

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par **Yannick Deshayes**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : **Electronique**

**DIAGNOSTIC DE DEFAILLANCES DE SYSTEMES OPTOELECTRONIQUES
EMISSIFS POUR APPLICATIONS DE TELECOMMUNICATION :
Caractérisations électro-optiques et simulations thermomécaniques**

Soutenue le : 19/07/2002

Après avis de :

MM. J.M. Dumas, Professeur, Université de Limoges **Rapporteurs**
A. Brun, Professeur, Institut d'Optique Laboratoire Charles Fabry à Orsay

Devant la commission d'examen formée de :

MM. A. Touboul, Professeur, Université de bordeaux 1 **Président**
J.M. Dumas, Professeur, Université de Limoges **Examineurs**
A. Brun, Professeur, Université Orsay
D. Laffitte, Ingénieur, Alcatel Optronics
M. Salagoity, Ingénieur, Solectron
Y. Danto, Professeur, Université Bordeaux 1
A.S. Barrière, Professeur, Université Bordeaux 1
L. Béchou, Maître de conférence, Université Bordeaux 1 **Rapporteur**

A Nadège, mon épouse, source de mon bonheur quotidien

*A mes parents, à ma sœur, à ma grand-mère paternelle, à ma belle-mère
qu'ils sachent combien je leur suis reconnaissant pour leur soutien tout au long de mes
études.*

A mon grand-père paternel, éternellement présent dans mon cœur

A mes grands-parents maternels qui sont partis trop vite

A mon beau-père que je n'ai pas connu, qu'il sache combien sa fille me rend heureux

A toute ma famille

*Je voudrais rendre hommage à mon père qui m'a appris la passion et l'art qui représentent,
pour moi, les deux éléments essentiels de la vie d'un homme. Mes passions sont ma femme et
mes recherches scientifiques, l'art est un domaine qu'il me reste encore à explorer.*



Remerciements

*Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire de microélectronique IXL de l'Université de Bordeaux 1 dirigé par Monsieur le Professeur **A. Touboul**. Je le remercie vivement pour la confiance et le soutien qu'il m'a témoigné tout au long de mon travail de thèse et pour avoir bien voulu accepter d'être président de ce jury.*

*Que Monsieur le Professeur **Y. Danto**, Directeur de cette thèse, sache que la confiance et la grande autonomie qu'il m'a accordées, ont été précieuses pour mener à bien ces travaux. Je le remercie pour son accueil au sein de son groupe de recherche, son soutien et ses engagements constants au cours des ces trois années.*

*Qu'il me soit permis d'exprimer ma sincère gratitude à Monsieur **A. Brun**, Professeur à l'Université d'Orsay, ainsi qu'à Monsieur **J.M. Dumas**, Professeur à l'Université de Limoges, pour l'attention accordée à la correction de ce mémoire, leurs judicieuses remarques et l'honneur qu'ils m'ont fait en venant juger ce travail malgré leurs nombreuses occupations.*

*La rigueur, le sens du travail bien fait et donner le meilleur de soi sont les actions qui régissent le travail quotidien d'un chercheur. En ce sens, Monsieur **L. Bechou**, codirecteur de cette thèse, possède sans conteste ces qualités. Je lui adresse mes plus profonds remerciements pour la confiance qu'il me témoigne, sa patience, sa disponibilité, la rigueur qu'il m'a enseignée et les nombreuses discussions fructueuses et enrichissantes que nous avons eues ensemble. Je le remercie pour sa participation à ce jury et l'assure de ma sincère amitié.*

*Les premiers pas dans le monde de la recherche sont les plus difficiles et nécessitent un accompagnement soutenu. En ce sens, j'ai eu le très grand honneur d'être un élève de Monsieur le Professeur **Serge Barrière** qui m'a accueilli et m'a transmis la passion de la physique des composants. Je lui témoigne de ma plus profonde gratitude pour sa participation à ce jury et l'assure de ma plus sincère amitié.*

*La connaissance théorique n'est pas le seul atout d'un chercheur, il doit, de manière égale s'engager sur des travaux expérimentaux. Je remercie, tout particulièrement Monsieur **L. Hirsch** pour m'avoir accordé très tôt sa confiance et m'avoir appris à maîtriser les techniques associées aux mesures de composants. Je lui témoigne de toute ma reconnaissance et l'assure de ma sincère amitié.*

*Mes vifs remerciements s'adressent également à Madame **D. Laffitte**, Responsable Qualification ALCATEL Optronics, pour son précieux soutien, sa confiance en acceptant de parrainer cette thèse et l'intérêt porté aux simulations ANSYS. Je tiens à remercier Monsieur **J.L. Goudard**, Monsieur **G. Ughetto** et Monsieur **G. Marques**, Ingénieurs ALCATEL Optronics, pour leur précieuse collaboration et leur intérêt pour mes travaux de recherche.*

*Je suis particulièrement reconnaissant à Monsieur **M. Salagoïty**, Directeur SOLECTRON, pour l'intérêt qu'il a porté à ces travaux et pour avoir accepté d'être membre de ce jury.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Messieurs **B. Porte**, **S. Destor** et **P. Berenguer** pour leur aide précieuse lors de l'élaboration des systèmes nécessaires aux mesures électro-optiques effectuées dans cette thèse.*

*Un grand merci à Messieurs **B. Tregon**, **J.Y. Deletage**, **L. Mendizabale** et mademoiselle **S. Huyghe** pour leur bonne humeur, leur soutien moral et leur appui technique tant au niveau expérimental qu'au niveau des simulations sous ANSYS.*

*De manière générale, l'enseignement supérieur prend une part non négligeable du travail d'un doctorant. Je remercie donc Messieurs **Ph. Marchegay** et **A. Meresse** pour leur confiance et pour m'avoir accueilli à l'E.N.S.E.I.R.B au département électronique de l'Université Bordeaux 1. Qu'ils sachent que leurs précieux conseils me permettent sans cesse de progresser et d'améliorer la qualité de mon travail pédagogique.*

Enfin, j'exprime ma plus profonde sympathie à tous les membres du Laboratoire que je n'ai pas nommés. Que chacun veuille bien reconnaître dans cette étude, les résultats d'un travail d'équipe renforcé par des opérations de transversalité menées au sein de l'IXL.

SOMMAIRE

CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	1
CHAPITRE I - COMPOSANTS ET SYSTEMES OPTOELECTRONIQUES – ETAT DE L'ART TECHNOLOGIQUE	3
I / INTRODUCTION.....	3
II / CARACTERISTIQUES DES COMPOSANTS EMISSIFS IR.....	4
II.1 / LES APPLICATIONS DE L'OPTOELECTRONIQUE	4
II.2 / POSITION DU MARCHE ACTUEL DE L'OPTOELECTRONIQUE	5
II.3 / PROPRIETES PHYSIQUES DE L'EMISSION DES COMPOSES III-V.....	7
II.3.a / Introduction.....	7
II.3.b / Rappels des propriétés physiques de la luminescence	8
II.4 / COMPOSES TERNAIRES ET QUATERNAIRES PHOTONIQUES	9
III / TECHNOLOGIE DES COMPOSANTS ET MODULES IR	11
III.1 / HIERARCHIE DES SYSTEMES OPTOELECTRONIQUES.....	11
III.2 / MECANISMES PHYSIQUES DES COMPOSANTS EMISSIFS IR	13
III.2.a / Emission de lumière dans une homojonction.....	13
III.2.b / Emission de lumière dans une hétérostructure	16
III.2.c / Technologies de sélection de longueur d'onde.....	21
III.3 / TECHNOLOGIE DES MODULES EMETTEURS IR.....	23
III.3.a / Modules à base de diode électroluminescente	24
III.3.b / Architecture de têtes optiques.....	25
III.4 / ARCHITECTURES DES RESEAUX DE TRANSMISSION OPTIQUE.....	27
III.4.a / Introduction.....	27
III.4.b / Chaîne d'émission-réception en télécommunication : interconnexions externes... ..	28
III.4.c / Interconnexions intégrées	30
III.5 / SYNTHESE	32
IV / CONTEXTE ET JUSTIFICATION DE L'ETUDE.....	32
IV.1 / MECANISMES DE DEFAILLANCE ET FACTEUR D'AGGRAVATION DES COMPOSANTS IR	32
IV.1.a / Mécanismes généraux de dégradation.....	33
IV.1.b / Méthodes d'analyse de défaillance des composants émissifs.....	34
IV.1.c / Synthèse	37
IV.2 / MECANISMES DE DEFAILLANCE ET FACTEUR D'AGGRAVATION DES ASSEMBLAGES IR.....	38
IV.2.a / Les exigences sur l'assemblage pour l'optoélectronique.....	38
IV.2.b / Causes de défaillance dans un module optoélectronique	38
IV.2.c / Analyse des points critiques d'un assemblage.....	39
IV.3 / GESTION DES ETUDES ENVISAGEES.....	40
V / CONCLUSION.....	41
CHAPITRE II - PRINCIPES ET STRUCTURES EMISSIVES III-V – DESCRIPTION DU BANC D'ANALYSES ELECTRO-OPTIQUES	43
I / INTRODUCTION.....	43

II / MECANISMES ELECTRO-OPTIQUES DES STRUCTURES EMISSIVES	44
II.1 / CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES.....	44
II.1.a / <i>Caractéristiques courant – tension</i>	44
II.1.b / <i>Relations courant-tension en fonction du niveau d'injection</i>	46
II.1.c / <i>Synthèse des paramètres exploitables à partir des courbes I(V)</i>	54
II.2 / CARACTERISATIONS OPTIQUES.....	56
II.2.a / <i>Spectre d'émission d'une structure émissive III-V</i>	57
II.2.b / <i>Notion de puissance optique</i>	67
II.2.c / <i>Diode laser à puits quantiques</i>	72
II.2.d / <i>Synthèse des paramètres extraits des mesures optiques</i>	74
III / MODELISATION ELECTRIQUE D'UN COMPOSANT EMISSIF	75
III.1 / MODELISATION D'UNE DEL	76
III.1.a / <i>Modèle complet</i>	76
III.1.b / <i>Exemples de modèles électriques</i>	78
III.2 / MODELISATION D'UNE DIODE LASER.....	80
III.2.a / <i>Structure "Ridge" utilisée pour l'amplification optique sur fibre optique</i>	80
III.2.b / <i>Structure enterrée BH utilisée pour l'émission à travers une fibre optique</i>	81
III.2.c / <i>Exemple de modèles électriques</i>	81
III.3 / SYNTHÈSE	82
IV / DESCRIPTION DU BANC D'ANALYSES ELECTRO-OPTIQUES	83
IV.1 / CRITERES DE CHOIX DES SOUS-ENSEMBLES DU BANC	83
IV.2 / ANALYSES COURANT (TENSION) - PERFORMANCES	85
IV.2.a / <i>Schéma de principe de l'ensemble</i>	85
IV.2.b / <i>Caractéristiques techniques</i>	85
IV.3 / ANALYSE DU SPECTRE OPTIQUE - PERFORMANCES	88
IV.3.a / <i>Schéma de principe de l'ensemble</i>	88
IV.3.b / <i>Caractéristiques techniques</i>	88
IV.4 / PRINCIPES D'ANALYSES DE LA PUISSANCE OPTIQUE - PERFORMANCES.....	89
IV.4.a / <i>Schéma de principe de l'ensemble</i>	90
IV.4.b / <i>Caractéristiques techniques</i>	90
V / CONCLUSION.....	91
CHAPITRE III - MISE EN EVIDENCE DE SIGNATURES DE DEFAILLANCE DE SYSTEMES OPTOELECTRONIQUES EMISSIFS	93
I / INTRODUCTION.....	93
II / CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES ET PROFILS DE MISSION	94
II.1 / CYCLES THERMIQUES	94
II.2 / STOCKAGE THERMIQUE	94
II.3 / ALIMENTATION DU COMPOSANT PAR COURANT CONTINU	95
III / ANALYSES DES VIEILLISSEMENTS DE DELS.....	95
III.1 / DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE DE VIEILLISSEMENT.....	96
III.1.a / <i>Profils de mission - Paramètres fonctionnels</i>	96
III.1.b / <i>Méthodologie et déroulement des campagnes de vieillissement</i>	97
III.2 / CARACTERISATION INITIALE DES DELS : ASPECT ELECTRIQUE ET OPTIQUE.....	100

III.2.a / Evaluation technologique	100
III.2.b / Caractérisations électro-optiques et modélisation électrique de la DEL	101
III.3 / IDENTIFICATION ET EXPLOITATION DES SIGNATURES DE DEFAILLANCE	108
III.3.a / Détermination de l'impact des différents types de vieillissement	108
III.3.b / Analyses des signatures de défaillance en stockage actif	110
III.3.c / Analyses des mécanismes de défaillance relatifs à la zone II	115
III.3.d / Hypothèses de variation de R_s	126
III.3.e / Synthèse des résultats	130
III.4 / IMPACT DU COURANT SUR LA DERIVE DES PARAMETRES FONCTIONNELS	130
III.4.a / Impact du courant sur la puissance optique	131
III.4.b / Impact du courant sur la variation du paramètre p	134
III.4.c / Impact du courant sur la variation de R_s	135
III.5 / SYNTHESE DES RESULTATS	138
IV / TETES OPTIQUES FABRY-PEROT EMETTANT A 1310 NM	139
IV.1 / DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE DE VIEILLISSEMENT	139
IV.1.a / Profils de mission	140
IV.1.b / Déroulement de la campagne de vieillissement	140
IV.2 / CARACTERISATION INITIALE DE LA TETE OPTIQUE	142
IV.2.a / Evaluation technologique	142
IV.2.b / Caractérisation électro-optique et modélisation électrique de la tête optique	144
IV.3 / IDENTIFICATION ET ANALYSES DES SIGNATURES DE DEFAILLANCE	153
IV.3.a / Signature de défaillance électro-optique	154
IV.3.b / Signature de défaillance optique	163
IV.3.c Synthèse des résultats	165
IV.4 / MESURES ELECTRIQUES INVERSES POUR L'ANALYSE DE DEFAILLANCE	166
IV.4.a / Signatures de défaillance électro-optique	166
IV.4.b / Signatures de défaillance optique	168
IV.5 / SYNTHESE DES RESULTATS	169
V / CONCLUSION	170
CHAPITRE IV - ETUDE THERMOMECHANIQUE D'UNE TETE OPTIQUE –	
EVALUATION DES ZONES CRITIQUES	173
I / INTRODUCTION	173
II / PRESENTATION DE LA TETE OPTIQUE	174
II.1 / ANALYSE TECHNOLOGIQUE DE L'ENSEMBLE DE LA TETE OPTIQUE	174
II.2 / IDENTIFICATION DES ZONES CRITIQUES	175
II.2.a / Définition des sous-ensembles proches de l'axe optique	176
II.2.b / Analyses des propriétés thermomécaniques des matériaux constituant la tête optique	176
II.2.c / Visualisation des points d'appui	177
II.2.d / Localisation des zones critiques	177
II.3 / SYNTHESE – PLAN D'ETUDE	180
III / RESULTATS DES SIMULATIONS THERMOMECHANIQUES	180
III.1 / INFLUENCE DES SOUDURES PAR LASERS Nd : YAG SUR LE SOUS-ENSEMBLE N°1-A	181
III.1.a / Problématique	181
III.1.b / Bilan des analyses mécanique et thermique du sous-ensemble	182

III.1.c / Conditions de simulation.....	188
III.1.d / Résultats de simulations relatives à l'étape de fabrication par tirs laser Nd : YAG	
.....	193
III.1.e / Hypothèse de relaxation des contraintes – mise en évidence de la présence de défauts dans les soudures YAG	199
III.2 / ANALYSE DU SYSTEME PALETTE LASER-EMBASE PELTIER (SOUS-ENSEMBLE N°1-B)	201
III.2.a / Objectifs	201
III.2.b / Modèles et conditions de simulation.....	202
III.2.c / Résultats des simulations linéaires	205
III.2.d / Etude de la plasticité du joint de brasure	207
III.2.e / Synthèse et interprétation.....	211
III.3 / ANALYSE DU SYSTEME FIBRE OPTIQUE.....	211
III.3.a / Objectifs	211
III.3.b / Modèle et conditions de simulation.....	211
III.3.c / Résultats des simulations	215
III.3.d / Synthèse des résultats.....	218
III.4 / SYNTHESE GLOBALE DES SIMULATIONS	218
IV / ANALYSES DE VIEILLISSEMENTS ET PROPOSITIONS D'EXPERTISE	220
IV.1 / ANALYSE DES TESTS DE VIEILLISSEMENT.....	220
IV.1.a / Analyses électro-optiques des diodes laser DFB 1550 nm	220
IV.1.b / Résultats des tests mécaniques.....	220
IV.1.c / Résultats des stockages en température	220
IV.1.d / Résultats des cycles thermiques- Impact sur la dérive de la puissance optique ..	221
IV.2 / RESULTATS DES ANALYSES DE DEFAILLANCES	223
IV.2.a / Analyses technologiques des sous-ensembles	224
IV.2.b / Test par microscopie acoustique.....	225
IV.3 / PROPOSITION D'UN PLAN DE TESTS EXPERIMENTAUX COMPLEMENTAIRES	227
V / CONCLUSION.....	228
CONCLUSION GENERALE	231
ANNEXE A / COMPLEMENTS DE L'ETUDE ELECTRO-OPTIQUE	237
A.1. Polarisation inverses dans les composants III-V.....	237
A.2. Constantes physiques – calculs annexes	238
ANNEXE B / SIMULATION THERMOELECTRIQUE POUR LES DELS 935 NM	241
B.1. Modélisation électrique.....	241
B.2. Modélisation thermoélectrique ANSYS	241
ANNEXE C / COMPLEMENTS DES SIMULATIONS ANSYS.....	244
C.1. Systèmes mécaniques – notion de liaison.....	244
C.2. Etude thermique des tirs laser Nd : YAG	246
C.3. Déformation élastique induite par la force de pression.....	248

Contexte général de l'étude

L'évolution des systèmes optoélectroniques émissifs pour des applications de télécommunication relève le défi d'associer une forte augmentation des débits d'information, à un volume millimétrique et à une fiabilité très élevée. Les standards industriels de qualification actuels imposent une durée de vie de ces systèmes devant atteindre 25 ans avec moins de 100 FIT (10^{-7} défaillances/h). Cependant, lors de la réalisation de ces systèmes, les différentes phases de fabrication et d'assemblage doivent minimiser le taux de défauts inhérents à l'hétérogénéité des couches épitaxiées pour la puce et au procédé d'alignement optique pour le module. Le diagnostic de défaillances de ces systèmes, s'il est réalisé avec efficacité et s'il permet de détecter de façon précoce une dégradation, représente un moyen de contribuer à améliorer leur qualité et leur fiabilité.

De manière générale, le mode de défaillance majeur caractérisant un composant optoélectronique émissif est associé à la diminution soudaine ou graduelle de la puissance optique émise après vieillissement. La mise en évidence du mécanisme de dégradation, à l'origine de cette défaillance requiert des moyens d'analyse physique pouvant être relativement longs et coûteux. Une démarche complémentaire permet de modéliser le comportement sous la forme d'un circuit électrique équivalent en régime statique. Les paramètres de ce modèle sont alors dépendants de la technologie et leur évolution traduit une dérive comportementale électrique et/ou optique.

La complexité d'un système optoélectronique émissif, relative aux multiples processus de fabrication utilisés et/ou à l'intégration d'un procédé de couplage et d'alignement du composant et de la fibre optique, rend encore plus difficile la mise en évidence de l'élément responsable de la dérive de puissance optique.

Les niveaux de qualification actuellement exigés ne peuvent pas être assurés par les techniques habituelles de sélection des produits finis, ni démontrés par les essais accélérés visant à évaluer la durée moyenne de vie à 50% de défaillances. En effet, même en acceptant seulement deux défaillances sur un essai classique de 1000 heures avec un facteur d'accélération de 300 à 400, plusieurs centaines voire plusieurs milliers de composants sont nécessaires à la composition d'échantillons de test. Concernant la défaillance proprement dite, il existe des méthodes d'analyse non-destructive nécessitant peu ou pas de préparation des échantillons : la thermographie infrarouge pour une cartographie de dissipation thermique d'un composant [1], l'imagerie thermique par reflectométrie laser d'un composant [2], la caractéristique courant-tension du composant émissif, l'analyse spectrale de la lumière émise à travers la fibre optique, l'analyse de la puissance optique de sortie du module [3, 4, 5].

Les techniques d'analyses électro-optiques regroupant les caractéristiques courant-tension $-I(V)-$, caractéristiques spectrales $-L(\lambda)-$ et de puissance optique de sortie $-P(I)-$ sont couramment utilisés dans l'industrie mais la richesse des informations contenues dans ces dernières est souvent peu exploitée et maîtrisée. De manière générale, le problème essentiel réside dans une interprétation des résultats obtenus qui font souvent appel aux mécanismes de défaillance ou à la connaissance précise de la technologie et de l'architecture du composant émissif. Les systèmes de mesure sont alors utilisés de manière systématique permettant une vérification de fonctionnement de type "Go-No Go".

Lorsque l'alignement entre la fibre optique et la diode laser est affecté, la localisation de la défaillance est encore plus difficile à démontrer par des mesures expérimentales citées précédemment. Dans ce cas, une approche palliative basée sur des simulations physiques et/ou fonctionnelles est un outil approprié à la détermination de la zone critique du système susceptible d'être à l'origine de la défaillance.

Le travail, mené dans le cadre de cette thèse, s'attache donc à considérer le composant photonique comme une entité attachée à une double définition :

- Une définition physique basée sur une modélisation à partir des équations complexes régissant sa fonctionnalité liée à la technologie.
- Une définition orientée "système", plus souple d'utilisation, basée sur des modèles simplifiés avec un jeu de paramètres beaucoup plus restreints prenant en compte l'interaction entre le composant et son environnement.

Notre étude, privilégiant la deuxième définition, s'appuie sur une demande croissante d'équipementiers de systèmes de télécommunication par fibre optique dont les besoins en terme de caractérisation et de prévision de la durée de vie du produit nécessitent de développer des méthodologies rapides, fiables en considérant un nombre limité d'échantillon et d'information sur le système caractérisé (paramètres fournis par une "datasheet" ou un ensemble de grandeurs facilement mesurables). L'objectif de ce travail est donc double :

- Développer et caractériser un système de mesures électro-optiques avec une dépendance en température à la caractérisation et l'analyse de défaillance de systèmes optoélectroniques émettant dans l'infrarouge pour des applications de télécommunication.
- Localiser les zones critiques de l'assemblage par des simulations utilisant les propriétés physiques, plus particulièrement thermomécaniques, du matériau, en intégrant les étapes de fabrication du système permettant de conclure sur la criticité et la robustesse du système soumis à un profil de mission donné.

C'est dans le cadre notre travail s'est déroulé au Laboratoire de microélectronique IXL et s'articulera autour de quatre chapitres.

- Le premier chapitre débute par un état de l'art technologique des composants et systèmes optoélectroniques émissifs visant à situer le contexte et les objectifs de la thèse.
- Le chapitre II rappelle les mécanismes physiques mis en jeu dans les composants émissifs en reliant les phénomènes de transport électrique et la luminescence aux paramètres fonctionnels du composant directement exploitables. Ces derniers permettant alors la mise en place de modèles électriques équivalents du composant à partir d'analyses réalisées sur le système complet et en tenant compte des résultats menés sur des composants "nus" de technologie similaire extraits d'une recherche bibliographique étendue. L'objectif est de caractériser les performances des mesures développées au sein des différents sous-ensembles d'un banc d'analyses électro-optiques en température développé au Laboratoire. Ce banc, adapté de manière spécifique à l'évaluation de systèmes fibrés ou non, permet d'extraire les paramètres fonctionnels du composant dans sa configuration technologique finale.
- L'extraction de signatures de défaillances précoces électro-optiques avec une discrimination composant/alignement optique constitue le point clé du chapitre III. Deux systèmes sont étudiés : les diodes électroluminescentes émettant à 935 nm et les têtes optiques Fabry-Pérot dont la longueur d'onde d'émission est centrée sur 1310 nm.
- Enfin le quatrième et dernier chapitre présente une étude, menée en accord avec le fabricant, en vue de l'évaluation de la criticité thermomécanique d'une tête optique 1550 nm. Nous effectuerons des simulations réalisées en trois dimensions basées sur une approche "multiphysics" par éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS en tenant compte des courbes contrainte-déformation expérimentales et des contraintes appliquées lors de la fabrication de la tête optique (soudage par tirs laser Nd : YAG, forces de maintien, bridage, ...) puis nous validerons nos résultats par des tests expérimentaux réalisés sur des sous-ensembles définis comme critiques pour le couplage optique entre la diode laser et la fibre. L'objectif de cette dernière partie est de quantifier la susceptibilité thermomécanique de chaque sous-ensemble et de déterminer leur degré d'implication respectif dans la diminution de la puissance optique lors de cycles thermiques (-40 / +85 °C).

