
<b>M4: 136h</b> 110A-25°C 20Hz/1ms (5HS)	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	4;22;23																											
	2	14																											
	3	23																											
	4	No																											
<b>M5: 290h</b> 110A-25°C 200Hz/200µs (5HS)	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	4;22;23																											
	2	14																											
	3	23																											
	4	No																											
<b>M6: 354h</b> 110A-25°C 200Hz/200µs (7HS)	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	4;22;23																											
	2	14																											
	3	23																											
	4	11;17																											
<b>M7: 263h</b> 110A-25°C 200Hz/200µs (7HS)	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	4;22;23																											
	2	14																											
	3	23																											
	4	11;17																											
<b>M8: 299h</b> 110A-25°C 111Hz/400µs (7HS)	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	4;22;23																											
	2	14																											
	3	23																											
	4	11;17																											
<b>M9: 500h</b> 110A-25°C 111Hz/400µs (7HS)	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	4;22;23																											
	2	14																											
	3	23																											
	4	11;17																											



Stack AD33020 - Champs proche à 25°C pour 110A-100Hz/200µs.

	Bar	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<b>M1: 0h</b> AD33020 $t_0$ <b>(4HS)</b>	1	----																									
	2	1																									
	3	15;16																									
	4	23																									
	5	No																									
	6	No																									
<b>M2: 232h</b> 110A-25°C 100Hz/200µs <b>(10HS)</b>	1	23																									
	2	1;14																									
	3	1;15;16																									
	4	23;25																									
	5	6;23																									
	6	No																									
<b>M3: 289h</b> 110A-25°C 20Hz/10ms <b>(14HS)</b>	1	20;23																									
	2	1;14																									
	3	1;15;16																									
	4	20;23;25																									
	5	6;23																									
	6	11;17																									
<b>M4: 354h</b> 110A-25°C 200Hz/200µs <b>(15HS)</b>	1	20;23																									
	2	1;14																									
	3	1;15;16																									
	4	20;23;25																									
	5	6;23																									
	6	11;17;19																									
<b>M5: 263h</b> 110A-25°C 200Hz/200µs <b>(16HS)</b>	1	20;23																									
	2	1;14																									
	3	1;15;16																									
	4	20;23;25																									
	5	6;12;23																									
	6	11;17;19																									
<b>M6: 299h</b> 110A-25°C 111Hz/400µs <b>(16HS)</b>	1	20;23																									
	2	1																									
	3	1;15;16																									
	4	20;23;25																									
	5	6;12;23																									
	6	11;17;19																									
<b>M7: 500h</b> 110A-25°C 111Hz/400µs <b>(17HS)</b>	1	17;20;23																									
	2	14																									
	3	1;15;16																									
	4	20;23;25																									
	5	6;12;23																									
	6	11;17;19																									

## Stack AD33075 - Champs proche à 25°C pour 110A-100Hz/200µs.

<b>M1: 0h</b> <b>AD33075</b> $t_0$ <b>(4HS)</b>	<b>Bar</b>	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	No																											
	2	No																											
	3	2																											
	4	2																											
	5	2;25																											
	6	2;14																											
<b>M6: 242h</b> 110A-25°C 100Hz/200µs <b>(7HS)</b>	<b>Bar</b>	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	No																											
	2	No																											
	3	2																											
	4	2																											
	5	2;3;25																											
	6	2;14																											
<b>M6: 500h</b> 110A-25°C 100Hz/200µs <b>(7HS)</b>	<b>Bar</b>	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	No																											
	2	No																											
	3	2																											
	4	2																											
	5	2;3;25																											
	6	2;14																											
<b>M6: 123h</b> 110A-25°C 20Hz/1ms <b>(7HS)</b>	<b>Bar</b>	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	No																											
	2	No																											
	3	2																											
	4	2																											
	5	2;3;25																											
	6	2;14																											
<b>M6: 354h</b> 110A-25°C 20Hz/1ms <b>(7HS)</b>	<b>Bar</b>	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	No																											
	2	No																											
	3	2																											
	4	2																											
	5	2;3;25																											
	6	2;14																											
<b>M6: 263h</b> 110A-25°C 200Hz/200µs <b>(7HS)</b>	<b>Bar</b>	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	No																											
	2	No																											
	3	2																											
	4	2																											
	5	2;3;25																											
	6	2;14																											
<b>M6: 299h</b> 110A-25°C 111Hz/400µs <b>(7HS)</b>	<b>Bar</b>	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	No																											
	2	No																											
	3	2																											
	4	2																											
	5	2;3;25																											
	6	2;14																											
<b>M6: 500h</b> 110A-25°C 111Hz/400µs <b>(7HS)</b>	<b>Bar</b>	Em Position	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	1	No																											
	2	No																											
	3	2																											
	4	2																											
	5	2;3;25																											
	6	2;14																											

# Liste des publications

---

## Revues

Microelectronics Reliability, Vol. 50, pp. 426-466 (2010). "*Strain Estimation in III-V Materials by Analysis of the Degree of Polarization of Luminescence*", D.T. Cassidy, C.K. Hall, O. Rehioui, and L. Bechou.