Chapitre I - Composants et systèmes optoélectroniques – Etat de l'art technologique

I / INTRODUCTION

La formidable progression des technologies optoélectroniques pour les applications de télécommunication, qui ont fortement investi le marché ces dix dernières années, sont essentiellement dues aux capacités de transmission par fibre optique et aux performances atteintes par les composants. En effet, ces dernières ont commencé, depuis les années 90, par remplacer les réseaux de télécommunication câblés en cuivre limités à des débits de 100 Mbits/s en moyenne. Actuellement, les performances des technologies optoélectroniques, atteignant déjà plus de 160 Gbits/s grâce aux technologies de multiplexage de longueur d'onde λ (WDM), ne cessent d'augmenter et entrent en concurrence avec les technologies des interconnexions électroniques. La forte bande passante disponible sur une fibre optique monomode et la maîtrise des procédés de fabrication des matériaux III-V entrent, à présent, en concurrence avec les technologies développées en électronique essentiellement sur silicium. Cependant, la maîtrise des techniques de fabrication des systèmes optoélectroniques est plus délicate que pour les technologies microélectroniques pour deux raisons majeures :

- L'alignement optique est un paramètre supplémentaire à prendre en compte dans la stabilité de fonctionnement de ces systèmes. Les tolérances d'alignement entre l'émetteur ou le récepteur et la fibre optique sont souvent inférieures à quelques dizaines de μm de déplacement dans le plan perpendiculaire à l'axe optique et de quelques centièmes de degré de rotation pour les éléments situés sur l'axe optique [3, 4].
- Le coût de fabrication pour les technologies optiques est relativement élevé par rapport aux fabrications pour des systèmes électroniques, en particulier pour les systèmes intégrés. En effet, une structure de base pour une diode laser peut comporter plus de 20 couches épitaxiées dépassant de très loin la complexité des transistors électroniques [5].

L'évolution croissante de la complexité des systèmes de transmission et la densification accrue des technologies d'assemblage, pour les applications optoélectroniques, engendre une complexité croissante et un besoin en nouveaux modes d'encapsulation, rendant difficile l'analyse des défaillances. La conséquence directe est que la fiabilité de ces systèmes est alors de plus en plus difficile à estimer. Parmi l'ensemble des défaillances identifiées, on relève deux points essentiels focalisant l'attention particulière des technologues et des équipementiers :

- ☞ les dérives des paramètres électro-optiques de la puce,
- ☞ l'alignement optique pour l'assemblage.

L'ensemble de ces considérations nous a conduit à structurer ce chapitre en quatre points :

- ❑ Une revue des principales applications optoélectroniques de l'émission infrarouge (IR) dont l'objectif sera de situer le type de composants retenus pour notre étude : les émetteurs optoélectroniques IR pour les télécommunications.
- ❑ Un état de l'art des technologies des composants et systèmes optoélectroniques précisant les propriétés physiques et les structures des composants ainsi que l'architecture des systèmes associés.
- ❑ Le recensement de l'ensemble des modes de défaillance sur les composants et systèmes optoélectroniques émissifs IR pour les télécommunications.
- ❑ Le contexte de l'étude mettant en lumière l'intérêt d'une approche "signature" de défaillance à partir des analyses électro-optiques et une étude sur les simulations thermomécaniques en prenant en compte le composant dans son environnement technologique final.

II / CARACTERISTIQUES DES COMPOSANTS EMISSIFS IR

Cette partie permet de situer notre étude parmi les nombreux domaines de l'optoélectronique, dont le champ d'applications est très vaste et ne peut être entièrement développé même dans le cadre d'une présentation générale. Nous effectuerons, tout de même, une brève revue des applications de l'optoélectronique en précisant les deux paramètres les plus caractéristiques que sont la longueur d'onde d'émission et les matériaux mis en jeu. Par la suite, nous déterminerons la place de l'optoélectronique sur le marché mondial et plus particulièrement les applications aux télécommunications qui feront l'objet d'un développement plus spécifique. Après cette présentation, les règles d'émission de lumière au sein d'une structure III-V seront posées. Cette activité sera divisée en deux parties, la première traitera des principes physiques de l'émission et la seconde des différents matériaux permettant de réaliser des composants adaptés aux différentes applications énumérées.

II.1 / Les applications de l'optoélectronique

Les différentes applications de l'optoélectronique sont conduites essentiellement par la longueur d'onde. La gamme de longueur d'onde est définie par le type de matériau semiconducteur utilisé et le paramètre de maille pour fabriquer la zone d'émission et le substrat du composant (figure 1).

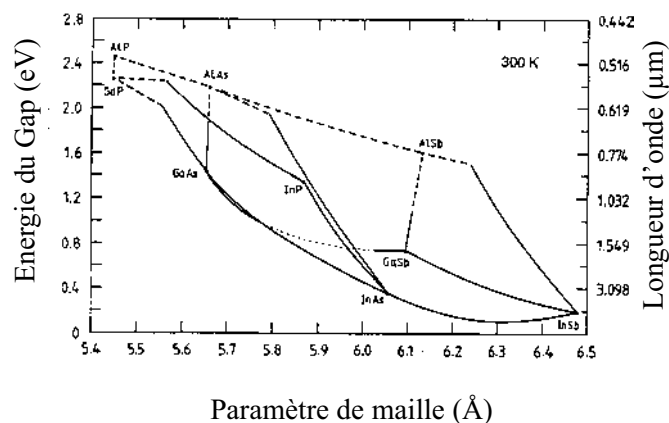


Figure 1 – Représentation de différents composés III-V en fonction de la longueur d'onde (d'après [6])

Les applications optoélectroniques peuvent se diviser en deux parties :

- Applications "grand public"

Les différentes applications utilisées par le consommateur ont fortement évolué depuis les années 90. Ces dernières sont, en grande partie, énumérées dans le tableau 1.

Applications	Longueur d'onde	matériau
CD	780 nm	InGaAlP
DVD	650 nm et 780 nm	AlGaAsP, InGaAlP
DAT	780 nm	InGaAlP
Mini disc	780 nm	InGaAlP
Télécommande	850 nm - 980 nm	AlGaAs/GaAs – InGaAs/AlGaAs sur GaAs
Code barre	850 nm – 980 nm	

Tableau 1 – Liste des applications "Grand Public"

- Systèmes de transmission par fibre optique

Les différentes applications utilisées pour la transmission par fibre optique sont énumérées dans le tableau 2.

Applications	Longueur d'onde	matériau
Emetteurs télécoms	1310 nm, 1550 nm	InGaAsP/InP
Amplificateur optique	980 nm, 1480 nm	InGaAs/AlGaAs sur GaAs, InGaAsP/InP
Echanges de données au sein d'un système	1310 nm	InGaAsP/InP
Automobile, aviation	650 nm, 1310 nm	AlGaAsP, InGaAsP/InP

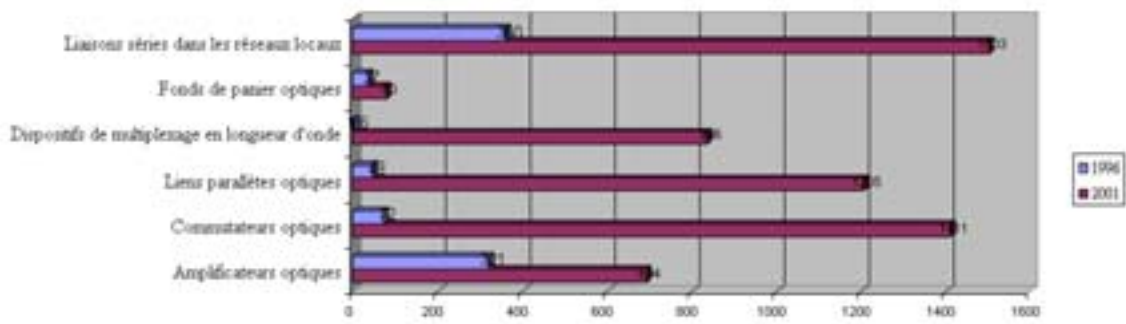
Tableau 2 - Liste des applications pour les transmissions par fibre optique

Les applications, faisant l'objet de l'étude, sont les émetteurs pour les télécommunications dont la longueur d'onde d'émission se situe à 1310 nm et à 1550 nm (InGaAsP/InP). La prochaine section permet de préciser l'évolution des transmissions par fibre optique dans le marché mondial.

II.2 / Position du marché actuel de l'optoélectronique

Cette section donne un aperçu rapide de l'évolution du marché des systèmes optoélectroniques appliqués aux télécommunications. La figure 2 montre la très forte augmentation des chiffres d'affaires pour les sous-ensembles constituant les systèmes de télécommunications par fibre optique. Les premiers systèmes développés pour ces applications, sont les liaisons dans les réseaux locaux et les amplificateurs optiques (EDFA¹) [7]. Ces systèmes ont une progression nettement moins importante que les nouveaux systèmes tels que : le multiplexage de longueur d'onde, les liens parallèles optiques et les commutateurs optiques. Ces derniers constituent le maillon central des télécommunications à très haut débit.

¹ EDFA : Amplificateur à fibre optique dopée Erbium : Erbium doped fiber amplifier.



Chiffre d'affaires en M\$

Figure 2 – Evolution du marché mondial des sous-systèmes de transmission par fibre optique (d'après [8])

Les applications de télécommunication à très haut débit permettent de prévoir des taux de transfert supérieurs aux systèmes de communication déjà établis tels que les liaisons par satellite. La figure 3 donne un aperçu de la progression des capacités de transmissions des différents systèmes de télécommunication en fonction des années.

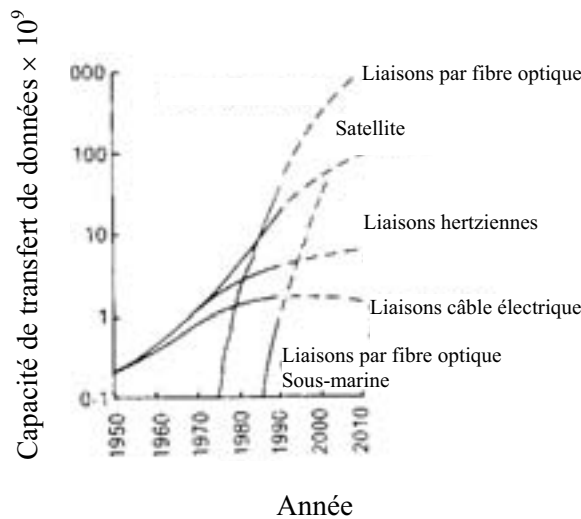


Figure 3 – Evolution des capacités globales de transmission (d'après [8])

Les technologies émergentes sont les systèmes de télécommunication à très haut débit par fibre optique. Cette remarquable performance nous a conduit à concentrer nos recherches sur les émetteurs utilisés pour ces applications. Ces recherches débutent par l'origine de l'émission de lumière au sein d'un matériau semiconducteur. La suite de l'exposé est donc dédiée aux propriétés physiques de l'émission dans un matériau semiconducteur.

II.3 / Propriétés physiques de l'émission des composés III-V

II.3.a / Introduction

Pour les applications actuelles de télécommunication, deux composés III-V, particulièrement GaAs et InP, se sont imposés par leur caractéristique d'émission :

- ❑ matériaux ayant un gap permettant l'émission dans le proche infrarouge,
- ❑ faible évolution du paramètre de maille en fonction des éléments de substitution.

Les composants à base de GaAs sont apparus comme de bons candidats pour le pompage optique dans les **EDFAs**² pour des longueurs d'onde de 1550 nm. En effet, leurs longueurs d'onde d'émission se situent autour de 980 nm correspondant au pompage des niveaux d'énergie de l'Erbium pour amplifier l'émission de photons à 1550 nm [9]. Pour les composants à base d'InP, les longueurs d'onde sont situées autour de 1310 nm et 1550 nm. Ces deux longueurs d'onde correspondent aux minimums d'absorption optique d'une fibre optique illustrés dans la figure 4. Les composants sur InP sont donc bien adaptés pour des émissions à longue distance dans une fibre optique.

L'ensemble de ces systèmes est à la base des télécommunications internationales par fibre optique.

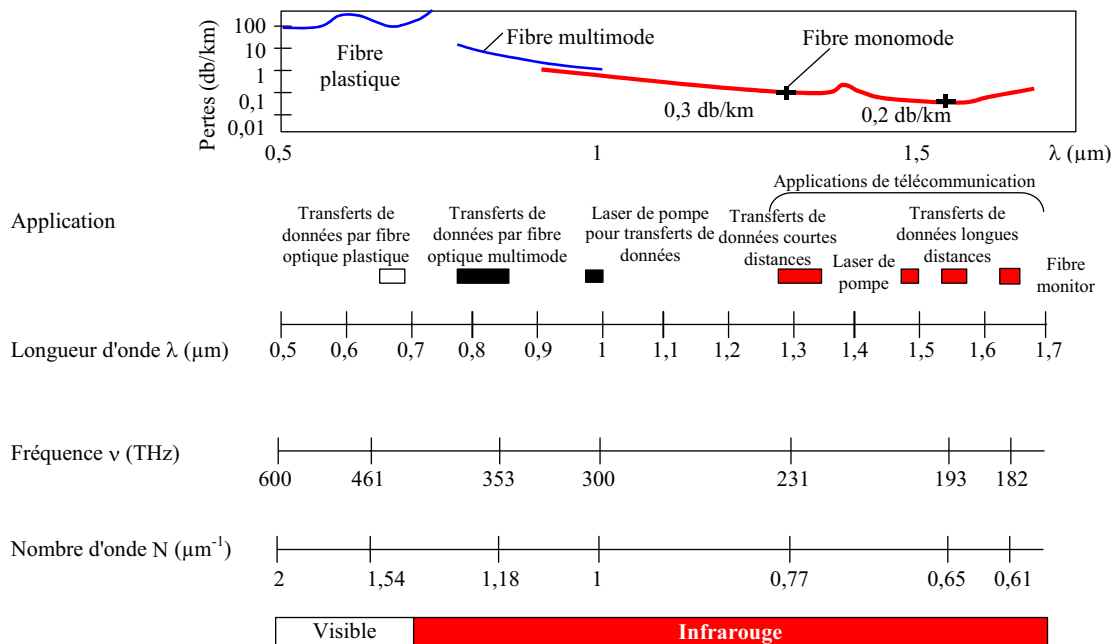


Figure 4 – Représentation de l'atténuation dans une fibre optique en fonction de la longueur d'onde (d'après [10])

Nous venons de présenter les caractéristiques des matériaux GaAs et InP permettant de les utiliser au sein des systèmes optoélectroniques. Nous allons, à présent, détailler le principe de l'émission afin de préciser les propriétés physiques nécessaires favorisant la luminescence.

² EDFA : Amplificateur à fibre optique dopée Erbium : Erbium doped fiber amplifier.

II.3.b / Rappels des propriétés physiques de la luminescence

La propriété essentielle des matériaux III-V permettant d'obtenir une émission de lumière est liée au fait que le gap est direct. Rappelons les différentes conditions permettant d'obtenir un photon à partir de transitions électroniques :

- On définit l'élément de la matrice $W_{n,k,n',k'}$ de la bande n , de vecteur d'onde k optiquement excité sur une bande n' de vecteur d'onde k' :

$$W_{n,k,n',k'} = -\frac{qE}{V_i} \mathbf{I} \delta(\mathbf{k}' - \mathbf{k}_{op} - \mathbf{k}) \quad \text{E II-1}$$

où E est le champ électrique, V_i est le volume considéré, \mathbf{k}_{op} est le vecteur d'onde de la lumière, δ est la fonction de *Kronecker*³ et \mathbf{I} est une intégrale dont le calcul est détaillé dans l'annexe A.2.1 [11].

Le terme de la fonction de *Kronecker* exprime la conservation des moments dans l'interaction électron-photon :

$$\mathbf{k}' = \mathbf{k} + \mathbf{k}_{op}$$

Or le vecteur d'onde de l'électron et le vecteur d'onde du photon sont distincts : le vecteur d'onde de la zone de Brillouin est de l'ordre de $\mathbf{k} = 2\pi/a = 10^8 \text{ cm}^{-1}$ (a est la distance interatomique) alors que le vecteur d'onde optique peut être évalué à $\mathbf{k}_{op} = 2\pi/\lambda \approx 10^4 - 10^6 \text{ cm}^{-1}$ [11]. Le vecteur d'onde de la lumière est donc négligeable devant celui des différentes bandes d'où :

$$\mathbf{k}' \approx \mathbf{k} \quad \text{E II-2}$$

Cette relation démontre que les transitions optiques sont verticales

- L'énergie des photons émis est voisine du gap du matériau :

$$\hbar\omega = E_c(\mathbf{k}) - E_v(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m_r} + E_g \quad \text{E II-3}$$

On trouve alors que le matériau à gap direct est privilégié pour les émissions de lumière à partir de transitions électroniques. De plus, son gap est proche de la longueur d'onde d'émission.

La structure de bande des matériaux III-V comme le GaAs ou l'InP présente une largeur de bande interdite plus grande que celle du silicium et un gap à transmission directe. En effet, cet aspect comporte un intérêt particulier pour les composants optoélectroniques.

³ Fonction de *Kronecker* : $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$; $\delta_{ij} = 1$ si $i = j$

- le coefficient d'absorption des photons est élevé,
- le rendement de recombinaison radiative peut atteindre 100%,
- la durée de vie des porteurs minoritaires est relativement élevée.

L'émission de photons est donc rendue possible en favorisant les transitions à vecteur d'onde \vec{k} constant. Cette condition est réalisée dans la mesure où la bande de valence est préférentiellement peuplée de trous et la bande de conduction d'électrons. La présence des deux types de porteurs est nécessaire pour obtenir une émission de photons. Pour une densité de porteurs faibles, l'émission spontanée est favorisée et lorsque la densité devient importante, l'émission stimulée devient prépondérante. Nous détaillerons plus précisément ces phénomènes dans le chapitre II.

En considérant les deux matériaux InP et GaAs, les possibilités d'émission sont limitées à deux longueurs d'onde : 880 nm et 1000 nm. Afin d'augmenter le nombre de longueur d'onde d'émission, on utilise des composés ternaires ou quaternaires basés sur les éléments In, P, As, Al et Ga.

II.4 / Composés ternaires et quaternaires photoniques

Il est possible d'associer un ou deux éléments de substitution dans une matrice principale III-V. On obtient alors des composés ternaires ($A_xB_{1-x}C$) ou quaternaires ($A_yB_xC_{1-x}D_{1-y}$). L'intérêt de cette technique réside dans la modification du gap du matériau, le changement d'indice optique et les marches de potentiel réalisées par la différence de gap.

Deux applications principales peuvent être envisagées :

- La multitude de matériaux ternaires et quaternaires existants permet de créer une gamme de composants émettant à des longueurs d'onde variées (tableau 3). Nous pouvons d'ores et déjà souligné les deux types de composants étudiés au Laboratoire IXL : InGaAs/GaAs (935 nm) et InGaAsP/InP (1310 nm).
- La superposition de plusieurs couches de matériaux différents permet de réaliser des zones de confinement énergétique pour les porteurs et les photons. En effet, pour les porteurs, on peut créer des puits de potentiel permettant de les isoler dans la zone du puits. Pour les photons, le changement de matériau se traduit par une différence d'indice optique et permet le confinement de ces derniers dans une zone de plus fort indice optique (guide, cavité...).

Matériaux de la zone d'émission	Matériau du substrat	Gammes de longueurs d'onde d'émission
InGa(Al)P/InGaAlP	GaAs	580-680 nm
InGaAsP/InGaAsP	GaAsP	620-700 nm
InGaAsP/InGaP	GaAs	700-880 nm
Ga(Al)As/InP	GaAs	700-920 nm
InGaAs/GaAs	GaAs	880-980 nm
InGaAsP/InP	InP	980-1700 nm
InAsPsb/InAsPSb	GaSb ou InAs	1400-3500 nm

Tableau 3 – Matériaux utilisés pour fabriquer la zone d'émission des composants optoélectroniques

Il est nécessaire de maîtriser le dépôt de couches minces permettant de passer d'un matériau à un autre en préservant les propriétés physiques. La technique utilisée pour réaliser de telles performances est la technique d'épitaxie. Cette technique permet de déposer des couches minces, d'épaisseurs allant de 50 Å à 1000Å suivant le cas, d'un matériau différent ou identique au substrat en préservant les propriétés physiques et en particulier les propriétés semiconductrices [12].

L'amélioration constante des techniques d'épitaxie a permis d'obtenir des couches minces de plus en plus fines. Les techniques d'épitaxie par jets moléculaires (EJM ou MBE en anglais) et dépôts organométalliques en phase vapeur (MOCVD) sont à l'origine de l'essor de la fabrication des diodes

lasers à double hétérostructure et à multipuits quantiques. En effet, il est possible de déposer le matériau semiconducteur de composition désirée couche atomique par couche atomique.

Le principal avantage de ces techniques est de pouvoir obtenir des couches minces ayant une épaisseur de quelques nanomètres utiles pour réaliser des puits quantiques. Avec certaines orientations de substrat (111 par exemple), il est possible de réaliser des boîtes quantiques. Ces éléments ont une restriction de dimension suivant trois axes. L'intérêt de tels systèmes est de réduire le courant de seuil dans les diodes laser à des valeurs aussi faibles que 10 μ A.

La limite des techniques exposées ci-dessus est donnée par la différence des paramètres de maille de chaque couche. La figure 5 représente les différents composés en fonction de leur paramètre de maille et les associations possibles avec une différence de paramètre de maille acceptable pour réaliser une épitaxie dans les meilleures conditions.

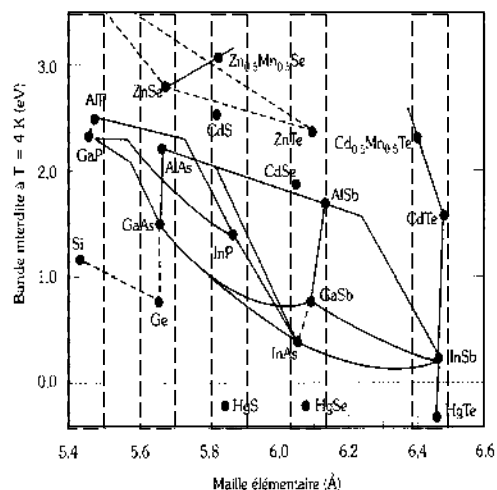


Figure 5 – Représentation de la valeur de bande interdite en fonction du paramètre de maille

Les techniques d'épitaxies représentent un point essentiel dans le processus de fabrication des composants optoélectroniques. Les méthodes d'obtention de couches minces ou de boîtes quantiques peuvent influencer les paramètres physiques des diodes électroluminescentes et des diodes lasers. Le paramètre principal qui s'est fortement amélioré est le rendement de luminescence. L'augmentation de ces performances a permis l'émergence des systèmes optoélectroniques émissifs. Actuellement, la maîtrise de la technique d'épitaxie par jet moléculaire (**MBE**) est à l'origine de la fabrication de puits quantiques et de boîtes quantiques qui constituent la zone active de la plupart des composants émissifs.

La prochaine section détaille les différentes structures des composants et systèmes optoélectroniques émissifs IR.

III / TECHNOLOGIE DES COMPOSANTS ET MODULES IR

Les systèmes très haut débit, accordables ou non en longueur d'onde ayant un rendement très acceptable sont utilisés sur des matériaux AlGaAs et InGaAsP. Cette amélioration a été rendue possible par :

- ❑ l'évolution de la conception et des procédés technologiques, spécialement les techniques de croissance,
- ❑ des architectures extrêmement complexes ne pouvant être réalisés que par des techniques d'épitaxie (MOCVD et MBE) permettant de maîtriser le procédé couche atomique par couche atomique,
- ❑ l'amélioration des systèmes de communication optique tels que les détecteurs à haut débit et faible bruit ainsi que les émetteurs et récepteurs électroniques appropriés,
- ❑ un assemblage performant des systèmes optiques qui permet de réaliser l'alignement optimal entre le composant et la fibre optique afin d'obtenir la meilleure transmission des données vers l'extérieur,
- ❑ des fibres optiques à faible perte et faible dispersion.

L'ensemble de ces considérations a contribué à l'élaboration de la chaîne complète des émetteurs et récepteurs pour les télécommunications, le stockage d'informations et les applications diverses de l'optoélectronique. Les diodes laser ont très rapidement connu une forte croissance, mais les diodes électroluminescentes restent, dans un bon nombre d'applications, incontournables. Comme nous l'avons vu à la section précédente, les techniques d'épitaxie ont permis d'améliorer leurs performances afin de les adapter au mieux à la demande.

Nous débuterons cette partie en décrivant la hiérarchie des systèmes optoélectroniques. Par la suite, chaque niveau hiérarchique sera développé en donnant quelques exemples d'architectures de composants et de systèmes optoélectroniques. Nous souligneront, plus particulièrement, les composants et systèmes étudiés au Laboratoire IXL.

III.1 / Hiérarchie des systèmes optoélectroniques

Dans cette partie, nous traiterons de l'assemblage et de l'intégration des systèmes dédiés aux télécommunications par fibre optique en montrant les processus multiples nécessaires à leur fabrication. Selon la complexité du système à réaliser, le degré d'intégration des composants utilisés ainsi que la technologie d'assemblage appliquée, plusieurs niveaux d'intégration peuvent être requis. La figure 6 montre la hiérarchie et l'agencement de ces niveaux pour les applications optoélectroniques.

Ces différents niveaux de hiérarchie font appel à des expertises aux multiples facettes :

- ☞ matériaux et technologies des composés III-V,
- ☞ optique et micro-mécanique de l'assemblage avec des tolérances d'alignement très faibles,
- ☞ électronique très haute fréquence (> 40 GHz) et transmission à très haut débit (> 40 Gbit/s).

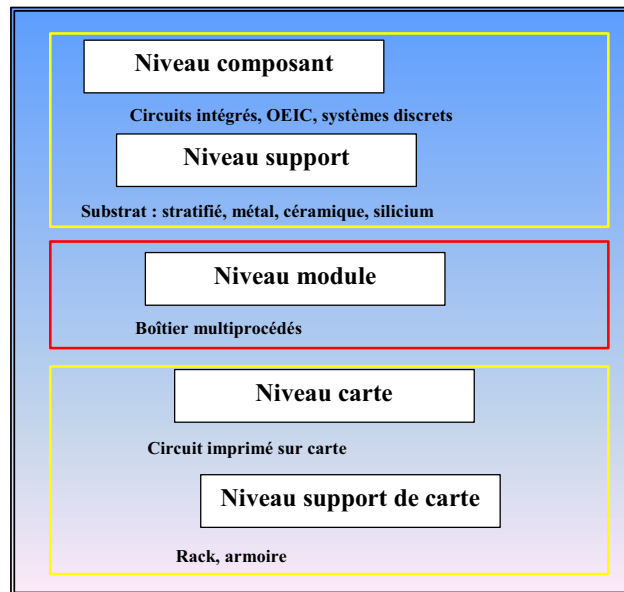


Figure 6 – Représentation des différents niveaux hiérarchiques des systèmes optoélectroniques

Ces niveaux d'assemblages ou d'interconnexions peuvent être classés de la manière suivante :

- Niveau 1 : les composants actifs, diodes électroluminescentes et diodes laser, constituent un vecteur principal de l'essor des transmissions par fibre optique. Ces systèmes sont placés sur une embase avec des tolérances d'alignement sur une ou deux dimensions relatives à un ou deux degrés de liberté [13].
- Niveau 2 : les supports des composants sont constitués par des couches de cuivre, de diamant, de silicium, de céramique ou d'autres matériaux adaptés. La puce est fixée sur le substrat par une eutectique haute température ($> 200\text{ °C}$ - $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ en général) [14]. Il est possible de positionner plusieurs composants actifs sur une même embase. Les composants peuvent communiquer entre eux directement ou par l'intermédiaire de connexions optiques ou électroniques [15, 16].
- Niveau 3 : l'évolution constante des exigences de miniaturisation, de rapidité et de fiabilité des systèmes électroniques a conduit au développement de nouvelles technologies pour l'interconnexion des composants et en particulier les structures sous forme de modules d'interconnexion multipuces (MCM). Ces nouveaux types de structures, longtemps utilisés dans le domaine de l'électronique, ont été récemment introduits pour l'optoélectronique. Cependant, les critères de stabilité du couplage du guide de lumière avec le faisceau laser dans une gamme étendue de température, imposant une précision d'alignement submicrométrique, montrent que les technologies de réalisation des assemblages optoélectroniques sont en phase de mûrissement. L'étude des défaillances de ces systèmes, nécessitant des compétences multiples, tant d'un point de vue composant qu'assemblage, est donc d'un intérêt majeur.
- Niveau 4 : le niveau de la carte électronique (ou optique) rassemble les modules sur un même support. On peut concevoir des liaisons optiques ou électroniques.
- Niveau 5 : le support de carte constitue le système complet à plusieurs cartes. Les interconnexions sont généralement effectuées par fibre optique [17].

Dans les sections suivantes, nous allons développer les technologies associées aux composants photoniques émissifs (niveau 1 et 2), aux têtes optiques intégrant le composant et le système d'alignement optique (niveau 3) et les structures de transmission par fibre optique (niveau 4 et 5).

III.2 / Mécanismes physiques des composants émissifs IR

Cette section va s'attacher à décrire les structures émissives internes IR en partant de l'homojonction jusqu'aux boîtes quantiques en soulignant les améliorations apportées, par chaque structure de base, sur les caractéristiques de luminescence du composant. Ces dernières constituent les zones actives des deux principaux types de composants émissifs IR : les diodes électroluminescentes et les diodes laser. Quelques exemples des technologies développées dans ce domaine seront exposés sans, toutefois, détailler les relations physiques permettant d'expliquer le fonctionnement des structures énumérées. Ces relations seront, en grande partie, rappelées dans le chapitre II.

III.2.a / Emission de lumière dans une homojonction

Les composants optoélectroniques à base d'homojonction ont été développés depuis les années soixante et constituent la naissance de l'émission de lumière sur semiconducteur. Ces homojonctions sont réalisées à partir de deux blocs de même nature mais de dopage différent pour former une jonction PN. La figure 7 représente le schéma de bandes d'une structure homojonction alimentée en direct. On observe que la recombinaison de porteurs est prépondérante dans la zone P. Ce phénomène est expliqué par le fait que les trous ont une mobilité très inférieure aux électrons et se traduit par la présence d'un plus grand nombre d'électrons (porteurs minoritaires) dans la zone P que de trous (porteurs minoritaires) dans la zone N [18]. Le nombre de recombinaisons étant proportionnel à la probabilité de présence des porteurs, la luminescence est donc plus importante du côté P. Afin de limiter l'absorption des photons émis, la zone émettrice est positionnée près de la surface du composant et doit être la plus mince possible [11]. En effet, la probabilité d'absorption optique est d'autant plus élevée que l'épaisseur de la zone d'émission est grande et éloignée de la surface de composant.

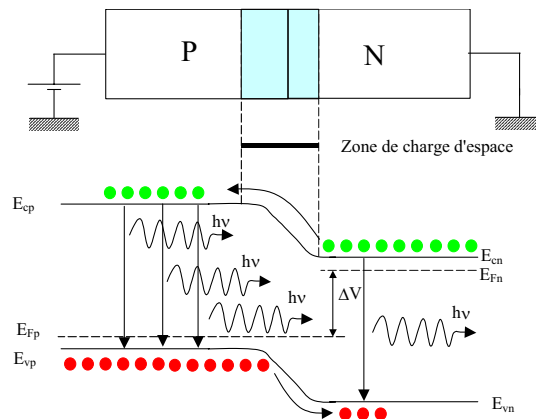


Figure 7 – Schéma de bande d'une homojonction

Dans le cas d'une diode électroluminescente, on obtient une structure dissymétrique comme le représente la figure 8.

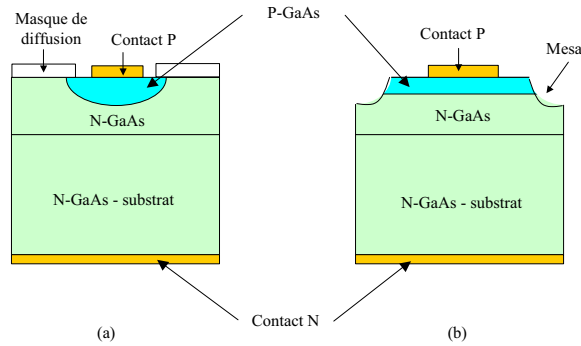


Figure 8 – Structures de diffusion (a) et technologie Mesa (b) de diodes électroluminescentes à homojonction

Le spectre optique typique de ces composants est représenté dans la figure 9. Nous détaillerons, dans le chapitre II, les spectres d'émission de ces structures.

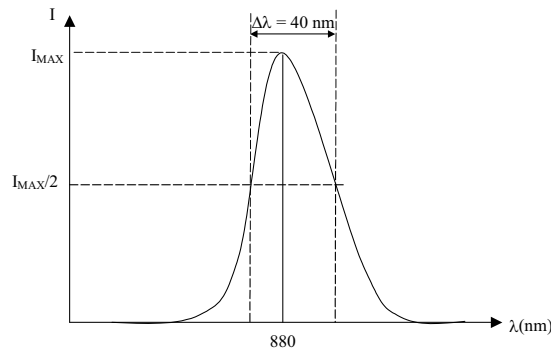


Figure 9 – Spectre optique typique d'une diode électroluminescente à homojonction à base de AlGaAs/GaAs (d'après [19])

Dans le cas d'une diode laser, le confinement des porteurs dans une cavité, pour créer l'effet laser, impose des modifications de la structure par rapport à une diode électroluminescente. La figure 10 présente une structure typique d'une diode laser à homojonction dans laquelle on observe un confinement transversal, longitudinal et latéral.

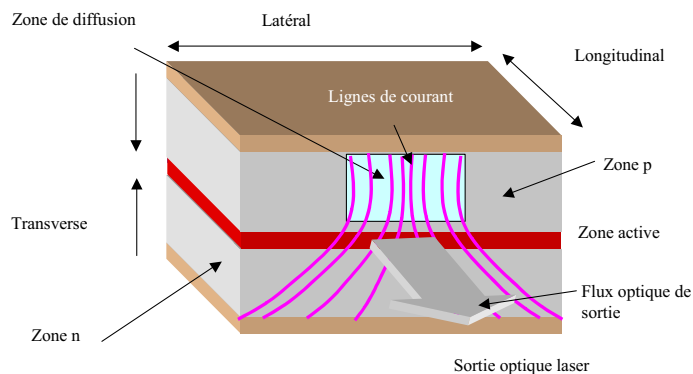


Figure 10 – Structure d'une diode laser à homojonction

Le confinement transversal s'effectue par l'augmentation de la densité de courant injectée dans la structure. A ce stade, la recombinaison s'effectue dans la zone de déplétion qui constitue la zone active (figure 11). Le confinement longitudinal est réalisé par des miroirs qui permettent une sélection de longueur d'onde suivant des modes spectraux (voir détail dans le chapitre II). Le cas le plus simple est une cavité Fabry-Pérot constituée de miroirs déposés sur les surfaces latérales de la diode laser. Le confinement latéral est réalisé par diffusion du contact P pour un composant dit P-up⁴ et N pour un composant dit P-down⁵ qui confine latéralement les lignes de courant (figure 10).

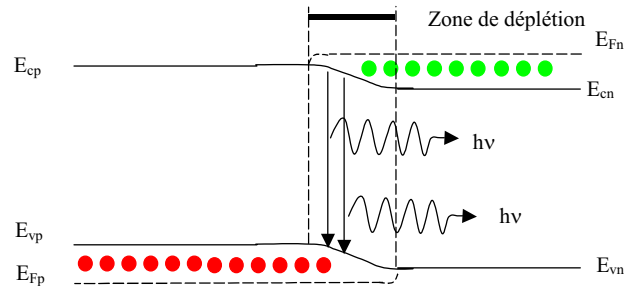


Figure 11 – Structure de bande d'une homojonction au-delà des conditions de seuil Laser

Le spectre typique d'une telle structure est donné dans la figure 12.

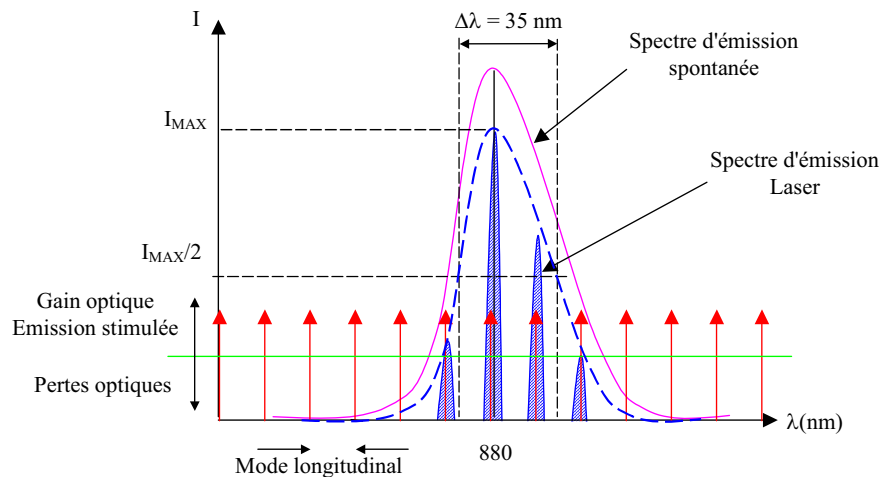


Figure 12 – Spectre optique d'une diode laser à homojonction AlGaAs/GaAs à cavité Fabry-Pérot

On observe que le spectre optique de la diode laser a une largeur spectrale quasi identique à la diode électroluminescente. La différence réside dans l'apparition de modes longitudinaux relatifs aux miroirs de la cavité. Cette partie sera plus largement développée dans le chapitre II.

Globalement, les diodes laser à homojonction ont un courant de seuil très important (environ 200 mA), le rendement est inférieur à 4% et le spot d'émission a une dimension de $1 \times 100 \mu\text{m}$ [18]. Pour améliorer ces caractéristiques, il est nécessaire de confiner les porteurs et les photons dans un même lieu de l'espace. L'amélioration du confinement des porteurs et des photons a été rendue

⁴ P-up : Composant dont le contact de type P est situé à l'opposé du plan de report sur l'alumine.

⁵ P-down : Composant dont le contact de type P est situé du côté du plan de report sur l'alumine.

possible par l'introduction des hétérostructures.

III.2.b / Emission de lumière dans une hétérostructure

Cette partie traite des différentes améliorations apportées aux zones actives des composants optoélectroniques afin de favoriser l'émission de lumière. Ces améliorations ont été fortement accrues sur les diodes laser. En effet, la majeure partie des applications de l'optoélectronique utilise des diodes laser et a conduit les fabricants à développer une technologie favorisant l'émission laser à partir d'un puits de potentiel [11].

- Le puits de potentiel

Un puits de potentiel est formé par épitaxie de deux matériaux semiconducteurs ayant un gap différent représenté par la figure 13. Le schéma de bandes associé est donné pour une structure de type P⁺PN⁺ [19]. Le matériau à plus faible gap correspond au lieu de confinement des porteurs. La taille des hétérostructures est telle que les niveaux d'énergie permis représentent un continuum d'états. Cette structure est réalisée afin d'augmenter le nombre de paires électron-trou au sein du puits de potentiel. En effet, la différence de mobilité entre les porteurs est à l'avantage des électrons. La zone centrale étant dopée P favorise la présence des trous, la mobilité des électrons permet d'accéder à cette zone et de créer l'inversion de population par la présence, dans un même lieu de l'espace, des deux types de porteurs.

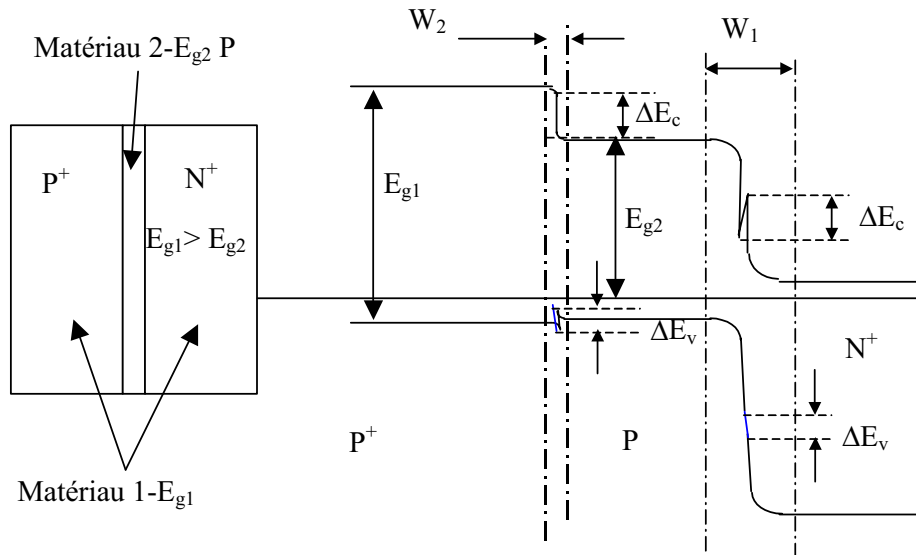


Figure 13 – Schéma de bandes d'une double hétérostructure à l'équilibre thermodynamique

L'intérêt d'une telle structure est donc double :

- Elle permet le confinement des porteurs libres. En effet, la barrière de potentiel est d'environ 300 meV à 600 meV suivant les matériaux utilisés. Les porteurs sont donc bloqués dans le puits de la même manière qu'un puits infini. La conséquence directe est l'augmentation du nombre de porteurs dans la même bande d'énergie. La condition d'inversion de population est atteinte plus rapidement que dans une homojonction. Cela favorise donc l'émission stimulée et diminue le courant de seuil.
- La différence de matériau se traduit par une différence d'indice optique. Les photons émis dans la double hétérostructure (DH) sont confinés dans le matériau de plus faible Gap n°2. Le confinement des photons permet d'augmenter le gain du milieu en favorisant l'émission stimulée.

Il existe un certain nombre de structures contenant une DH. Ces dernières sont réalisées par épitaxie de couches de type N^+PP^+ . La DH permet de réaliser le confinement des porteurs et des photons de manière transversale. Les miroirs déposés sur les faces avant et arrière de la diode laser permettent un confinement longitudinal. Il reste le confinement latéral qui peut être obtenu par deux grandes méthodes : les structures permettant de confiner le courant de manière latérale par diffusion de zones conductrices et les structures enterrées. Nous verrons les avantages et les inconvénients de chacune.

La figure 14 présente différentes structures de confinement latéral de courant.

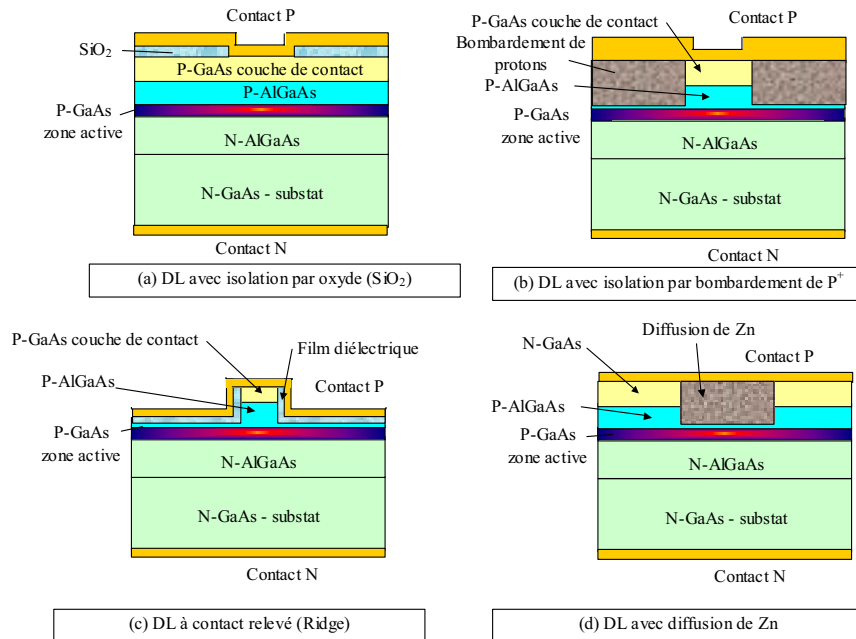


Figure 14 – Structures de diodes laser à confinement latéral de courant (d’après [18, 19, 20, 21])

Les structures à confinement latéral de courant présentent les avantages de réduire le courant de seuil à environ 50 à 100 mA, d'augmenter le gain de la cavité car la différence d'indice est relativement importante et enfin d'augmenter le rendement optique à environ 5 à 7 %. De plus, la surface de la zone active étant égale à la surface du composant la densité de courant injectée dans ces composants peut être importante. La puissance d'émission est, elle aussi, très importante et peut atteindre plusieurs dizaine de mW. Ces composants sont généralement utilisés pour les amplificateurs optiques (EDFA). L'inconvénient de cette structure est que la dimension du spot d'émission est d'une part large (dimension du spot : $1 \times 5 \mu m^2$) et d'autre part instable pour de forte densité de courant [8]. Ce type de structure est donc mal adapté aux dimensions du cœur de la fibre optique monomode ($10 \mu m$) [11]. Afin d'adapter la taille du faisceau d'émission pour une fibre optique, les structure enterrées ont été développées. La figure 15 présente trois types de diodes laser à double hétérostructure enterrée.

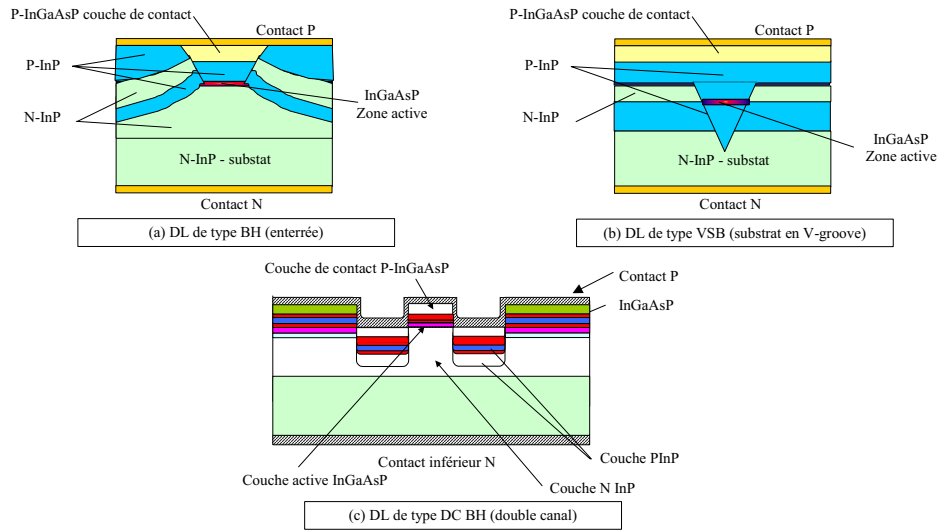


Figure 15 – Structures de diodes laser à double hétérostructure enterrée

Le confinement des porteurs et des photons se fait latéralement de manière structurale puisque la zone active, en vue de face (figure 15), est rectangulaire. Le courant de seuil est réduit à quelque dizaine de mA et le spot de sortie est d'environ $0,1 \times 1 \mu\text{m}$. Cependant, le volume de la zone active étant faible le courant maximal admissible est lui aussi faible. Les composants à double hétérostructure enterrée ne développe donc pas une forte puissance (10 à 15 mW optique au maximum). Pour réunir les deux avantages des diodes laser à confinement latéral de courant et les diodes laser à DH enterrée, on réalise une structure Ridge enterrée (BRS) qui permet une émission de forte puissance avec un faisceau adapté à la fibre optique [22].