Optics & Laser Technology, Vol. 40 (4), pp. 589-601, (2008). "*Measurement of the thermal characteristics of packaged double-heterostructure light emitting diodes for space applications using spontaneous optical spectrum properties*", L. Bechou, O. Rehioui, Y. Deshayes, O. Gilard, G. Quadri, and Y. Ousten.

## Conférences internationales

Photonics West 2010, San Francisco, USA. Proc. SPIE 7583, High Power Diode Laser Technology and Applications VIII, Proc. SPIE, 758314 (2010). (Poster) "*Degradation analysis of individual emitters in 808-nm QCW laser diode array for space applications*", O. Rehioui, L. Bechou, Y. Ousten, A. Kohl, T. Fillardet, and G. Volluet.

ISROS 2009, International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Space, Cagliari, Italy. (Oral) "*Electro-optical Characterizations at the Emitter Level in Stacked Laser Diodes Bars for Space Applications*", O. Rehioui, L. Bechou, T. Fillardet, A. Kohl, Y. Ousten, E. Brousse, and G. Volluet.

ISROS 2009, International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Space, Cagliari, Italy. (Oral) "*Strain Estimation in III-V Materials by Analysis of the Degree of Polarization of Luminescence*", D.T. Cassidy, C.K. Hall, O. Rehioui, and L. Bechou.

ICSO 2008, International Conference on Space Optics, Toulouse, France. (Poster) "*Benefits of individual emitter electro-optical characterization in packaged high power laser diode bars for space applications*", O. Rehioui, L. Bechou, T. Fillardet, A. Kohl, D.T. Cassidy, Y. Deshayes, Y. Ousten, and G. Volluet.

## Workshop

HEC-DPSSL 2010, 6<sup>th</sup> international Workshop on High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers, Versailles, organisé par l'école polytechnique, Paris, "*Improvement of Stacked High Power Laser Diodes bars by Individual Emitter Characterization*", O. Rehioui, L. Bechou, Y. Ousten, A. Kohl and T. Fillardet.

RADECS 2006 Workshop, RADiation and its Effect on Components and Systems, Greece. "*Impact of radiation effects on AlGaAs/GaAs, InGaN/GaN and AlGaInP/GaP packaged light emitting diodes for space applications*", O. Gilard, L. Bechou, B. Kurz, O. Rehioui, M.L. Bourqui, D. Campillo, Y. Deshayes, and G. Quadri.

# Résumé

---

Ces travaux de thèse ont pour objectif de proposer une nouvelle technique de caractérisation électro-optique de barrettes de diodes Laser de puissance (DLPs), au niveau émetteur individuel à partir d'un banc dédié, utilisées pour le pompage optique à 808nm de système LIDAR en environnement spatial et en régime QCW. Après une étude métrologique fine, ils décrivent une méthodologie de sélection d'un indicateur précoce de défaillance potentielle et sa capacité à estimer la fiabilité de DLPs en conditions opérationnelles ( $> 10^9$  impulsions à 100Hz/200 $\mu$ s). L'analyse de la dégradation des DLPs se base sur l'identification de signatures paramétriques de défaillance mises en lumière après une série de tests accélérés ciblés et relatives à l'évolution de la puissance optique, du spectre optique ( $\lambda_{\max}$ ) et du degré de polarisation (DOP) de chaque émetteur de la barrette. Nous montrons également la forte complémentarité entre la mesure du DOP par électroluminescence et par photoluminescence et nous proposons une méthodologie de sélection précoce des émetteurs en considérant leur localisation dans le plan  $(\lambda_{\max}, \text{DOP})$ . Ces études expérimentales, confortées par des simulations thermiques et mécaniques par éléments finis en introduisant un grand nombre de paramètres technologiques, ont permis de quantifier les niveaux de contraintes résiduelles dans les DLPs en fonction de différentes configurations d'assemblage et d'établir un lien avec leur fiabilité intrinsèque.

## Mots clés :

Optoélectronique, diode laser de puissance, caractérisation électro-optique, degré de polarisation, régime QCW, simulation, fiabilité.