La figure 16 représente le spectre optique des diodes lasers à double hétérostructure. On remarque que l'émission stimulée est prépondérante dans cette structure qui se traduit par un gain de lumière plus important par rapport aux pertes optiques. La largeur spectrale d'émission est fortement réduite.

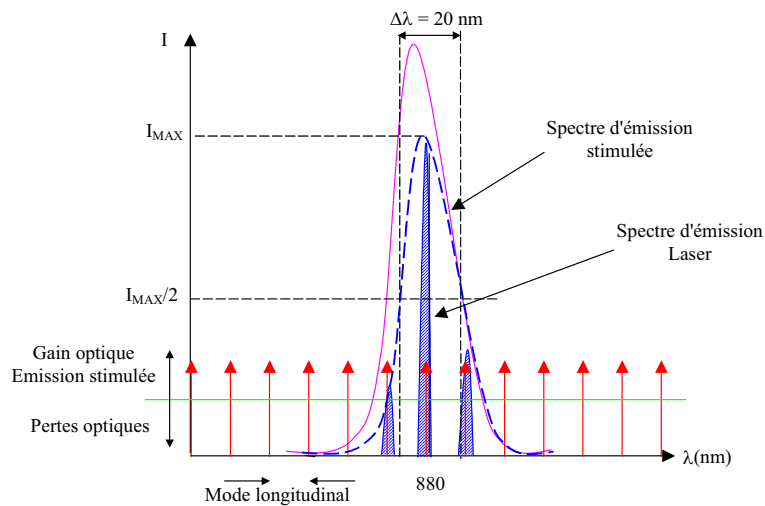


Figure 16 – Spectre d'émission d'une diode laser à double hétérostructure

Globalement, les doubles hétérostructures ont permis une forte réduction du courant de seuil des diodes lasers (200 mA pour l'homojonction à 50 mA pour l'hétérojonction). Cependant la sélection en longueur d'onde d'une diode laser ou d'une diode électroluminescente doit être la plus étroite possible afin de répondre aux exigences des télécommunications et en particulier le transfert de données par fibre optique. Etant donné que la double hétérostructure permet un continuum d'états pour les porteurs, la largeur spectrale d'émission d'un composant est proche de l'émission d'une homojonction. La différence réside dans l'amplitude de l'intensité lumineuse et la valeur du courant de seuil. Afin de réduire la largeur spectrale d'émission des composants, on réduit la largeur des puits pour former des structures quantiques.

- Les structures quantiques

- *Puits quantiques*

Le puits quantique apporte aux structures d'émission laser quatre avantages très importants :

- Le confinement des porteurs sur un niveau d'énergie particulier implique que la condition pour l'émission laser est atteinte très rapidement. Cela se traduit par une forte augmentation d'émission stimulée.
- Le faible nombre de porteurs nécessaires pour remplir les puits afin d'obtenir une émission laser implique que le courant de seuil diminue très fortement.
- Les puits quantiques confinent, sur une dimension, les photons près de l'axe optique, se traduisant par une augmentation de la sortance.
- La largeur spectrale d'émission est fortement réduite.

Les structures pour les diodes lasers à puits quantiques sont les mêmes que pour les doubles hétérostructures. La différence réside dans la zone active qui comporte un ou plusieurs puits quantiques. Le gain optique étant plus important dans les puits quantiques, la largeur spectrale est d'environ 10 nm pour un courant de 100 mA. Le rendement du système est de l'ordre de 10 % et le courant de seuil peut être de 5 à 10 mA.

Il subsiste, cependant, un inconvénient qui se situe au niveau de la densité de courant supportée par un puits quantique. En effet, la taille de ce dernier est telle que pour une faible densité de courant, le puits est complètement rempli. Au-delà de cette limite de densité courant, l'hétérostructure entourant le puits quantique se remplit de porteurs. La conséquence directe est l'effet "Kink" se manifestant par l'apparition d'un pic de luminescence supplémentaire [23, 24, 25]. La puissance des diodes laser est donc limitée dans la mesure où l'on veut restreindre la bande d'émission laser. Afin de franchir cette limite, on augmente la surface de la zone active contenant les puits quantiques par la technique de "Ridge enterré" (BRS) [22].

Il existe d'autres technologies quantiques, récemment introduites, dont les caractéristiques laissent prévoir de fortes potentialités pour l'optoélectronique appliquée aux télécommunications : on les nomme boîtes quantiques.

- *Les boîtes quantiques – Emission très haut débit*

La fabrication d'éléments semiconducteurs ayant une taille réduite dans les trois dimensions sont appelés boîtes quantiques. Cette nouvelle technologie a un très grand intérêt pour les applications optoélectroniques [26]. La fabrication de plusieurs boîtes quantiques de tailles différentes permet d'obtenir un spectre d'émission interne large (quelque nm) et d'intensité quasiment constante. En utilisant des technologies de miroirs ou des réseaux de **Bragg** permettant une sélection multiple de longueurs d'onde, on réalise alors une diode laser accordable à intensité de lumière constante permettant un traitement d'un plus grand nombre d'information simultanément.

- Synthèse

Nous avons passé en revue les principales architectures internes des composants photoniques émettant dans le domaine de l'infrarouge. La maîtrise de réalisation technologique des multi-puits quantiques contraints a permis d'augmenter les performances des diodes électroluminescentes et plus particulièrement des diodes laser. Les structures de confinement latéral ont contribué à adapter les diodes laser aux transmissions par fibre optique. Trois paramètres prépondérants ont donc évolué en fonction de ces deux améliorations technologiques :

- Le courant de seuil est passé de 200 mA ($4,3 \text{ kA/cm}^2$) à 5 mA (10 A/cm^2) par l'évolution de la structure d'une homojonction vers des puits quantiques (figure 17).
- La diminution de la taille du spot passant de $1 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ à $0,1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ est due à la réalisation de DH enterrées et permet de mieux adapter l'émission de la diode laser à la fibre optique de diamètre inférieur à $5 \mu\text{m}$.
- Le gain de couplage avec une fibre optique peut actuellement atteindre 50% avec les diodes laser à DH enterrée.

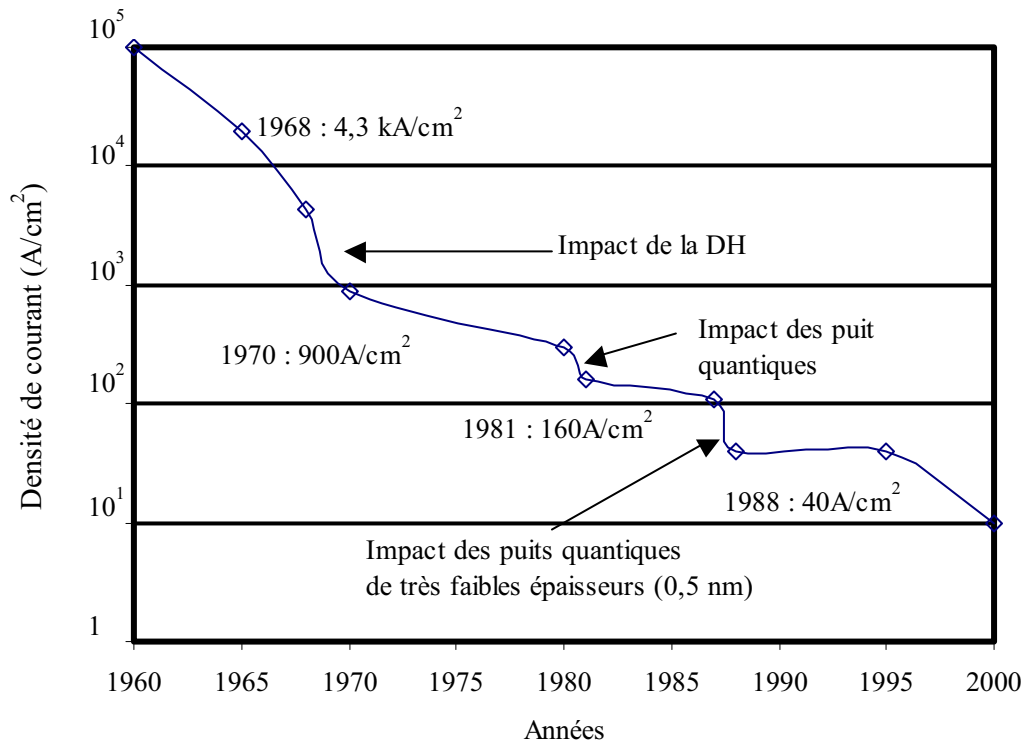


Figure 17 – Evolution des densités de courant de seuil en fonction des années (d'après [27])

Nous avons regroupé dans le tableau 4 les paramètres de certaines structures de composants optoélectroniques émissifs IR.

Structure	GaAlAs/GaAs PS laser	GaAlAs/GaAs CSP laser	GaAlAs/GaAs DH LED	InGaAsP/InP VSB laser	InGaAsP/InP DH LED	InGaAsP/InP DH laser
Zone active						
Matériau	Ga _{0,95} Al _{0,05} As	Ga _{0,85} Al _{0,15} As	Ga _{0,95} Al _{0,05} As	InGaAsP	InGaAsP	InGaAsP
Épaisseur (µm)	0,15	0,1	1	0,15 – 0,1	0,8	0,1 – 0,2
Dopant	Ge ou Si	Te	non dopé	non dopé	non dopé	non dopé
Concentration	1×10 ¹⁷ cm ⁻³	5×10 ¹⁷ cm ⁻³	1×10 ¹⁶ cm ⁻³	1×10 ¹⁶ cm ⁻³	1×10 ¹⁶ cm ⁻³	1×10 ¹⁶ cm ⁻³
Zone P						
Matériau	Ga _{0,65} Al _{0,35} As	Ga _{0,52} Al _{0,48} As	Ga _{0,70} Al _{0,30} As	InP	InP	InP
Épaisseur (µm)	1 - 2	1,2	2	3	1,5 - 2	1,5
Dopant	Si	Zn	Zn	Zn	Zn	Zn
Concentration	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³
Zone N						
Matériau	Ga _{0,65} Al _{0,35} As	Ga _{0,52} Al _{0,48} As	Ga _{0,70} Al _{0,30} As	InP	InP	InP
Épaisseur (µm)	1 - 2	0,2	4	2	3	2
Dopant	Si	Te	Te	Sn	Sn	Sn
Concentration	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1×10 ¹⁸ cm ⁻³
Substrat						
Matériau	GaAs	GaAs	GaAs	InP	InP	InP
Orientation	(001)	(001)	(001)	(001)	(001)	(001)
Dopant	Sn	Si	Sn	Sn	Sn	Sn
Electrode P						
	Au/Zn/Au	Ti/Pt/Au	Au/Zn/Au	Ti/Pt/Au	Ti/Pt/Au	Ti/Pt/Au
Electrode N						
	AuSn	Au/Ge/Ni	Au/Ge/Ni	Au/Ge/Ni	Au/Ge/Ni	Au/Ge/Ni
Confinement des porteurs						
	Diffusion de Zn	Diffusion de Zn	Electrode circulaire	Zone active enterrée	Electrode circulaire	Diffusion de Zn

Tableau 4 – Synthèse non-exhaustive de structures émissives à base d'InP et GaAs (d'après [6, 21])

Le deuxième point important pour une diode laser réside dans la sélection des modes de la cavité grâce aux miroirs formant le résonateur optique. La structure de la cavité associée ou non à un élément filtrant (réseau de **Bragg**) permet d'envisager différentes applications que nous allons exposer dans la suite.

III.2.c / Technologies de sélection de longueur d'onde

L'évolution de la qualité des miroirs, d'une part, et de la mise en œuvre de système à filtre optique, d'autre part ont permis d'augmenter les performances d'une diode laser : largeur spectrale, gain et réglage de longueur d'onde. Nous allons exposer les principales structures de miroirs et donner les performances associées.

- Miroirs par clivage de la diode laser

Ce type de miroirs ne nécessite qu'un mode opératoire : le clivage de la diode laser. L'interface semiconducteur/air permet de réaliser un miroir ayant un coefficient de réflexion relativement médiocre (30% pour GaAs). L'amplification de la cavité optique, étant fonction du coefficient de réflexion des miroirs, est, elle aussi, médiocre. Il résulte de cet état un fort courant de seuil. Afin d'améliorer le gain de la cavité, on augmente le coefficient de réflexion des miroirs en déposant une couche isolante sur les faces longitudinales et ainsi créer une cavité Fabry-Pérot [28].

- Cavité Fabry-Pérot

Une cavité Fabry-Pérot est caractérisée par le dépôt de couches à base de GaAs/AlAs sur les faces longitudinales de la diode laser. Afin d'améliorer la réflectivité des miroirs ainsi réalisés, on dépose ces derniers par épitaxie [29, 30]. On obtient donc une cavité ayant un miroir face arrière très réfléchissant (R=99,9 %) et un miroir en face avant réfléchissant (R=99%). Cette structure permet une émission de lumière principalement en face avant. La qualité de dépôt du miroir influence la

divergence du faisceau de sortie de la diode laser [31]. L'émission de la diode laser est multimodes comme l'indique la figure 18.

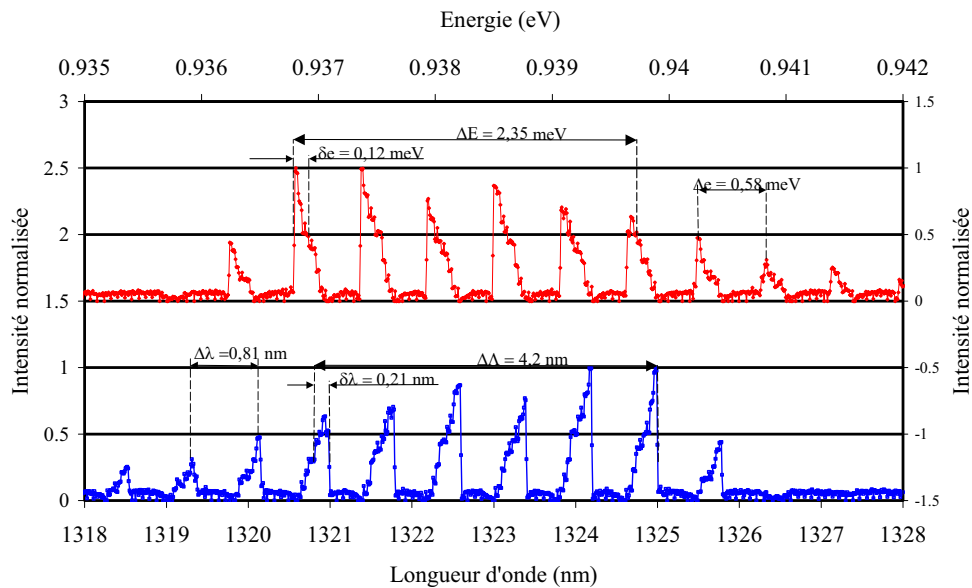


Figure 18 – Spectre optique multimodes d'une diode laser à cavité Fabry-Pérot et multipuits quantiques InGaAsP/InP

Cependant, pour des exigences liées aux applications de télécommunications, l'émission de lumière multimodes longitudinales est indésirable pour deux raisons :

- ❑ on peut difficilement "collimater" le faisceau de la diode laser, pour tenir compte de l'ouverture numérique de la fibre optique,
- ❑ on observe un élargissement temporel du signal relatif au phénomène de dispersion de modes.

Il est donc nécessaire pour certains système de sélectionner le mode désiré grâce aux miroirs à contre-réaction répartie.

- Cavité à contre-réaction répartie (DFB⁶)

Une diode laser à contre-réaction répartie avec réseau de Bragg (DFB) est réalisée dans un guide d'onde ondulé de période Λ (figure 19). La perturbation périodique agit comme un filtre fréquentiel très sélectif, d'une façon analogue à un miroir de Bragg. Le résultat est alors représenté par un spectre monomode (figure 20). L'émission monomode permet d'améliorer la transmission à travers une fibre optique pour les très longues distances (plus de 1000 km). La diode laser DFB résout problème de collimation du faisceau et réduit considérablement le phénomène de dispersion de modes.

⁶ DFB : Diode laser à contre réaction répartie : Distributed Feed Back laser diode

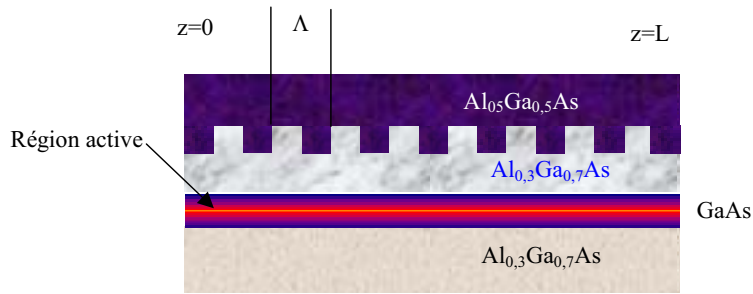


Figure 19 – Géométrie d'une cavité à contre-réaction répartie (DFB)

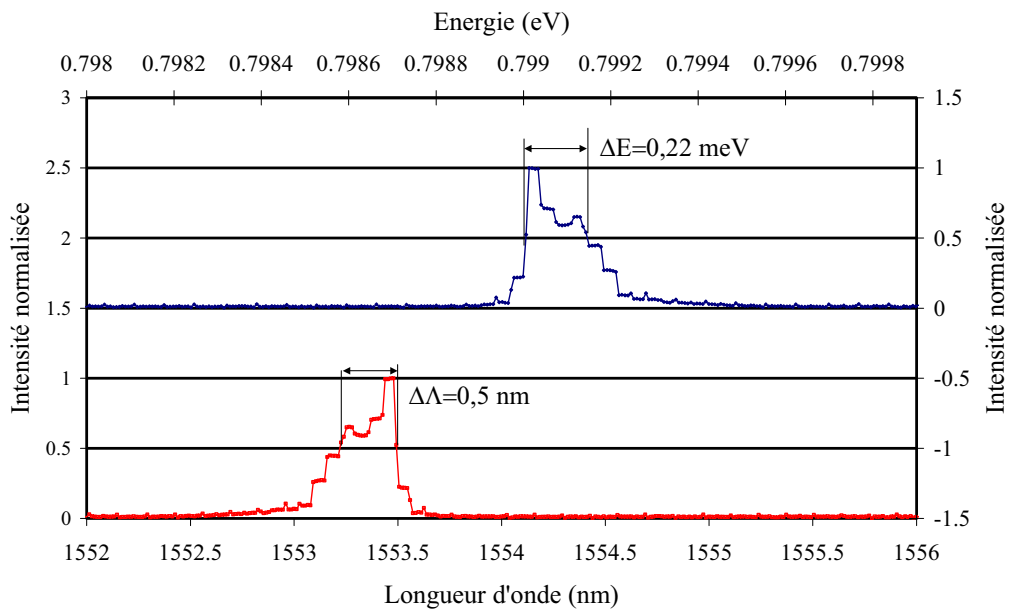


Figure 20 – Spectre optique monomode d'une diode laser 1550 nm à contre réaction répartie (DFB)

Nous avons présenté, dans cette partie, les principales structures émissives IR existantes en optoélectronique. Ces composants ne sont pas utilisables directement. En effet, il est nécessaire de traiter et de mettre en forme les signaux optiques qu'ils émettent pour une utilisation en télécommunication. Pour cela, on fait appel à des structures permettant d'insérer le composant et de l'aligner avec la chaîne optique de transmission : le module optoélectronique émissif IR.

III.3 / Technologie des modules émetteurs IR

Les modules émetteurs sont de deux types : les émetteurs à diode électroluminescente et à diode laser. La technologie interne de ces différents éléments dépend essentiellement de l'application pour lesquels ils sont fabriqués. Dans le cas des télécommunications par fibre optique et des applications monomodes, la technologie est préférentiellement celles des diodes laser. Dans le cas des autres applications IR, comme les télécommandes..., la technologie utilisée correspond à des diodes électroluminescentes positionnées par rapport à une lentille réduisant la divergent du faisceau émis. Nous allons aborder ces deux types de systèmes en débutant par les émetteurs à diode électroluminescente.

III.3.a / Modules à base de diode électroluminescente

- Introduction

Les principales caractéristiques optiques d'une diode électroluminescente dictent les applications dans lesquelles elles sont fortement appréciées :

- ☞ l'émission du faisceau dans un angle souvent supérieur à 10° ,
- ☞ la lumière n'est pas monochromatique,
- ☞ le rendement de luminescence est très faible.

L'ensemble de ces considérations nous indique que les applications essentielles sont plus particulièrement focalisées sur l'interface homme/machine telles que : l'affichage d'information, les télécommande...

Par leur structure relativement simple, les diodes électroluminescentes nous ont permis de mieux appréhender les technologies optoélectroniques tant d'un point de vue composant qu'assemblage.

- Exemples de modules à diode électroluminescente

L'essentiel des applications pour les diodes électroluminescentes concerne les émissions/réceptions de données infrarouges : télécommande pour appareils électroniques, détection ou comptage de produits et quelques applications pour les transmissions de données à travers une fibre optique. Les diodes électroluminescentes ayant la structure à émission de lumière latérale (voir partie III.2), sont utilisées pour les transmissions par fibres optiques. Ces dernières présentent des structures d'assemblage comparables aux têtes optiques présentées dans la partie III.3.b que nous avons choisies de développer dans la prochaine section.

Le premier type de structure est constitué d'un boîtier métallique et permet d'envisager d'utiliser la diode électroluminescente dans des conditions extrêmes :

- ☞ haute température 398 K / $+125^\circ\text{C}$
- ☞ basse température 233 K / -55°C
- ☞ fort courant ($I > 100$ mA).

La structure générale est donnée en figure 21.

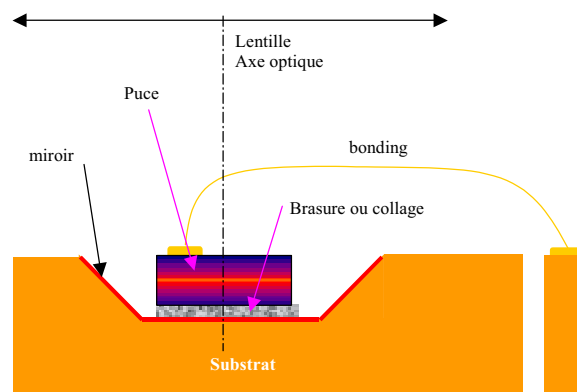


Figure 21 – Structure typique d'un module à diode électroluminescente sous encapsulation métallique

Le substrat est métallique et permet l'évacuation de la chaleur produite par la puce. Le composant se trouve dans une cavité conique tronquée permettant d'optimiser l'émission de lumière à travers la lentille. Les miroirs à 45° indiquent que la structure de la DEL est à émission latérale. La

lentille est sertie avec le boîtier. Nous détaillerons ces points techniques dans le chapitre III.

Il existe un autre type de structure très répandue pour les applications grand public. Le boîtier est moulé sur le composant situé dans son embase et constitue la lentille de focalisation du faisceau. Cette technique permet d'augmenter le rendement de luminescence en limitant la divergence du faisceau à la sortie de la surface de la puce. La figure 22 représente un exemple de diode électroluminescente avec un boîtier plastique. Le boîtier plastique a trois fonctions principales :

- ❑ protéger la diode électroluminescente contre les agressions extérieures, en particulier l'humidité de l'air ambiant,
- ❑ augmenter le rendement de luminescence (voir chapitre II),
- ❑ collimater le faisceau afin de réduire l'angle d'émission.

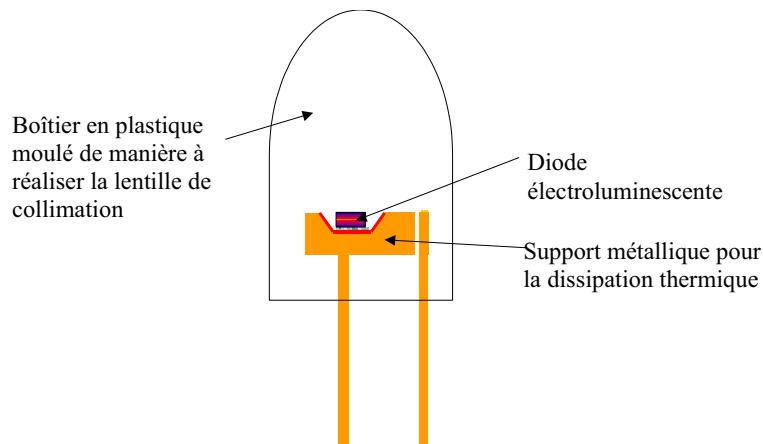


Figure 22 – Structure d'une diode électroluminescente sous encapsulation plastique

III.3.b / Architecture de têtes optiques

- Introduction

Les têtes optiques sont des structures émissives comportant une diode laser, une lentille de collimation, un isolateur, une lentille de focalisation et une fibre optique dont le schéma générique est présenté dans la figure 23. L'application principale est la transmission de données par fibres optiques pour des applications de télécommunication 2,5 Gbit/s à 40 Gbit/s. La structure de base citée ci-dessus est un point commun pour de nombreux fabricants. Les différences éventuelles subsistent dans l'agencement du système, la répartition des masses, l'étanchéité et le refroidissement forcé ou non de l'embase laser.

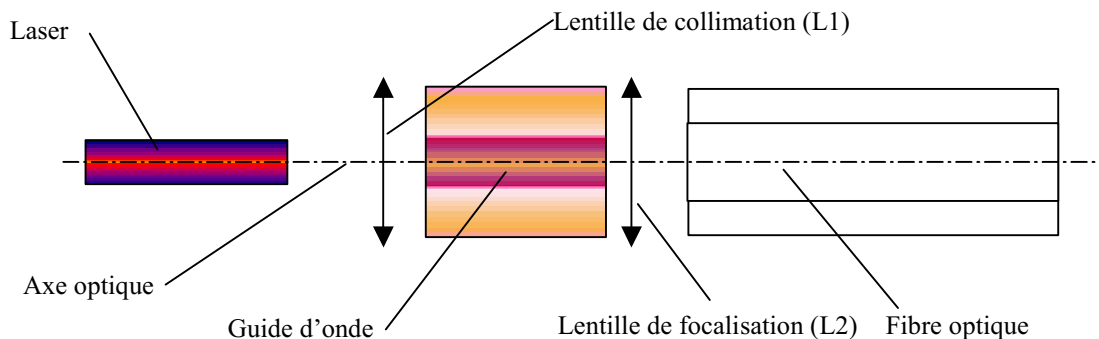


Figure 23 – Eléments constitutifs généraux d'une tête optique

Dans notre exposé, deux types de têtes optiques seront présentées :

Les têtes optiques pour les télécommunications courtes et moyennes distances (émission à 1310 nm) et longues distances (émission 1550 nm).

Cette présentation se fera de manière plus détaillée dans les chapitres III et IV. Dans cette section, la présentation sera plus sommaire mais permettra de positionner le problème. Nous développerons la partie optique du système, permettant de collecter et de distribuer l'émission de lumière. Les diodes laser utilisées dans ce système ont été développées dans la partie III.2. On retrouve principalement des diodes laser à double hétérostructure enterrée BH à cavité Fabry-Pérot (multimode) ou avec réseau de Bragg (DFB⁷ monomode) .

- Technologies d'alignement entre la diode laser et la fibre optique

Les premiers alignements étaient basés sur un positionnement direct entre la fibre optique et la diode laser. Certains fabricants ont utilisé des technologies dites "d'auto alignement" permettant de positionner la puce et la fibre optique. La diode laser est positionnée par une méthode dynamique avec une prédisposition 1D [3] (une dimension) ou 2D [4] (deux dimensions). Les figures 24 et 25 présentent un exemple de structure 1D et 2 D.

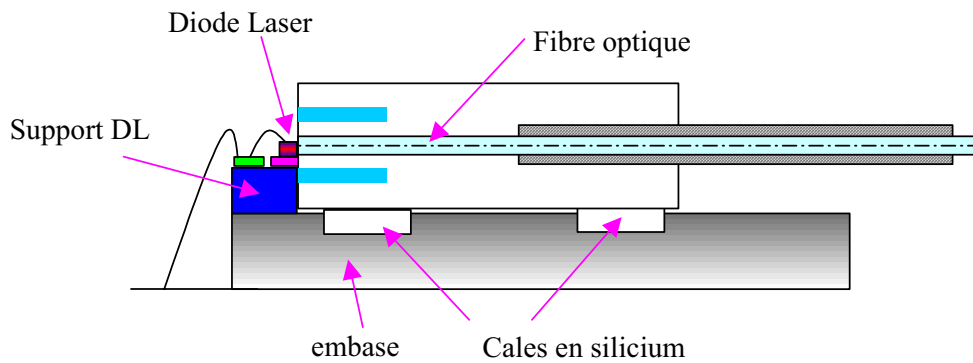


Figure 24 –Alignement à une dimension entre diode laser et fibre optique (d'après [32])

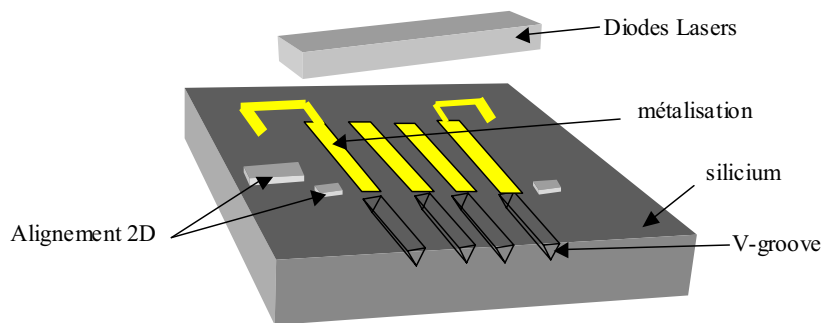


Figure 25 –Alignement à deux dimensions entre quatre diodes laser et quatre fibres optiques (d'après [33])

Ce type de système comporte un inconvénient essentiel lié à la qualité de l'herméticité puisque le passage de la fibre optique dans l'environnement proche de la diode laser ne permet pas une herméticité totale. Nous verrons, dans la partie qui traite des défaillances de systèmes

⁷ DFB : Diode laser à contre réaction répartie : Distributed Feed Back laser diode

optoélectroniques, que le manque d'herméticité induit des défaillances au niveau des miroirs de la cavité optique et peut engendrer des défaillances catastrophiques. Nous précisons cet aspect dans l'exposé résumant l'ensemble des modes de défaillances.

Afin de réduire cette faiblesse, la diode laser est située dans une enceinte entièrement hermétique dont la sortie optique est réalisée par une lentille (la lentille de focalisation). La partie fibre optique est située à l'extérieur de cette enceinte. Le système détaillé jusqu'ici peut être illustré par la figure 26. Il existe des versions avec ou sans module à effet Peltier (figure 27).

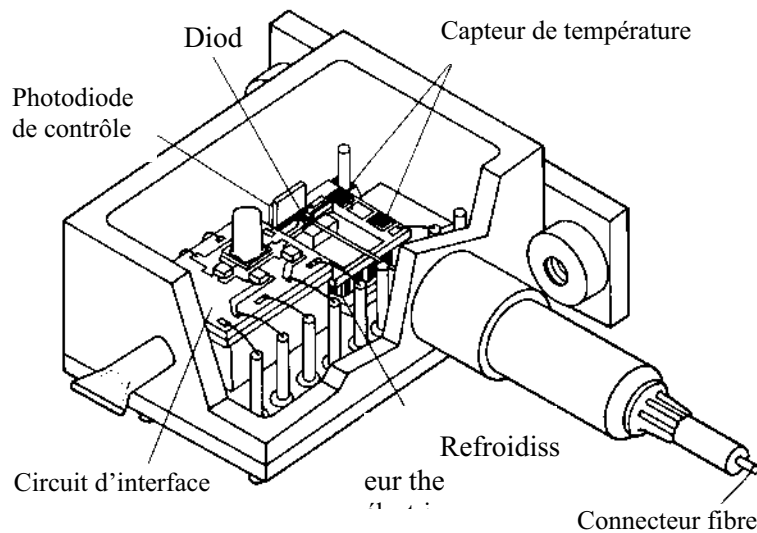


Figure 26 – Tête optique avec module thermorégulateur (d'après [18])

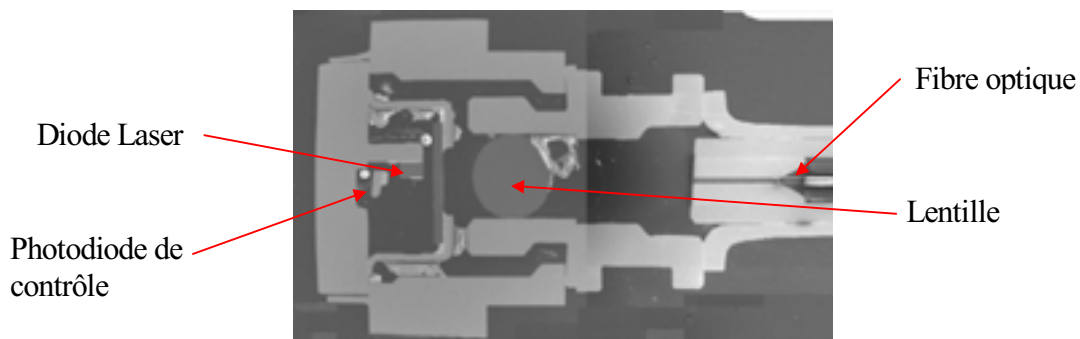


Figure 27 – Tête optique sans module thermorégulateur (Peltier)

Nous allons, à présent, nous tourner vers l'aspect système qui permet de montrer l'utilisation, entre autres, des têtes optiques au sein d'une chaîne d'émetteur récepteur par fibre optique.

III.4 / Architectures des réseaux de transmission optique

III.4.a / Introduction

L'industrie des télécommunications est actuellement en train de vivre une révolution, et celle-ci concerne aussi bien les concepteurs et les opérateurs que les utilisateurs.

Le principal moteur de cette révolution réside dans le nombre d'information qu'un utilisateur peut échanger avec ses correspondants situés sur différentes zones géographiques. En effet, de nos

jours, il est fréquent de téléphoner, envoyer un fax ou un message électronique et collecter des informations sur Internet simultanément. Afin de rendre ces multiples communications réellement simultanées, souples et avec une sécurité sans reproche, la quantité d'information et le taux de transfert doivent être à un très haut niveau de performances.

Les réseaux de communication par câbles électriques sont limités à 270 Mbits/s et ne permettent pas un échange d'informations multiples, fluide et totalement sécurisé nécessitant des débits supérieurs à 1 Gbits/s. A cette cadence, les pertes induites par le câble coaxial deviennent bien plus élevées que le gain des amplificateurs de ligne, et les performances de la liaison deviennent nettement moins bonnes. Dans la fibre optique au contraire, les performances de très haut débit (1,8 Pentabits/s), de faible taux d'erreur binaire ($< 10^{-9}$) et d'immunité au bruit électromagnétique quasi-total permettent de répondre à l'ensemble des exigences des télécommunications [34]. Pour cette raison, les communications actuelles contiennent un grand nombre de réseaux par fibre optique. Cependant, la liaison entre la fibre optique et l'utilisateur s'effectue par un transducteur électrique/optique. Cette partie du système constitue les interconnexions optiques qui sont le plus souvent hybrides (électrique et optique⁸).

On recense deux types d'interconnexion optique pour les télécommunications :

- les interconnexions externes :
 - ☞ les émetteurs et récepteurs pour les liaisons longues et courtes distances,
 - ☞ les systèmes de traitement et de redistribution de l'information (central téléphonique, ...)
- les interconnexions internes :
 - ☞ les systèmes de réception des données au niveau du consommateur (ordinateur à liaisons externes par fibre optique, ...),
 - ☞ les systèmes de stockage et de traitement d'informations (microprocesseur optique, mémoires optiques, ...).

Cette partie s'articulera donc autour de deux sections qui traiteront des interconnexions externes d'une part et internes d'autre part.

III.4.b / Chaîne d'émission-réception en télécommunication : interconnexions externes

Les premiers systèmes, bénéficiant des performances des interconnexions optiques ont été les centraux de télécommunications; on observe trois niveaux hiérarchiques différents :

- *Éléments mis en jeu pour les applications à longue distance*

Les systèmes développés pour les télécommunications ont une structure de référence comportant un émetteur, un (des) amplificateur(s) optique(s) (jouant le rôle de répéteur) et un récepteur [35, 36]. Les différents éléments d'une chaîne d'émission-réception sont représentés dans la figure 28.

L'amplification optique est réalisée par des **EDFAs**⁹ (voir partie II.3) car ce sont des amplificateurs faibles bruit, performants et adaptés aux systèmes très haut débit. Un autre système permet d'effectuer la même opération : un amplificateur optique sur semiconducteur (**SOA**¹⁰). La fiabilité de ces systèmes est étudiée par le Laboratoire IXL depuis janvier 2001 en collaboration avec

⁸ Pour simplifier ce terme on parle de système électro-optique.

⁹ EDFAs : Amplificateur à fibre dopée Erbium – Erbium Doped Fiber Amplifier

¹⁰ SOA : Amplificateur optique sur semiconducteur - Semiconductor Optical Amplifier.

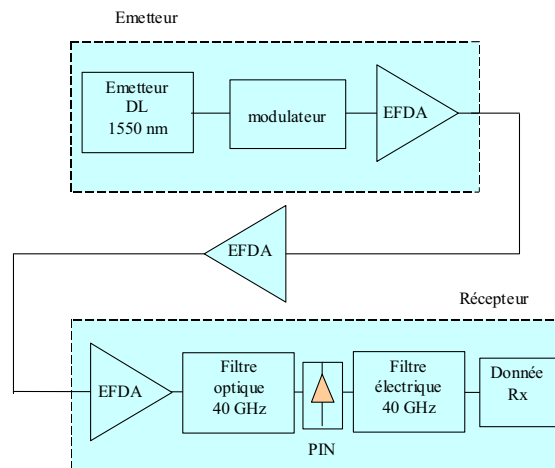


Figure 28 – Représentation schématique d'une chaîne d'émission-réception (d'après[37])

L'augmentation des débits a été rendue possible par le regroupement de plusieurs longueurs d'onde, porteuses chacune de signaux indépendants, dans une fibre optique (**WDM**¹¹). La capacité actuelle est de 2,5 Gbits/s et pourrait atteindre 1,8 Pentabits/s¹² dans les années futures [38]. Le principe consiste à concentrer l'émission de plusieurs émetteurs dans une même fibre optique schématisés par la figure 29. La séparation entre chaque mode spectral (longueur d'onde) est actuellement de 0,8 nm (100 GHz) mais devrait atteindre 0,4 nm (50 GHz) centrés sur 1550 nm ($2 \cdot 10^5$ GHz). Cette performance peut être envisagée par des systèmes à base de diodes laser accordables en longueur d'onde constituant des **DWDM**¹³.

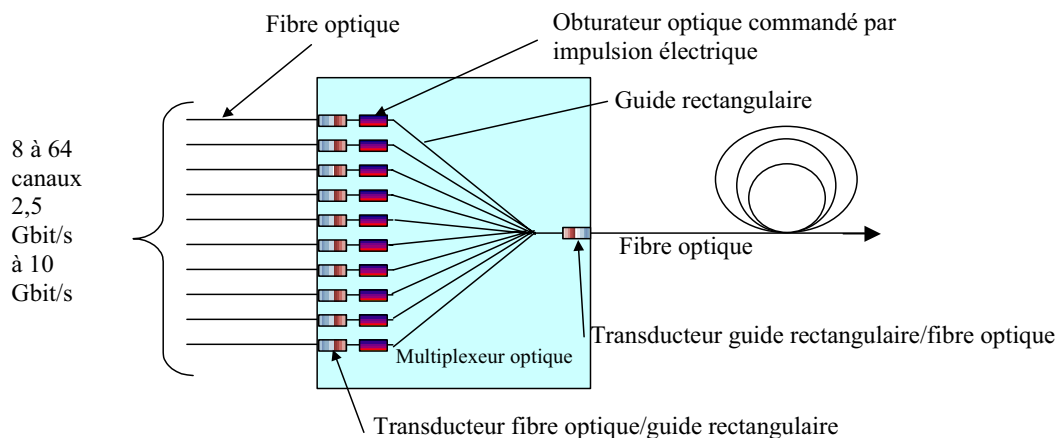


Figure 29 – Représentation schématique d'un système WDM (d'après[38])

Avec de tels systèmes, il est possible d'effectuer des liaisons entre calculateurs, centraux... qui nécessitent un transfert de nombreuses données simultanément. L'optique devient la technologie d'interconnexion entre sites fixes, elle remplace progressivement les liaisons par câbles électriques.

¹¹ WDM : Multiplexage de longueur d'onde - Wavelength Division Multiplexing.

¹² Pentabits/s : 10^6 Gbits/s ou 10^{15} bits/s.

¹³ DWDM : Multiplexage de longueur d'onde très dense - Dense Wavelength Division Multiplexing.

Cette technique se développe maintenant en interne et permet d'envisager de connecter, entre autres, les sous-systèmes, sujet développé dans la prochaine section.

- *Eléments mis en jeu pour les applications à courtes distances*

Les systèmes comprenant plusieurs cartes déjà développés depuis les années 70 ont leurs performances qui ne cessent de croître. Ces derniers doivent, par exemple, fonctionner pour des températures allant de 233 K (-40°C) à 358K (+85°C). Le cahier des charges opérationnel considère un taux d'erreur binaire (**BER**) inférieur à 10^{-14} et prévoit un fonctionnement de 640 Mbits/s à 2,5 Gbits/s [39]. Ces systèmes permettent les liaisons dans le réseau local [40]. Il est donc impératif pour ces derniers de traiter un grand nombre de données simultanément. La figure 30 montre le type d'interconnexions développé au sein d'un système entre les cartes le constituant.

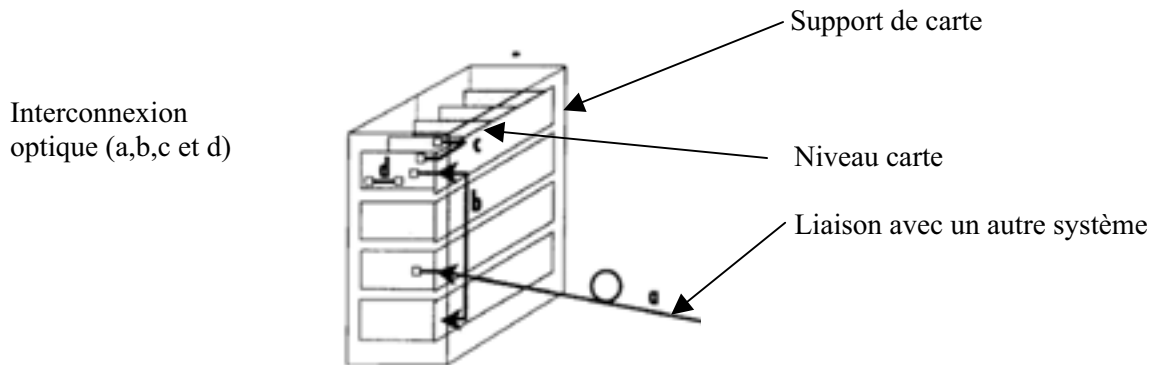


Figure 30 - Connexion optique inter-cartes dans un système (d'après [40])

Actuellement, il est demandé d'interconnecter un très grand nombre de cartes. Il n'est plus possible de réaliser les interconnexions de tels systèmes avec des réseaux de câbles électriques favorisant le fort développement des interconnexions par fibre optique. Afin d'améliorer davantage le traitement des données en interne, il a été envisagé de créer des liaisons optiques sur la carte ou entre puces. Cela donne naissance aux interconnexions intra-systèmes. La maîtrise des techniques de croissances épitaxiales et des gravures sélectives ont permis d'envisager la réalisation de micro-systèmes optiques intégrés permettant de regrouper les différentes fonctions optiques sur un même substrat : émission de lumière de longueurs d'onde multiples, filtrage de longueur d'onde, amplification optique... L'intérêt majeur est d'augmenter le taux d'intégration des systèmes optiques dans un même module aligné sur une seule fibre optique. La section suivante développe quelques exemples de structures typiques.

III.4.c / Interconnexions intégrées

Les débits envisagés par les systèmes informatiques basés sur des technologies très avancées nécessitent d'effectuer des interconnexions entre composants sur un même substrat par liaisons optiques. La figure 31 présente un exemple d'interconnexions optiques entre composants. On observe les interfaces optiques/électriques (photodiodes) et électriques/optiques (diodes laser).

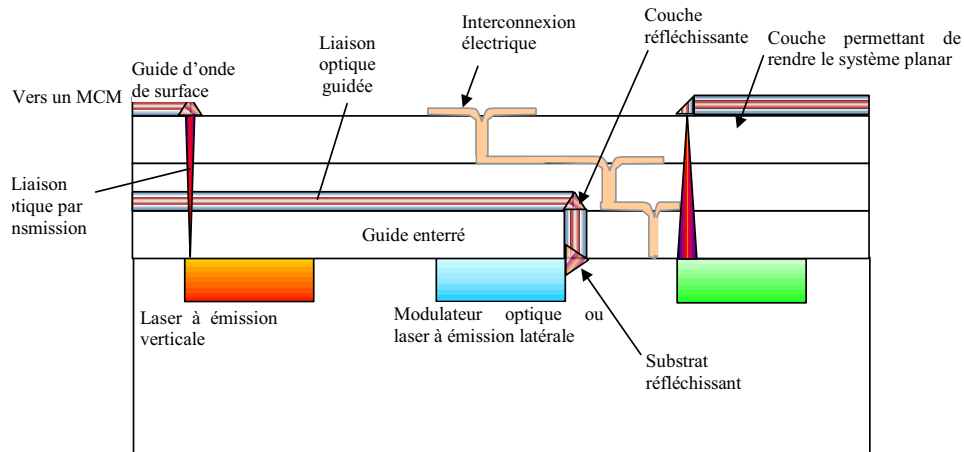


Figure 31 – Interconnexions mixtes optique/électrique pour le transfert de données entre puces (d'après [41])

Les transferts de données s'effectuent par des guides rectangulaires qui sont présentés sur la figure 32. Ces guides sont réalisés, en général, à partir de substrat en silicium comme l'expose C.Massit [42].

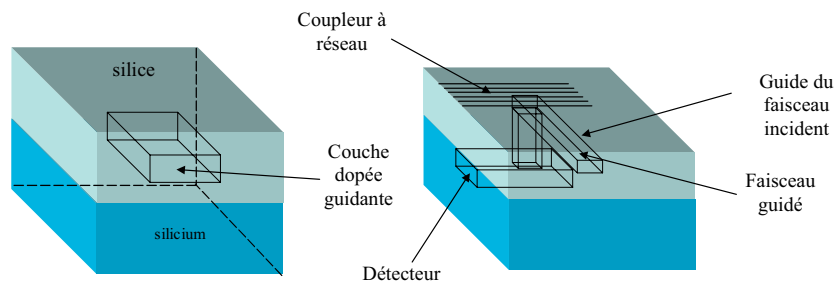


Figure 32 – Connexions optiques par guides rectangulaires pour des applications tout optique (d'après [43])

Ces techniques permettent d'envisager des systèmes **MCM** (Multi Chip Module¹⁴) de plus en plus utilisés dans les technologies hybrides contenant des liaisons réalisées par des pistes métalliques. L'intérêt pour des interconnexions optiques est d'augmenter le nombre d'informations traitées (plusieurs centaines par seconde). De plus, la miniaturisation des systèmes limite l'utilisation de pistes métalliques. En effet, ces dernières sont soumises à des phénomènes parasites :

- ☞ diminution de la surface de conduction en haute fréquence donnant lieu au phénomène d'électromigration,
- ☞ apparition du phénomène de diaphonie entre deux pistes très proche l'une de l'autre.

L'ensemble de ces phénomènes est néfaste pour le fonctionnement correct de l'interconnexion. La surface de conduction étant réduite, la densité de courant devient très importante et conduit à des phénomènes d'électromigration. Ces problèmes sont largement résolus par les transmissions optiques qui sont nettement moins limitées en fréquence.

¹⁴ MCM : Technologie multipuces sur un même substrat : Multi Chip Modul

Les techniques d'intégration optique sont encore en développement. Elles présentent un grand nombre d'avantages comme : réduire les temps d'accès entre systèmes et multiplier les échanges de données avec l'extérieur.

Les interconnexions optiques prennent donc une part du marché de plus en plus importante. Dans les années futures, elles devraient être dans tous les systèmes de transmission entre sites fixes. Il apparaît, de plus, que cette dernière investit l'intérieur des systèmes comme les calculateurs ou les centrales téléphoniques. Elle va donc progressivement être présentes dans la majeure partie des systèmes informatiques et électroniques. De plus, on observe une forte augmentation du nombre d'interconnexions dans les systèmes aéroportés.

III.5 / Synthèse

Nous venons de décrire les différentes parties d'un système optoélectronique émissif IR. La diversité technologique et la complexité des systèmes optoélectroniques rendent la caractérisation et l'étude des défaillances de tels systèmes très difficiles, en particulier lorsque l'on aborde un système complet comme une diode électroluminescente ou une tête optique dans son boîtier.

Nous avons montré l'éventail des applications pour les interconnexions optiques et nous avons vu qu'elles étaient en fort développement pour les applications de télécommunication. Les points critiques de ces systèmes sont les composants émetteurs d'une part et l'assemblage nécessaire pour l'alignement optique d'autre part. En effet, les données sont transportées au moyen de fibres optiques. Le point le plus critique se situe au niveau de l'alignement de la fibre optique avec la diode laser. De plus, les systèmes contenant la diode laser doivent être parfaitement hermétiques et prévus pour des températures extérieures de 358K (+85°C) [36].

Nous allons, à présent, aborder la dernière partie qui permet de justifier l'étude en s'architecturant autour de deux points principaux :

- développer une méthodologie d'analyses non-destructives basées sur la caractérisation électrique et optique permettant d'identifier et de localiser les défauts du composant au sein du module,
- mettre en place des moyens de simulations thermomécaniques permettant de localiser les zones critiques d'un assemblage susceptible d'engendrer une perte de couplage optique.

IV / CONTEXTE ET JUSTIFICATION DE L'ETUDE

Un état de l'art des technologies optoélectroniques émissives dans le domaine de l'IR, en s'attachant à décrire à la fois les structures des composants et des assemblages associés à ce domaine, a été réalisé. A ce stade, un bilan des différents mécanismes de défaillance au sein des structures de base émissives d'une part et des modules optoélectroniques d'autre part doit être effectué. En parallèle, les analyses de défaillance les plus utilisées, permettant d'identifier et de localiser les défauts, seront rappelées brièvement. Cet ensemble d'informations permettra de situer notre travail en comparant chaque méthode d'analyses à celle développée au Laboratoire IXL : les analyses électro-optiques. Nous débuterons par les mécanismes de défaillance dans les composants optoélectroniques émissifs IR.

IV.1 / Mécanismes de défaillance et facteur d'aggravation des composants IR

Les diodes laser et les diodes électroluminescentes ont des mécanismes de fonctionnement différents des autres composants électroniques. En effet, l'émission de lumière par recombinaisons de porteurs est une particularité uniquement associée à ces deux composants. De ce fait, les mécanismes de dégradation sont différents de ceux déjà identifiés dans les composants électroniques. Nous allons

donner une vue globale sur les différents mécanismes de dégradation et leurs facteurs aggravants déjà identifiés dans de nombreuses références pour les composants considérés [6, 19, 21].

IV.1.a / Mécanismes généraux de dégradation

Les mécanismes de dégradation associés sont localisés sur la structure du composant. La figure 33 représente la structure générale d'une diode laser ou d'une diode électroluminescente.

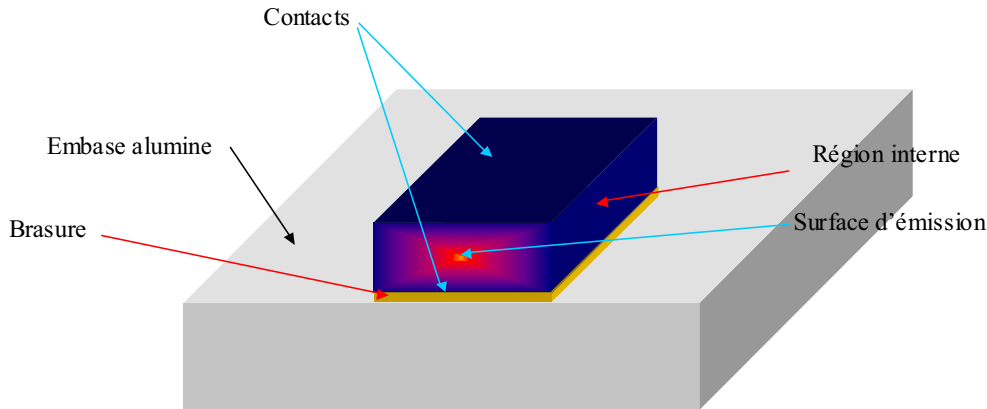


Figure 33 – Représentation schématique d'un composant émissif IR (d'après [19])

Les différentes parties du composant dégradé, les causes de dégradation et les facteurs aggravants ont été regroupés dans le tableau 5.

Partie dégradée	Cause de dégradation	Facteur aggravant
Zone active	Dislocation, interdiffusion	Courant, température
Interface de l'hétérostructure	Défaut au niveau de l'hétérostructure	Courant, température
Surface d'émission	oxydation	Lumière, humidité
Electrode	Diffusion métallique	Courant, température
Brasure	Instabilité (réaction et migration des différents éléments)	Courant, température
Embase	Décollement du métal	Température, courant

Tableau 5 – Récapitulatif des dégradations génériques relatives aux composants émissifs (d'après [19])

Nous allons, à présent, détailler les dégradations typiques observées dans chaque partie du composant et les relier aux différents modes de dégradation.

- Zone active : cette zone correspond à la partie émissive du composant sous l'effet d'une injection de courant. Les principales dégradations résultent de la propagation des dislocations préexistantes au sein de la structure ou des interdiffusions entre les différentes zones de la partie émissive [44]. Le mode de dégradation est rapide voire catastrophique. Les facteurs aggravants sont : l'injection de courant et la température. Ce dernier facteur peut être la cause d'un auto-échauffement induit par l'émission de lumière ou bien par la température de l'enceinte pour des profils de mission sévères (par exemple cycles thermiques 233 K/358 K (-40°C/+85°C)). La propagation des dislocations est principalement observée au sein des structures AlGaAs/GaAs, et les interdiffusions sont plus courantes pour les structures InGaAsP/InP.
- Hétérostructure : la dégradation des hétérostructures enterrées est principalement observée dans les applications de télécommunication par fibre optique avec une diode laser. En effet, la

largeur du faisceau d'émission de la diode laser à structure enterrée est parfaitement adaptée à ces applications. La dégradation dépend essentiellement du procédé de fabrication qui diffère selon que la gravure est de type VSB (substrat 001) ou DCBH (substrat 111 - voir le détail des structures dans la partie III.2). Les modes de dégradation sont généralement graduels et les facteurs aggravants sont l'injection de courant et la température de l'enceinte, par exemple des cycles thermiques 233 K/358 K (-40°C/+85°C).

- Miroirs d'émission (uniquement pour les diodes laser) : les dégradations des miroirs de la cavité sont exclusivement observées pour les diodes laser AlGaAs/GaAs. Le principal mécanisme mis en jeu est l'oxydation des miroirs observée essentiellement pour des systèmes non-hermétiques ou la fibre optique est directement couplée à la diode laser [28, 45]. Les modes de dégradation sont catastrophiques et caractérisés par une perte soudaine de puissance optique. Les défauts présents à l'interface miroir/zone active piègent les photons et augmentent considérablement la température de l'interface semiconducteur/miroir [46]. Ce phénomène est souvent observé sur le miroir de sortie [45]. On observe un phénomène d'emballlement thermique qui affecte les caractéristiques optiques du composant de manière catastrophique.
- Contacts : pour les structures dont le substrat est N, les dégradations au niveau des contacts sont souvent du côté P car la zone active est très proche du contact P. Dans le cas d'un substrat P, on observe le contraire. Ce type de dégradation s'observe pour les diodes électroluminescentes et les diodes laser et la cause principale est la diffusion métallique dans la zone active [47]. Ce phénomène physique est généralement traduit par une chute de la valeur de la résistance de contact. Les modes de dégradation sont graduels et les facteurs aggravants sont principalement l'injection de courant et la température.
- Interface puce/embase : la puce est généralement brasée sur un support en alumine. Cette brasure est un point sensible du système. La différence des coefficients de dilatation thermique (CTE) entre la diode laser et l'alumine d'une part, et la faible épaisseur de la brasure d'autre part peuvent induire une défaillance du joint de brasure par fatigue thermomécanique. On retrouve ce type de dégradation pour les diodes laser et les diodes électroluminescentes. En général, la dégradation provient d'une propagation de fissures ou de délaminations au sein du joint [48, 49]. Le mode de dégradation est souvent graduel. Le facteur aggravant principal correspond aux niveaux de température imposés par les cycles thermiques.
- Support de composant : les dégradations de l'embase, sont essentiellement localisées sur le dépôt métallique effectué sur cette dernière. L'accroche de la couche déposée est principalement fonction de la technique de dépôt et des matériaux mis en jeu (métal déposé et embase). On observe souvent un décollement du dépôt métallique qui perturbe l'alimentation du composant, par exemple, la rupture d'alimentation du composant induit par une microcoupure des pistes ou une augmentation de la résistivité des dépôts métalliques induisant une modification de l'alimentation du composant par l'introduction d'une résistance parasite en série. De la même manière que la brasure, le mode de dégradation est graduel. Le facteur aggravant est essentiellement la température ambiante, en particulier pour des cycles thermiques.

IV.1.b / Méthodes d'analyse de défaillance des composants émissifs

- La microscopie électronique à balayage (MEB)

Cette technique, très utilisée en analyses de défaillance, est basée sur l'utilisation d'un faisceau d'électrons d'énergie 20 keV fin qui balaye de manière séquentielle la zone observée d'un échantillon massif. L'interaction du faisceau avec l'objet conduit à l'émission de diverses particules et rayonnements (électrons secondaires, rétrodiffusées, X...) qui, après une détection appropriée, permettent de former une image. Il y a donc à chaque instant correspondance entre un point de l'objet et de l'image. Les techniques de numérisation et de stockage apportent alors une grande souplesse dans le traitement des signaux. En microscopie électronique à balayage la résolution est

essentiellement limitée par le diamètre du faisceau ; une résolution de 1 à 5 nm est en général obtenue mais dépend de la nature de l'objet. Cette résolution est cependant compensée par la facilité d'observation de la surface de l'objet, ne nécessitant pas la préparation de répliques, et par la très grande profondeur de champ des images. Par ailleurs la détection de particules comme les rayons X permet de réaliser une analyse chimique localisée de l'objet (EDX et WDX).

Applications : On utilise la MEB afin d'observer les dégradations au sein de joints de brasure ou d'adhésifs et les dépôts métalliques sur les supports du composant. L'analyse par cartographie de rayons X permet d'analyser la formation d'intermétallique aux interfaces, d'oxydation d'interfaces,...

- La microscopie électronique à transmission (TEM)

Elle met en œuvre des faisceaux larges traversant à chaque instant l'ensemble d'un échantillon très mince. La tension d'accélération des électrons va en général de 40 kV à 3MV ce qui permet de traverser des épaisseurs d'autant plus grandes que la tension est plus élevée. Il est courant d'observer des épaisseurs maximales allant de 100 à 200 nm pour les appareils fonctionnant à jusqu'à 100 kV et plus. Un pouvoir de résolution ponctuelle de 0,2 à 0,3 nm est maintenant couramment atteint.

Applications : Cette technique est utilisée pour observer les défauts dans les semiconducteurs, en particulier la présence de défauts ponctuels ou de propagation de lignes de défauts au sein de la zone active des diodes électroluminescentes ou des diodes laser. Cette technique permet également de mettre en évidence la diffusion métallique dans le semiconducteur.

- La microscopie électronique à transmission et à balayage (STEM)

La formation des images et des diagrammes de diffraction est tout à fait identique à celle du microscope électronique à transmission. Cependant au lieu d'avoir un faisceau large illuminant tout l'échantillon, on utilise un faisceau très fin qui balaye point par point de façon séquentielle une zone limitée d'un échantillon mince. Cet appareil combine donc les avantages de la microscopie électronique à balayage, comme le grandissement par changement de zone balayée, le traitement informatique de l'image séquentiel... et ceux de la microscopie électronique à transmission. Il présente en outre des avantages spécifiques comme la suppression de l'aberration chromatique, car la trajectoire des électrons est insensible aux pertes d'énergie, et la limitation de la contamination de l'objet à la zone observée. Ce type d'appareil est le plus souvent couplé à des dispositifs de détection des rayons X ou de spectroscopie de pertes d'énergie des électrons ce qui permet une analyse chimique localisée avec une résolution très améliorée par rapport à celle obtenue avec des objets massifs.

- Courant induit par faisceau d'électrons (EBIC)

Des paires électron-trou sont générées dans le semiconducteur par un faisceau d'électrons incident de quelque keV. Dans le cas où ce dernier se situe dans la zone de déplétion d'une jonction PN, les électrons et les trous créés sont alors séparés par le champ électrique régnant dans la ZCE. Cet état donne naissance à un courant dans le composant qui est évacué par les contacts reliés à la masse. En observant l'image du composant, des zones sombres apparaissent et sont représentatives des jonctions PN. La résolution dépend de la diffusion des porteurs induits par le faisceau d'électrons.

Applications : Cette technique est utilisée pour déterminer des dégradations de la zone active des diodes laser et des diodes électroluminescentes de type DSD (Défauts ponctuels / Dark Spot Defect) ou DLD (Ligne de défauts / Dark Line Defect).

- La spectroscopie Auger

Lorsqu'un électron a été éjecté d'une sous-couche atomique de cœur sous l'effet, soit de la photo-ionisation, soit de l'interaction avec un faisceau incident d'électron, l'ion est laissé dans un état excité. La désexcitation qui s'ensuit peut s'effectuer selon deux voies compétitives : l'une, de type radiatif, est la fluorescence, c'est à dire l'émission de raies X caractéristiques de l'atome ; l'autre, de type non-radiatif, consiste en l'émission d'électrons dit Auger.

La transition Auger se produit entre un état initial une fois ionisé, caractérisé par un trou sur la sous-couche K, et un état final deux fois ionisé caractérisé par deux trous sur des sous-couches L et M ou N. la transition correspondante est notée KLM, les sous-couches L et M pouvant être éventuellement identiques. Les électrons Auger sont émis avec une énergie cinétique indépendante du moyen utilisé pour créer la vacance électronique initiale : elle est uniquement fonction des écarts énergétiques entre les différents niveaux K, L et M.

La spectroscopie Auger est utilisée pour caractériser des surfaces. On peut analyser les propriétés chimiques (corrosion, oxydation, activité catalytique des surfaces), les propriétés mécaniques (résistance, fatigue, fragilisation, adhésion, usure...), les problèmes de diffusion, de ségrégation aux joints de grains. La résolution est de 1/100 de monocouche en surface et 0,5 millimètres latéralement.

Applications : L'intérêt de cette technique d'analyse réside dans l'observation des dégradations localisées au niveau des surfaces d'émission.

- Photoluminescence

La photoluminescence résulte d'une interaction entre un faisceau de photons mono ou polychromatiques et le milieu étudié. Le milieu peut être un gaz, un liquide ou un solide. L'analyse spectrale de la lumière émise renseigne sur le processus d'absorption de la lumière incidente et les réémissions engendrées par divers mécanismes de désexcitations radiatives.

La photoluminescence est donc un phénomène que l'on observe à l'échelle macroscopique mais qui résulte directement d'interactions microscopiques, photons-électrons.

Par la faible énergie des photons incidents, la photoluminescence est un moyen d'étude non destructif. Tout au plus, on constate un échauffement des échantillons si la puissance d'excitation est trop importante.

Un spectre de luminescence consiste à enregistrer la dépendance spectrale de l'intensité de luminescence émise par le matériau. On distingue la photoluminescence continue de la luminescence résolue en temps qui permet non seulement d'enregistrer les intensités de luminescence mais aussi l'évolution temporelle de ces intensités à une longueur d'onde donnée. Elle fait appel à une source d'excitation pulsée. Si la durée de l'impulsion est courte par rapport au temps caractéristique des phénomènes observés, on peut avoir accès aux durées de vie des niveaux excités.

Suivant la longueur d'onde de la lumière émise, on utilise un photomultiplicateur pour la détection des émissions visibles et un détecteur germanium refroidi à la température de l'azote liquide pour la détection de l'infrarouge. Ce dernier présente l'inconvénient d'être assez sensible au bruit blanc, ce qui nécessite l'utilisation d'une détection synchrone.

Applications : La photoluminescence ne peut être effectuée que sur une structure de base (zone active, contacts, ...) et non sur un composant. Elle permet de caractériser le matériau constituant l'échantillon par l'observation des niveaux d'énergie du gap pour un semiconducteur. On peut notamment mettre en évidence la diffusion de dopant ou présence de centre non-recombinant dans la zone active d'une structure optoélectronique.

- Analyses électro-optiques

On s'intéresse aux caractéristiques courant-tension $I(V)$, puissance optique-courant $P(I)$ et intensité lumineuse-longueur d'onde $L(\lambda)$ du composant. Le système de mesure comporte un analyseur de semiconducteur, une sphère intégrante et un spectromètre pour réaliser les différentes mesures. On effectue ces dernières en fonction de la température à l'aide d'un cryostat à azote. La mesure en température permet d'identifier les différents mécanismes physiques mis en jeu au sein de la structure. De nombreux travaux ont montré qu'il était possible, à l'aide d'analyses électro-optiques d'identifier et de localiser les mécanismes de défaillance au niveau de la zone active, des miroirs et des électrodes d'un composant luminescent. Ce point sera fortement détaillé dans le chapitre II.

Applications : Les dispositifs actuels permettent d'envisager des précisions sur le courant de 10^{-15} A, sur la puissance optique de 10^{-7} W et sur la longueur d'onde de 10^{-2} nm. Ces qualités de mesure permettent de caractériser les diodes laser et les diodes électroluminescentes et d'assurer une analyse de défaillance non-destructive. On peut évaluer la défaillance de la zone active, des zones latérales et des contacts du composant. Cependant, elle nécessite une étude par analyse technologique qui assure la localisation du défaut. Durant les vingt dernières années ce travail a été effectué notamment par **M.Vanzi, M. Fufuda et O. Ueda [19, 21, 59]**.

IV.1.c / Synthèse

Nous avons réuni, dans le tableau 6, les différentes zones affectées et les moyens d'analyses permettant de les déterminer. La dernière colonne indique la signature de défaillance électro-optique typique observée pour chaque zone identifiée.

Partie dégradée	Cause de dégradation	Méthode d'analyses	Analyses électro-optiques
Zone active	Dislocation, interdiffusion	EBIC, TEM	Dérive du spectre optique et l'augmentation du courant à faible niveau d'injection
Hétérostructure	Défaut au niveau de l'hétérostructure (interfaces)	EBIC, TEM	Augmentation du courant aux faibles niveaux d'injection de courant, facteur d'idéalité
Surface d'émission	Oxydation	Auger	Décalage des modes du spectre optique
Electrode	Diffusion métallique	Auger, STEM	Augmentation du courant au fort niveau d'injection de courant
Brasure	Instabilité (réaction et migration des différents éléments)	MEB, EDX	Difficile de dissocier la défaillance de la brasure de celle de l'embase
Embase	Décollement du métal		

Tableau 6 – Récapitulatif des analyses de défaillance sur les composants émissifs IR

On observe que les différentes zones affectées peuvent être déterminées par les analyses électro-optiques. L'avantage manifeste de cette technique d'analyse réside dans son caractère non-destructif d'une part et son adaptation à mesurer les caractéristiques d'un composant situé dans un module d'autre part. De plus, il est possible de suivre le comportement électro-optique du composant en fonction du temps de vieillissement, en ne nécessitant aucune préparation, ce qui n'est pas le cas des autres techniques d'analyse. Cependant, afin de pouvoir effectuer des comparaisons, il est impératif de répondre à deux critères différents :

- Déterminer les caractéristiques électriques et optiques du composant à l'origine : pour cette partie, il est préférable de déterminer les caractéristiques du composant en fonction de la température de mesure afin d'augmenter les informations sur le comportement électro-optique de ce dernier.
- Effectuer une corrélation entre les signatures électro-optiques et les analyses de défaillance conventionnelles. Nous avons regroupé une bonne partie de ces derniers afin d'établir une correspondance entre les signatures électro-optiques et les zones dégradées dans le cadre de notre étude.

Nous allons, à présent, traiter de la partie assemblage des systèmes optoélectroniques émissifs

IR.

IV.2 / Mécanismes de défaillance et facteur d'aggravation des assemblages IR

Les défaillances de l'assemblage, sont essentiellement situées au niveau de l'alignement entre la puce et la fibre optique. La difficulté réside dans la localisation de la zone critique induisant une perte de puissance optique. Dans un premier temps, nous avons établi les exigences sur les assemblages optoélectroniques appliqués aux télécommunications. Par la suite, nous avons développé l'aspect fiabilité associé aux profils de mission. Enfin, nous avons déterminé la méthodologie d'analyse de défaillance que nous proposons dans ce document.

IV.2.a / Les exigences sur l'assemblage pour l'optoélectronique

- **Considérations sur l'architecture**

La première fonction du "packaging" en optoélectronique est de fournir un environnement stable et sûr pour une utilisation du système à long terme ainsi que de permettre la communication avec l'extérieur à l'aide d'interconnexions optiques ou électroniques. L'autre rôle est de fournir des connexions pour l'environnement extérieur afin de transférer les informations et d'évacuer la chaleur. Les modules servent à la fois à la protection des composants de l'influence extérieure et permettent des opérations fiables à long terme à des niveaux de performance appropriés à l'utilisation.

Dans un premier temps les composants optoélectroniques ont été incorporés dans des boîtiers prévus pour des composants électroniques. La réalisation fut rapide, cependant, les composants optoélectroniques ont nécessité un développement de l'architecture du boîtier plus spécifique afin d'améliorer et d'adapter les performances optiques ainsi que la fiabilité des systèmes. Comme le niveau composant a évolué pour inclure l'optoélectronique intégrée dans des systèmes conventionnels, les assemblages ont évolué sous formes plus sophistiquées afin d'améliorer l'adaptation des composants optoélectroniques d'aujourd'hui aux applications actuelles.

L'assemblage pour les systèmes optoélectroniques comporte de nombreuses similitudes avec l'électronique comme les composants discrets en haute fréquence, les circuits intégrés et les multi chip module. On retrouve de nombreuses étapes de fabrication ou de traitement qui permettent de donner une ligne directrice pour l'élaboration des assemblages optoélectroniques.

En générale, il y a deux exigences fondamentales sur le module :

- il doit permettre le fonctionnement du composant avec une fiabilité à long terme,
- il ne doit pas dégrader les performances intrinsèques des composants intégrés.

- **Considérations sur la fiabilité**

Cette partie se focalisera essentiellement sur la fiabilité des modules émetteurs utilisés dans les applications de télécommunication. Ces systèmes sont prévus pour des émissions de lumière modulées de 2,5 Gbits/s à 10 Gbits/s et doivent avoir une stabilité en puissance optique inférieure à 10% et une stabilité en longueur d'onde d'environ 100 ppm pour une émission centrée sur 1550 nm. En terme de fiabilité, la durée de vie sur plus de 15 ans des émetteurs pour les applications terrestres doit être inférieure à 500 FIT (Failure In Time). Pour les transmissions sous-marines, la contribution est nettement plus sévère avec un niveau de moins de 100 FIT sur 20 ans. L'objectif ultime à atteindre dans les prochaines années est de moins de 10 FIT sur 25 ans.

IV.2.b / Causes de défaillance dans un module optoélectronique

Les composants optoélectroniques doivent être protégés des contaminations atmosphériques et en même temps permettre l'échange lumineux intérieur comme extérieur. Les systèmes optoélectroniques sensibles peuvent être protégés de l'environnement par de nombreux matériaux.

Dans certaines applications, il est possible de contrôler l'environnement du système au niveau de la carte ou du système complet. Dans ces applications, la mise en boîtier par plastique est suffisante. Cependant, pour des applications nécessitant une fiabilité sans reproche, les systèmes métalliques parfaitement hermétiques sont les plus appropriés. Ces derniers sont composés de matériaux de constitution et de propriétés différentes (tableau 7). Lorsque le système est soumis à des évolutions thermiques sévères (des cycles thermiques rapides, par exemple), cela peut provoquer des différentielles de contraintes mécaniques sur les matériaux qui ont des coefficients de dilatation thermique (CTE) différents.

Matériau	CTE ($\times 10^{-6}/K$)	Conduction thermique (W/mK)	Module De Young (GPa)	Constante diélectrique (à 1 MHz)	Résistivité électrique ($\Omega\text{-cm}$)
Silicium	2,7	130-150	113	12	$>10^5$
Alumine	6,3-9,1	12,26	360	8-10	$>10^{14}$
Verre	4,6	1,2	69	5	$>10^{13}$
AlN	3,1	60-230	340	8-10	$>10^{14}$
Silice	5-6	42	72	3,7	$>10^{14}$
Diamant	1,5-2,8	400-2000	890-970	5,7	$>10^{13}$
Nitru de silicium	1,3	238	300	6,1	$>10^{11}$
GaAs	5,7	46	76	13,1	$>10^8$
InP	4,5	70	-	12,35	$>10^6$
Aluminium	24	238	62	-	$2,7 \cdot 10^{-6}$
Cuivre	16,8	398	110	-	$1,7 \cdot 10^{-6}$
Or	14,3	315	74	-	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Brasure					
Sn62Pb36Ag2	25	50	9	-	$14 \cdot 10^{-6}$
AuSn	16	57		-	$14 \cdot 10^{-6}$
Colle					
Maintient	15	-	4	-	-
conductrice	14	-	4	-	0,01

Tableau 7 – Caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour l'optoélectronique

L'hétérogénéité de ces différents matériaux implique la présence de zones critiques au sein du système. Nous allons, dans la prochaine section, détailler les méthodes permettant d'identifier les différentes zones critiques de l'assemblage.

IV.2.c / Analyse des points critiques d'un assemblage

La dégradation principale d'un assemblage optoélectronique réside dans le désalignement entre la puce et la sortie optique. Dans le cas des applications de télécommunication, les transferts de données s'effectuent par fibre optique et une très faible variation d'angle ($<2/100^\circ$) ou de déplacement latéral ($<2 \mu\text{m}$) induit une perte de couplage catastrophique [50].

Il n'existe quasiment aucune méthode d'analyse directe qui permet de localiser la dégradation au niveau des modules. En effet, on constate seulement une chute de puissance optique qui caractérise la dégradation.

Lorsqu'un module voit sa puissance optique diminuée, trois cas sont possibles :

- le composant seul est affecté,
- le système d'alignement seul se dégrade
- une part de la perte de puissance optique provient du composant et l'autre du désalignement entre la puce et la fibre optique.

Les analyses électro-optiques permettent de déterminer la part de dégradation à affecter au composant et au module. En effet, la caractérisation du composant situé dans l'assemblage est identique à celle développée pour les puces nues. De ce fait, les études réalisées pour ces dernières peuvent être transposées au composant situé dans un module afin de déterminer si ce dernier est dégradé ou non. Les relations établies entre les évolutions des caractéristiques électro-optiques et les analyses de défaillance conventionnelles (TEM, EBIC,...) permettent de localiser les dégradations dans le composant.

Dans le cas d'une dégradation de l'alignement optique entre la puce et la fibre, nous avons mis au point une méthodologie d'étude permettant de localiser les éléments critiques de l'assemblage. Cette dernière est conduite par l'association de simulations thermomécaniques et de tests d'expertises focalisés sur les sous-parties de l'assemblage identifiées comme critiques. Cette étude nécessite la connaissance des profils de mission et du procédé de fabrication du système considéré.

IV.3 / Gestion des études envisagées

Les études envisagées portent sur deux systèmes différents : les modules à diodes électroluminescentes et les têtes optiques pour les applications de télécommunication (1310 nm et 1550 nm).

- Diodes électroluminescentes

Deux questions importantes ont retenu notre attention :

- Quels sont les types de vieillissement critique pour ces diodes électroluminescentes ?
- Quelles sont les zones du composant affectées sous l'effet de ces contraintes critiques ?

Une étude a été mise en place en envisageant quatre types de vieillissements différents exposés dans le tableau 8. Ces vieillissements sont en relation avec les profils de mission de la diode électroluminescente et seront largement expliqués dans le chapitre III.

Type de contrainte	Condition sur le courant	Condition thermique
Stockage actif	110% du courant nominal (110 mA)	Palier fixe à +125°C
Stockage passif	0% du courant nominal	Palier fixe à +125°C
Cycles thermiques actifs	110% du courant nominal (110 mA)	-55°C/+125°C-5°C/min
Cycles thermiques passifs	0% du courant nominal	-55°C/+125°C-5°C/min

Tableau 8– Liste des différentes contraintes environnementales appliquées, en Laboratoire, aux diodes électroluminescentes étudiées

L'étude menée au chapitre III va permettre de déterminer la contrainte critique pour ces composants et les zones qui ont été affectées. De plus, nous avons conduit une campagne de vieillissements permettant d'évaluer la dégradation des zones concernées en fonction de la contrainte critique.

- Têtes optiques 1310 nm

Les têtes optiques étudiées dans les chapitres III et IV ont une structure similaire à celle présentée dans la figure 34. Nous détaillerons alors la structure et les matériaux mis en œuvre.

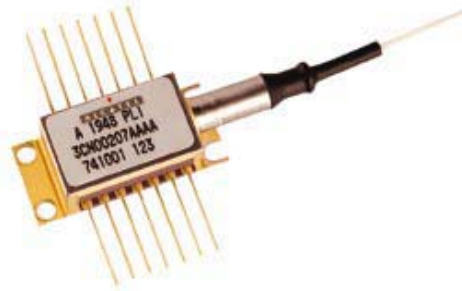


Figure 34 – Tête optique PLI 1948 – 1550 nm DFB

L'estimation de la fiabilité de ce type de système apporte deux questions essentielles :

- Quelles sont les parts de dégradations à attribuer au composant et à l'assemblage ? Autrement dit, quel est l'élément le plus critique entre le composant et la partie assemblage? Il apparaît que la partie assemblage pose des problèmes, en particulier, lors de certaines phases de construction. Par exemple, pour les applications à hautes performances/haut débit, il est assez fréquent que la connexion par soudage entre deux pièces métalliques du système d'alignement optique soit effectuée par tirs laser Nd : YAG. L'énergie déposée est telle que les contraintes résiduelles accumulées lors d'un assemblage peuvent être critiques. Nous détaillerons cet aspect dans le chapitre IV. Cependant, certains résultats que nous développerons au chapitre III montrent que la zone active du composant peut être également affectée.
- Quels peuvent être les moyens mis en place afin de déterminer rapidement et simplement les points critiques et les zones dégradées ? Ces points sont au centre de notre exposé, nous les développerons dans les chapitres III et IV. Nous tenterons alors de donner des réponses possibles avec les méthodologies associées.

Dans le cadre du chapitre III, nous nous sommes concentrés sur les défaillances de la diode lasers située au sein du module. Le chapitre IV s'intéresse à la détermination des points critiques de l'assemblage et de l'alignement optique. Dans le cadre de cette étude, une collaboration avec *ALCATEL Optronics* a été engagée depuis mai 2000.

V / CONCLUSION

L'objectif de ce premier chapitre a été de présenter un état de l'art des technologies optoélectroniques en insistant plus particulièrement sur les systèmes émissifs IR pour applications de télécommunication. Nous avons montré que l'évolution de ces technologies conduit à une utilisation courante de produits de plus en plus complexes.

Sans être exhaustif, nous avons décrit un ensemble d'applications optoélectroniques permettant de situer les travaux de notre exposé dans deux catégories différentes :

- Les diodes électroluminescentes dont le matériau est composé de InGaAs/GaAs, la longueur d'onde d'émission est centrée sur 935 nm et les applications courantes sont la détection de présence de produit,
- Les têtes optiques à diodes laser composées de InGaAsP/InP dont l'émission centrale est donnée à 1310 nm et les applications principales sont les transferts de données haut débit (640

Mbits/s) pour applications de télécommunication.

L'évaluation de la fiabilité de ces systèmes passe par des méthodes de caractérisation et de diagnostic de défauts de plus en plus sophistiquées avec comme objectif de différencier les dégradations orientées "composant" de celles orientées "assemblage". Deux approches peuvent alors être utilisées :

- une approche "technologique" basée sur l'utilisation de techniques de microanalyse coûteuses et difficiles à mettre en œuvre, nécessitant une préparation minutieuse de l'échantillon.
- une approche "signature" basée sur un nombre de caractérisations relativement limitées, complétées par une connaissance des mécanismes de dégradation relatifs à la technologie à évaluer.

Notre choix porte donc sur cette deuxième approche, considérée comme une approche "système". Les objectifs du prochain chapitre sont de développer les bases nécessaires à cette étude en s'attachant à rappeler les mécanismes physiques mis en jeu dans les structures photoniques et à décrire les différents éléments constituant le banc d'analyses électro-optiques développé au Laboratoire IXL.

Chapitre II - Principes et Structures émissives III-V – Description du banc d'analyses électro-optiques

I / INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre s'attache à décrire l'intérêt des mesures électro-optiques pour la caractérisation physique, l'évaluation technologique et le diagnostic de défaillances de composants optoélectroniques émissifs infrarouges pour applications de télécommunication. Il doit permettre de développer une méthodologie permettant de satisfaire à plusieurs critères :

- ❑ capacité d'analyse des paramètres technologiques et fonctionnels et leur relation,
- ❑ rapidité de mise en œuvre, d'acquisition et de traitement des données,
- ❑ détermination d'indicateurs précoces de défaillance après un ensemble de tests accélérés sur une durée relativement réduite (stockage ou cycles thermiques).

Cet objectif correspond à un besoin généralement exprimé par des équipementiers dont le souci est de réduire le nombre de tests efficaces caractérisant la technologie utilisée par l'intermédiaire d'une approche de type "signatures de défaillance". En effet :

- ❑ les techniques d'analyse de construction ou de défaillances (SEM, TEM, EBIC, photoluminescence...) de ces composants sont relativement complexes et coûteuses ne permettent pas d'assurer une fiabilité absolue d'investigation [21],
- ❑ la prévision de la durée de vie d'un système optoélectronique complexe non encore mature d'un point de vue technologique est le plus souvent réalisée à partir de lois statistiques relatives à un nombre important de composants et de tests accélérés sur une durée pouvant s'étendre jusqu'à des milliers d'heures [36].

La première partie a pour but de rappeler les principaux mécanismes électriques et optiques mis en jeu dans une structure émissive III-V basés sur les résultats de la physique du semiconducteur utilisant la statistique de **Fermi-Dirac** dans une jonction PN, concept de base d'un tel dispositif. Nous traiterons, de manière disjointe, les aspects électriques et optiques pour extraire les paramètres prépondérants dans ces composants. Pour cela, nous nous sommes attachés à rappeler les mécanismes physiques à l'origine de l'électroluminescence, dans une structure émissive, puis nous avons extrait l'ensemble des paramètres physiques associés.

A l'aide d'une évaluation bibliographique approfondie, la deuxième partie s'attache à définir les paramètres fonctionnels et leur ordre de grandeur typique relatif à un composant photonique émissif, diode électroluminescente (DEL) et diode laser, émettant dans l'infrarouge. Elle permet d'évaluer la sensibilité des mesures et les plus adaptées à la détermination de ces paramètres avec comme intérêt de ne pas modifier l'intégrité du composant et d'être directement liées à sa fonctionnalité.

Ces mesures, relativement classiques, sont basées sur des courbes $I(V)$, $L(E)$ et $P(I)$ en température permettant par l'intermédiaire d'un traitement semi-automatique, d'en déduire ou d'exploiter le schéma équivalent utilisable pour caractériser une DEL ou une diode laser émettant dans le domaine de l'infrarouge (technologie basée sur substrat GaAs et InP). Pour cela, une revue approfondie des modèles électriques équivalents des composants émissifs infrarouges a permis d'adopter des modèles simplifiés représentatifs des technologies à caractériser et des paramètres à

extraire. A partir du modèle adopté et de l'évolution de ces paramètres, une évaluation de la dispersion technologique initiale ainsi qu'un diagnostic de défaillances de ces composants pourraient alors être effectués.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du banc de mesures, des paramètres électro-optiques sélectionnés, mis au point au Laboratoire. Nous présenterons, en particulier, les caractéristiques et les limites de chaque sous-ensemble constituant le banc ainsi que les différents paramètres mesurables. Nous montrerons l'importance des mesures en température et nous décrirons les systèmes de régulation retenus.

L'objectif de ce banc est triple :

- obtenir des informations sur les valeurs des différents paramètres pour une technologie donnée,
- bénéficier d'une sensibilité suffisante pour observer des variations fines de ces paramètres susceptibles d'indiquer une dégradation du composant relative à un défaut d'origine technologique ou à des vieillissements accélérés,
- extraire l'ordre de grandeur de paramètres physiques pertinents cités dans la première partie permettant de caractériser plus finement une technologie et préciser le lieu des dégradations.

II / MECANISMES ELECTRO-OPTIQUES DES STRUCTURES EMISSIVES

Les mécanismes physiques expliquant l'émission de lumière par une structure semiconductrice peut se scinder en deux parties différentes :

- les caractéristiques électriques,
- les caractéristiques optiques.

Les deux prochaines sections vont rappeler l'ensemble des équations mettant en jeu les différents paramètres électro-optiques d'une telle structure.

II.1 / Caractéristiques électriques

De manière générale, la technologie des composants optoélectroniques émissifs est architecturée autour d'une structure de base d'un point de vue électronique : la jonction PN. Le moyen le plus simple pour étudier ce type de composant est donc d'utiliser les résultats relatifs aux mécanismes de transport électrique interne. Cette étude permet de relier les connaissances de bases avec la physique interne qui régit les déplacements de porteurs. Nous pourrions alors localiser les zones du composant se rapportant aux différents paramètres définis dans les paragraphes suivants extraits des mesures électriques I(V). Notre étude se limitera au rappel des phénomènes induits par une polarisation directe du composant et en particulier au rappel des relations courant-tension en fonction des niveaux d'injection. Les phénomènes physiques expliquant la conduction en polarisation inverse sont souvent empiriques et mal maîtrisés et ne peuvent être traités que dans le cadre d'un sujet complet d'étude. Pour cette raison, nous ne développerons pas la théorie de ces phénomènes physiques dans cette partie mais nous avons donné quelques résultats importants dans l'annexe A.1.

II.1.a / Caractéristiques courant – tension

Cette partie est relative à la définition des différentes zones de fonctionnement d'une jonction d'un point de vue électrique en fonction du niveau d'injection. La figure 35 représente la caractéristique générale courant-tension pour un composant optoélectronique émissif.

Elle est constituée de quatre zones de fonctionnement différentes :

- ☞ la zone I peut être relié à un courant de fuite,
- ☞ la zone II traduit les mécanismes de recombinaisons radiatives et non-radiatives de porteurs essentiellement au sein de la zone active,
- ☞ la zone III est relative aux faibles niveaux d'injection caractérisés par les phénomènes de recombinaisons radiatives et de diffusion présents dans la zone active,
- ☞ la zone IV représente les moyens et forts niveaux d'injection.

Ces zones ont été classées en s'inspirant d'une approche de type "jonction PN" proposée par **H. Mathieu [51]**.

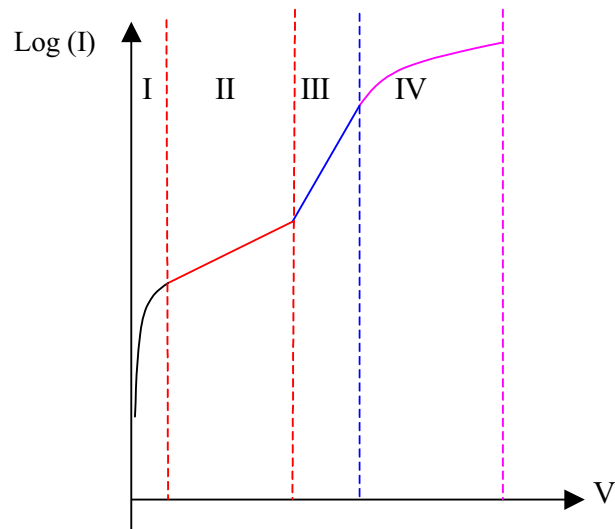


Figure 35 - Caractéristique générale courant-tension $\text{Log } I (V)$ d'une jonction PN en fonction du niveau d'injection

Dans une jonction PN, le courant est considéré comme étant la somme de mécanismes de transport différents, qui suivant la polarisation, prennent plus ou moins d'importance. Nous allons maintenant développer les différentes zones de fonctionnement citées précédemment. Nous préciserons les lieux géographiques auxquels se rapportent ces zones et la méthodologie d'extraction des paramètres associés.

La figure 36 schématise la géométrie de la jonction PN dont nous allons extraire les équations. Les phénomènes physiques évoluent suivant l'axe des x et sont considérés identiques suivant l'axe y .

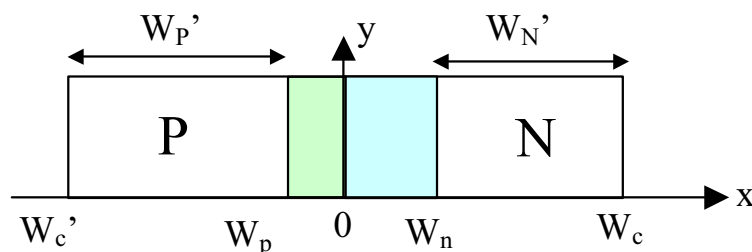


Figure 36 – Grandeurs caractéristiques d'une jonction PN

Pour l'extraction des paramètres électriques, nous effectuerons le changement de variable suivant $\mathbf{J} \rightarrow \mathbf{I} = \mathbf{J} \times \mathbf{S}$ où \mathbf{S} est la section de la jonction PN. En effet, le courant \mathbf{I} est directement relié aux phénomènes de transport électrique dans une jonction PN et les paramètres sont extraits de la courbe $I(V)$. Ce procédé sera détaillé en fin de partie par une figure représentant la courbe $\text{Log}I(V)$, les différentes zones de fonctionnement et les paramètres fonctionnels associés. Nous allons, à présent, expliciter les relations courant-tension en fonction des niveaux d'injection. Ces relations s'obtiennent en considérant les 4 zones de fonctionnement et leurs mécanismes physiques.

II.1.b / Relations courant-tension en fonction du niveau d'injection

Dans chacune des parties, nous mettrons en avant le mécanisme prépondérant associé en explicitant la zone dans laquelle ce dernier prend naissance. Nous commencerons par les faibles polarisations dont la majeure partie des mécanismes sont des conductions parasites.

- Zone I – Résistance de fuite

La zone I correspond à un mode de fonctionnement électrique "parasite" relatif à un courant de fuite. En effet la jonction est proche de l'état d'équilibre thermodynamique. Les polarisations correspondent aux largeurs des zones de déplétion les plus importantes en polarisation directe. Les mouvements de porteurs sont donc nuls ou extrêmement faibles dans le semiconducteur.

- *Mécanisme de conduction très faibles niveaux d'injection*

On observe un courant non nul aux très faibles niveaux d'injection. Il apparaît que cette partie de caractéristique correspond, en première approximation, à une loi linéaire entre I et V traduisant un fonctionnement résistif. Cette résistance appelée résistance de "shunt" a été mis en évidence dans les travaux de **M.Fukuda [19]** et **M.Vanzi [52]**. Cependant, dans certains cas, les fuites de courant sont représentées par un dipôle électrique exprimant le caractère non-linéaire des courbes courant-tension.

- *Extraction du paramètre R_{sh}*

Le paramètre R_{sh} est relié aux conductions parasites sur les "bords" de la puce [53]. Les lois physiques expliquant ce phénomène ne sont pas parfaitement établies. Cependant, de nombreuses études expérimentales montrent, en première approximation, que les fuites de courant sont ohmiques [52]. La détermination de ce paramètre dépend fortement de la technologie et ne peut être exploitée qu'avec les mesures expérimentales $I(V)$ d'un système de mesure très bas niveau de courant. En effet, les composants actuels sont d'excellente qualité (sur substrat GaAs ou InP) et les phénomènes de fuite sont généralement observés pour un courant inférieur à 1 nA.

- Zone II – Mécanismes de recombinaison

Cette partie aborde les différentes équations importantes permettant de justifier le phénomène de recombinaison au sein de la structure. Le but est de trouver la relation liant le courant à la tension relative à ce mécanisme. Nous pourrions alors définir les paramètres prépondérants à la zone II du fonctionnement de la jonction. Dans un composant optoélectronique, le mécanisme de recombinaison dans la zone de déplétion est en concurrence avec le courant de recombinaison photonique dont le fonctionnement est effectif sur les zones II et III. Dans le souci de simplifier cette section, ce courant sera explicité dans la prochaine partie où il prend une importance non négligeable. Nous nous bornerons donc à développer le mécanisme de recombinaison non-radiatif dans la zone de charge d'espace.

En présence d'une polarisation, la mise hors équilibre de la jonction PN se traduit par un excès de porteurs par rapport à l'équilibre dans les zones quasi-neutres. Dans le cas d'une polarisation directe, le retour à l'équilibre privilégie le mécanisme de recombinaisons des porteurs en excès, alors qu'en polarisation inverse, le mécanisme prépondérant est la génération de porteurs en excès. Nous allons détailler le phénomène de recombinaison dans le cas d'une polarisation directe de la jonction. De la même façon, il faut également considérer ce phénomène dans la zone de charge d'espace contenant des centres de génération-recombinaison. Nous allons donc rappeler deux notions relatives

aux mécanismes de génération-recombinaison liées à la polarisation directe : le taux de recombinaison et le courant de génération-recombinaison.

▪ *Taux de recombinaison*

La densité de porteurs dans la zone de charge d'espace étant faible, le taux de recombinaison r est donné par l'expression de **Shockley-Read** :

$$r = \frac{1}{\tau_m} \frac{pn - n_i^2}{2n_i + p + n} \quad \text{[11]} \quad \text{E II-1}$$

avec τ_m la durée de vie des porteurs, n est la densité d'électrons, p la densité de trou et n_i la densité de porteur pour le matériau semiconducteur non dopé.

Lorsque la jonction est polarisée en direct ($V > 0$) le produit np est donné par l'expression : $np = n_i^2 e^{qV/kT}$. Cette expression devient positive et entraîne donc que : $r > 0$

La figure 37 représente la courbe $r(x)$ qui montre que le taux de recombinaisons est maximal au centre de la zone de déplétion et décroît très rapidement en dehors de cette zone.

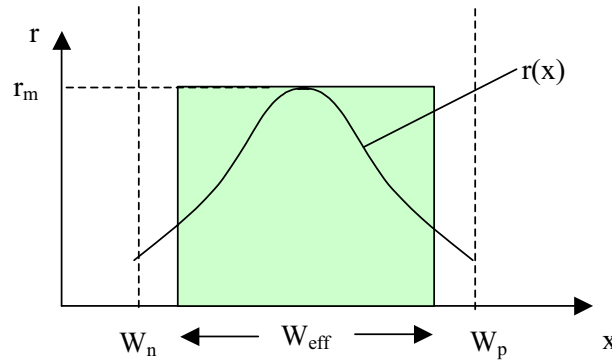


Figure 37– Caractéristique de r en fonction de x

Le maximum du taux de recombinaison r_m est obtenu pour : $n = p = n_i e^{qV/2kT}$.

En ce point, le taux de recombinaison est maximum et il est donné par la relation suivante :

$$r_m = \frac{1}{\tau_m} \frac{n_i^2 (e^{qV/kT} - 1)}{2n_i (1 + e^{qV/2kT})} \quad \text{E II-2}$$

Dans la mesure où $V \gg kT/q$ est vérifiée, l'expression précédente se simplifie de la manière suivante :

$$r_m = \frac{n_i e^{qV/2kT}}{2\tau_m} \quad \text{E II-3}$$

On peut ainsi définir la largeur effective W_{eff} de la zone de charge d'espace à partir de l'expression du taux de recombinaison $r(x)$ par la relation :

$$\int_{W_p}^{W_n} r dx = r_m W_{\text{eff}} \quad \text{E II-4}$$

- *Courant de recombinaison*

Les surfaces de la fonction $r(x)$ et du terme $r_m W_{\text{eff}}$ sont supposées identiques (voir figure 37). Nous pouvons alors simplifier l'expression du courant de recombinaison J_r qui s'écrit :

$$J_{\text{gr}} = J_r = q \int_{W_p}^{W_n} r dx = q r_m W_{\text{eff}} = \frac{q n_i \cdot W_{\text{eff}} \cdot e^{qV/2kT}}{2\tau_m} \quad \text{E II-5}$$

soit encore :

$$I = \frac{q n_i W_{\text{eff}} S}{2\tau_m} e^{qV/2kT} = I_{\text{gr}} e^{qV/2kT} \quad \text{E II-6}$$

- *Localisation des zones fonctionnelles*

Les mécanismes de génération-recombinaison sont essentiellement présents dans la zone de charge d'espace comme le montre la figure 37. L'ensemble de la puce est donc concerné, en particulier la zone active. En effet, cette zone est intrinsèque et les zones de déplétion se répandent préférentiellement dans les zones de plus faible dopage [51].

- *Extraction du paramètre I_{gr}*

La zone de la caractéristique $\text{Log}I(V)$ correspondant au mécanisme de recombinaison est une portion de droite. La composante dominante du courant peut être modélisée par une loi classique et un facteur d'idéalité de 2. On peut alors directement déterminer le paramètre I_{gr} (courant de saturation de génération-recombinaison) de la façon suivante :

$$I = I_{\text{gr}} e^{qV/2kT} \Leftrightarrow \text{Log}I = \text{Log}I_{\text{gr}} + \frac{qV}{2kT} \quad \text{E II-7}$$

L'équation E II-7 montre que le courant de saturation de génération-recombinaison I_{gr} est donné par l'intersection de la droite considérée avec l'axe des ordonnées. La méthode d'extraction de ce paramètre sera présentée en fin de partie sur une figure représentant la courbe $\text{Log}I(V)$. L'extrémité supérieure de cette droite indique la frontière de la caractéristique $\text{Log}I(V)$ relative aux mécanismes des faibles niveaux d'injection.

- **Zone III – Faibles niveaux d'injection**

Nous allons, dans cette partie, rappeler les principales équations régissant les faibles niveaux d'injection au sein d'une jonction PN. Le but est de trouver la relation liant le courant à la tension. Nous pourrions alors extraire les paramètres associés de la zone III de la caractéristique $I(V)$.

- *Condition de faibles niveaux d'injection*

Pour calculer le courant traversant la jonction en fonction de la tension de polarisation, nous nous placerons dans un premier temps, dans l'hypothèse de **faible niveau d'injection** : dans chacune des régions, les porteurs majoritaires à l'équilibre thermodynamique restent majoritaires lorsque la jonction est polarisée. En d'autres termes, la densité de porteurs majoritaires dans chacune des régions

est peu affectée par la polarisation.

- *Equations en courant – mise en évidence des paramètres*

L'expression des courants comporte deux termes caractéristiques de la jonction III-V :

☞ un courant de diffusion résumé par les équations suivantes :

$$\mathbf{J}_p \approx -q\mathbf{D}_p \frac{dp}{dx} \text{ et } \mathbf{J}_n \approx q\mathbf{D}_n \frac{dn}{dx} \quad \text{E II-8}$$

$$\mathbf{J}_p = \frac{qn_i^2 \mathbf{D}_p}{N_d L_p \text{sh}(d_n / L_p)} (e^{qV/kT} - 1) \text{ch}((W_c - X) / L_p)$$

$$\mathbf{J}_n = \frac{qn_i^2 \mathbf{D}_n}{N_a L_n \text{sh}(d_p / L_n)} (e^{qV/kT} - 1) \text{ch}((X - W_c') / L_n) \quad \text{E II-9}$$

☞ un courant de recombinaison résumé par les équations suivantes :

$$\mathbf{J} = q\mathbf{d}(A_{nr} n + Bn^2 + C_{Aug} n^3) \quad \text{E II-10}$$

avec

A_{nr}	Taux de recombinaison non-radiatif
B	Coefficient de recombinaison bi-moléculaire
C_{Aug}	Coefficient de recombinaison Auger
d	Epaisseur de la zone active

On définit les termes τ_{rad} , τ_{nr} et τ_{tot} qui sont respectivement les temps de recombinaisons radiatives, non radiatives et totales. La condition des faibles niveaux d'injection de courant implique que $C_{aug}=0$ puisque ce phénomène physique n'apparaît que pour les très forts niveaux de courant. Soit donc :

$$\frac{1}{\tau_{nr}} = A_{nr}$$

$$\frac{1}{\tau_{rad}} = Bn \quad \text{E II-11}$$

$$\frac{1}{\tau_{tot}} = \frac{1}{\tau_{nr}} + \frac{1}{\tau_{rad}}$$

On en déduit l'expression du courant de recombinaison photonique \mathbf{J}_{ph} en considérant que : $n = p = n_i e^{qV/2kT}$

$$\mathbf{J}_{ph} = q\mathbf{d}n_i \left(\frac{1}{\tau_{nr}} + \frac{1}{\tau_{rad}} \right) e^{qV/2kT} \quad \text{E II-12}$$

Si nous négligeons les courants de génération-recombinaison, nous pouvons établir que :

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \mathbf{J}_n(\mathbf{W}_p) + \mathbf{J}_p(\mathbf{W}_p) + \mathbf{J}_{ph} \\ \mathbf{J} &= \mathbf{J}_n(\mathbf{W}_n) + \mathbf{J}_p(\mathbf{W}_n) + \mathbf{J}_{ph} \\ \mathbf{J} &= \mathbf{J}_n(\mathbf{W}_p) + \mathbf{J}_p(\mathbf{W}_n) + \mathbf{J}_{ph} \end{aligned} \quad \text{E II-13}$$

L'expression du courant total dans structure devient donc :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{ho} \left(e^{qV/kT} - 1 \right) + \mathbf{J}_{hj} e^{qV/2kT} \quad \text{E II-14}$$

avec

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{ho} &= \frac{qn_i^2 D_p}{N_d L_p \text{th}(d_n / L_p)} + \frac{qn_i^2 D_n}{N_a L_n \text{th}(d_p / L_n)} \\ \mathbf{J}_{hj} &= qdn_i \left(\frac{1}{\tau_{nrad}} + \frac{1}{\tau_{rad}} \right) \end{aligned} \quad \text{E II-15}$$

Nous avons donc défini le courant dans la zone de fonctionnement des faibles niveaux d'injection. Dans le cas des composants optoélectroniques, le courant de recombinaison doit être le plus important. On peut généraliser l'expression du courant en considérant les paramètres \mathbf{J}_s et η :

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \mathbf{J}_s \left(e^{qV/\eta kT} - 1 \right) \\ \mathbf{J}_s &= f(\mathbf{J}_{hj}, \mathbf{J}_{ho}) \end{aligned} \quad \text{E II-16}$$

Le facteur η est compris entre 1 et 2. la fonction f ne peut être déterminée que par simulation mathématique en considérant l'équation E II-17. Il caractérise le rapport entre le taux de recombinaison et le taux de diffusion. Plus précisément, une zone semiconductrice dont le mécanisme de transport est défini par de la diffusion a un facteur d'idéalité de 1. Dans le cas où ce phénomène est le siège de recombinaison uniquement, le facteur d'idéalité est égal à 2.

- *Localisation des zones fonctionnelles*

Les mécanismes des faibles niveaux d'injection sont essentiellement situés dans la zone active du composant d'après **M.Fukuda [19]**.

- *Extraction des paramètres*

De la même manière que pour le courant de génération-recombinaison, la courbe représentant les faibles niveaux d'injection est une droite dans la représentation $\text{LogI}(V)$. La relation courant-tension est donnée par :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_s \left(e^{qV/\eta kT} - 1 \right) \Leftrightarrow \text{LogI} = \text{LogI}_s + \frac{q}{\eta kT} \quad \text{E II-17}$$

Nous pouvons extraire deux paramètres : \mathbf{I}_s le courant de saturation et η le facteur d'idéalité. Le paramètre \mathbf{I}_s est donné par la valeur de l'ordonnée à l'origine et le paramètre η est proportionnel à

la pente de la droite. Ces deux paramètres seront représentés graphiquement en fin de partie. La limite supérieure de ce fonctionnement est donnée par les forts niveaux d'injection que nous présentons dans la prochaine section.

- Définition du courant de seuil et de la tension de seuil

Les structures optoélectroniques émissives constituées de jonction PN sont caractérisées par le courant de seuil I_{th} et la tension de seuil V_{th} . Ces deux paramètres représentent le seuil de fonctionnement des structures considérées délimitant les faibles niveaux d'injection de courant des forts niveaux d'injection. Dans un composant photonique, le courant de seuil est fonction de paramètres électriques et optiques :

$$I_{th} = \frac{qVn_{transp}}{\alpha_0 \eta_i \tau_{rad}} [\gamma_{th} - \alpha_0] \quad \text{E II-18}$$

avec n_{transp} le nombre de porteurs induit par le phénomène de transport, γ_{th} le gain optique seuil, η_i le rendement quantique interne, α_0 , le gain de transparence et τ_{rad} la durée de vie radiative des porteurs. Les paramètres optiques seront développés dans la prochaine section.

Il existe deux approches principales très utilisées pour déterminer expérimentalement, sur la courbe $I(V)$, le point de coordonnées (I_{th}, V_{th}) correspondant au seuil du composant.

- *Approche directe sur les courbes $I(V)$*

La méthode utilise la représentation $I(V)$ linéaire (figure 38) permettant, notamment, de mettre en évidence le fonctionnement ohmique de composant sur la zone IV.

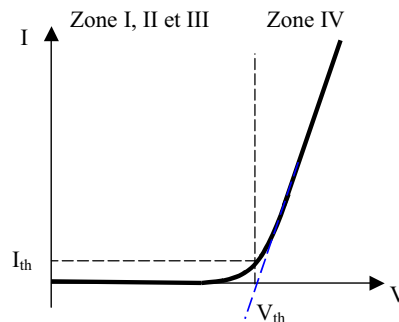


Figure 38 – Caractéristique typique d'une représentation $I(V)$

Le prolongement de la droite caractéristique de la zone IV de la courbe $I(V)$ sur l'axe des abscisses (V) donne un point que l'on définit comme étant la tension de seuil du composant considéré. Ce type de détermination n'est valable que pour les composants à jonction PN. En connaissant la tension de seuil V_{th} , la valeur du courant de seuil I_{th} est obtenue graphiquement. Cette méthode est souvent peu précise puisque les représentations $I(V)$ ne permettent pas une détermination du seuil (V_{th}, I_{th}) de la diode. Afin d'améliorer la détermination de ce point de fonctionnement, une approche dérivative du premier ordre est souvent utilisée.

- *Approche dérivative de premier ordre – aide à la détermination de I_{th} et V_{th}*

La méthode utilisée réside dans une extraction effectuée sur les points de mesures permettant de déterminer η , V_{th} et I_{th} . On considère la caractéristique $I(V)$ de la diode laser pour les faibles niveaux d'injection dont l'équation est donnée par :

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) \quad \text{E II-19}$$

Le calcul nécessaire pour extraire η est le suivant :

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right)$$

$$\Leftrightarrow \text{Log}I = \text{Log}I_s + \frac{qV}{\eta kT} \quad \text{E II-20}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dI}{I} = \frac{q dV}{\eta kT} \Leftrightarrow \eta = \frac{q}{kT} I \frac{dV}{dI}$$

Les représentations de η en fonction de I et en fonction de V typiques sont réunies dans la figure 39.

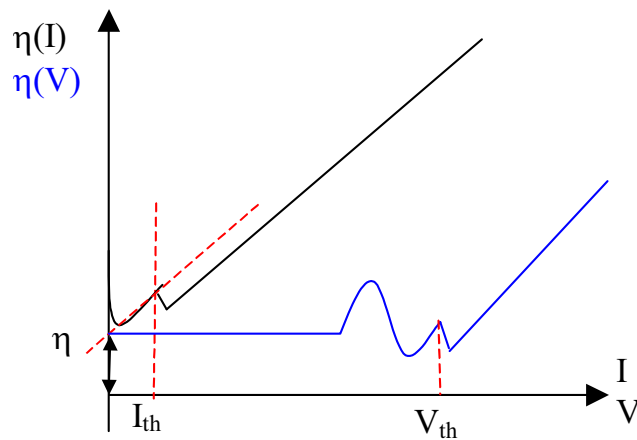


Figure 39 – Caractéristique typique d'une représentation $\eta(I)$ et $\eta(V)$

Une autre méthode d'extraction de la tension de seuil V_{th} et de courant de seuil I_{th} peut être obtenu en traçant la courbe I en fonction de $V - R_s I$. Enfin la courbe P en fonction de I donne la valeur du courant de seuil lorsque P s'annule (intersection avec l'axe des abscisses I).

- Zone IV - Moyens et Forts niveaux d'injection

Cette dernière partie s'attache à donner les différentes équations régissant les forts niveaux d'injection de courant. Le but est de trouver la relation liant le courant à la tension pour ce dernier. Nous pourrons alors extraire les paramètres fonctionnels associés de la zone IV du fonctionnement de la jonction.

- *Condition de polarisation*

Les forts niveaux d'injection se situent aux fortes polarisations en directe. Le fonctionnement peut se diviser en deux parties distinctes dont la frontière est relativement difficile à extraire :

- aux moyennes injections, la caractéristique courant-tension varie en $e^{qV/2kT}$,
- aux fortes polarisations, la zone de déplétion devient très étroite et seules les résistances des zones neutres subsistent.

- *Moyens niveaux d'injection*

Afin de retrouver la caractéristique courant-tension en $e^{qV/2kT}$, nous considérons une jonction de type P⁺N [51]. La densité de courant s'écrit alors :

$$\begin{aligned} J_n(W_p) = J_n(W_n) &= \left(nq\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \right)_{w_n} \approx 0 \\ J = J_n(W_p) + J_p(W_n) &\approx \left(pq\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx} \right)_{w_n} \approx 0 \end{aligned} \quad \text{E II-21}$$

Comme sur la quasi-totalité des zones neutres (excepté très près du contact ohmique), on a $p \approx n$ et donc $\frac{dp}{dx} \approx \frac{dn}{dx}$ il vient :

$$J_p \approx -2qD_p \frac{dp}{dx} \quad \text{E II-22}$$

En tenant compte de l'équation E II-8, on remarque que ce courant est deux fois plus élevé que la composante de diffusion. On peut donc considérer que les composantes de diffusion et de conduction sont égales. Comme $\frac{dp}{dx} \approx -\frac{p(W_n)}{W'_N}$

$$J \approx J_p \approx 2qD_p \frac{p(W_n)}{W'_N} \quad \text{E II-23}$$

où W'_N est la largeur de la zone neutre côté N représentée dans la figure 36. On obtient alors la relation suivante :

$$\begin{aligned} J &\approx J_{OH} \exp \frac{qV}{2kT} \\ J_{OH} &= \frac{2qD_p n_i}{W'_N} \end{aligned} \quad \text{E II-24}$$

On retrouve donc une variation linéaire dans une représentation semi-logarithmique $\text{LogI}(V)$ donnée par la relation :

$$I \approx I_{OH} \exp \frac{qV}{2kT}$$

$$I_{OH} = \frac{2qD_p n_i S}{W'_N}$$
E II-25

▪ *Forts niveaux d'injection*

Lorsque la densité de courant devient plus importante, la caractéristique courant-tension peut être représentée par une droite en coordonnées linéaires. Le comportement de la jonction est de type résistif. La résistance équivalente correspond aux zones neutres de la jonction et au contact métal/semiconducteur. Les éléments les plus résistifs correspondent aux zones neutres. Au-delà d'une certaine tension, la zone de charge d'espace varie très peu impliquant que la valeur de la résistance équivalente reste quasi-constante. La relation donnant la variation courant-tension s'exprime comme suit :

$$J = \frac{V - V_{th}}{R_{s\phi}}$$

$$R_{s\phi} = R_{contact\phi} + \rho_n W'_N + \rho_p W'_P$$
E II-26

où V_{th} est la tension de seuil de la diode et $R_{s\phi}$ est la résistance carrée de l'ensemble de la structure ($R_s = R_{s\phi} S$ où S est la surface de la structure).

▪ *Localisation des zones fonctionnelles*

Ce mécanisme traduit pour l'essentiel les phénomènes situés dans l'interface semiconducteur/métal et les zones neutres externes à la zone active d'après [19].

▪ *Extraction de paramètres*

Cette partie traite de deux fonctionnements différents qui apportent deux paramètres : le courant de saturation pour les forts niveaux I_{OH} et la résistance série R_s . Le courant de saturation s'obtient de la même manière que les paramètres I_{gr} et I_s donnés dans les paragraphes précédents. Soit donc :

$$I \approx I_{OH} \exp \frac{qV}{2kT} \Leftrightarrow \text{Log} I = \text{Log} I_{OH} + \frac{qV}{2kT}$$
E II-27

La résistance R_s est l'inverse du coefficient directeur de la courbe $I(V)$ dans une représentation linéaire.

II.1.c / Synthèse des paramètres exploitables à partir des courbes $I(V)$

La figure 40 représente la courbe $\text{Log} I(V)$ théorique avec les différents paramètres caractérisant les phénomènes physiques au sein d'une jonction PN. On note que les moyens niveaux d'injection de courant se manifestent sur une zone très étroite en début de la zone IV. Afin de simplifier l'extraction des paramètres, nous considérerons la zone IV comme étant purement ohmique.

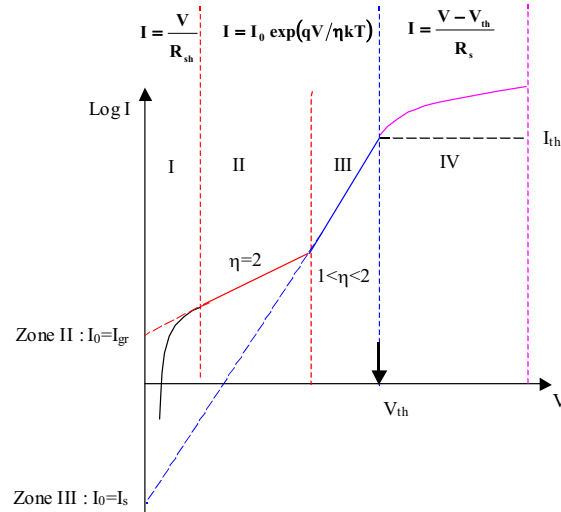


Figure 40 – Caractéristique Log I(V) avec l'extraction des paramètres électriques

Le tableau 9 liste tous les paramètres principaux définis dans cette partie. Nous donnons le nom du paramètre dans la première colonne. La deuxième colonne résume l'expression du paramètre et la troisième indique la zone de la caractéristique I(V) à laquelle ce paramètre se rapporte. Enfin, nous donnons les valeurs typiques pour ce paramètre.

	Paramètre	Expression théorique	Zone	Valeurs typiques
a	R_{sh} : résistance de très faible niveau	$R_{sh} = V / I$	I	10^{10} à $10^{14} \Omega$ [53]
b	I_r : courant de saturation de recombinaison pour les très faibles niveaux d'injection	$I_{gr} = \frac{qn_i \cdot W_{eff} S}{2\tau_m}$ $I_{hj} = qdn_n S \left(\frac{1}{\tau_{nrad}} + \frac{1}{\tau_{rad}} \right)$	II	10^{-9} à $10^{-12} A$ [51]
	I_s : courant de saturation associé à I_{ho} et I_{hj} pour les faibles niveaux d'injection	$I_{ho} = \frac{qn_i^2 D_p S}{N_d L_p th(d_n / L_p)} + \frac{qn_i^2 D_n S}{N_a L_n th(d_p / L_n)}$ $I_{hj} = qdn_n S \left(\frac{1}{\tau_{nrad}} + \frac{1}{\tau_{rad}} \right)$	III	10^{-10} à $10^{-12} A$ [54]
	η : facteur de non-idéalité	$\frac{1}{U_T} I_d \frac{dV_d}{dI_d}$	III	$1 < \eta < 2$ [54]
c	I_{OH} : Courant de saturation pour les forts niveaux d'injection	$I_{OH} = \frac{2qD_p ni}{W'_N}$	IV	Difficulté d'extraction
	R_s : résistance série	$\frac{V_d - V_{seuil}}{I}$ pour $I > I_{seuil}$	IV	$2,5$ à 10Ω [53, 54]

Tableau 9– Tableau récapitulatif des paramètres électriques

La figure 41 illustre, de manière schématique, les différentes zones fonctionnelles liées aux paramètres électriques définis dans le tableau 9 précédent.

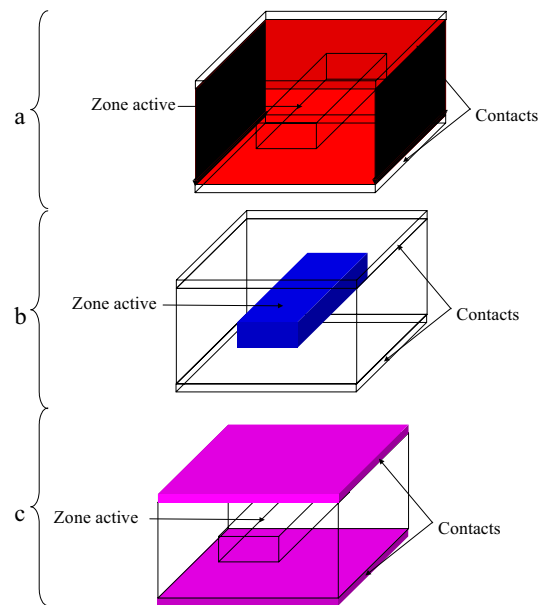


Figure 41– Représentation schématique des zones du composant relatives aux paramètres électriques

Nous allons, à présent, rappeler les principales relations concernant les caractéristiques optiques d'un composant optoélectronique émissif.

II.2 / Caractérisations optiques

Les caractéristiques optiques sont essentielles, pour un composant photonique, car elles sont en relation directe avec sa fonctionnalité. Cette dernière est explicitée au travers d'un certain nombre de paramètres physiques relatifs à la technologie (point de vue d'un fabricant) et de paramètres système relatifs aux performances du composant (point de vue d'un équipementier). La figure 42 présente la géométrie du composant émissif considéré.

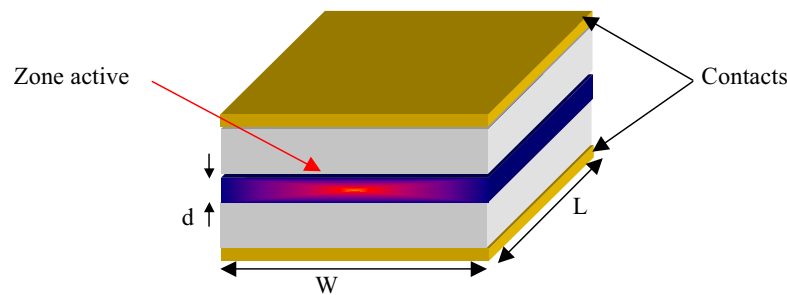


Figure 42 – Géométrie d'un composant émissif

Les critères de choix d'un composant optoélectronique émissif peuvent donc s'effectuer à partir du tableau 10.

Description	Paramètre physique	Paramètre système
Longueur d'onde	λ	Longueur d'onde Courant de seuil Rendement puissance/courant Largeur de raie pour un courant donné Bande à -3 dB pour un courant donné Espacement de mode Chirp Bruit RIN
Volume de la couche active	dWL	
Durée de vie de photons	τ_{ph}	
Facteur d'émission spontanée	R_{spon}	
Durée de vie des porteurs	τ_m	
Densité de porteurs à la transparence	n_{seuil}	
Rendement quantique	η_{int}	

Tableau 10 – Paramètres physiques et systèmes pour la définition d'une diode laser (d'après [17])

Nous allons débiter cette partie par le spectre d'émission d'une structure émissive

II.2.a / Spectre d'émission d'une structure émissive III-V

La forme d'un spectre d'émission est issue de deux mécanismes physiques de nature différente : l'émission spontanée et l'émission stimulée. Les deux phénomènes sont présents dans une structure, cependant, l'un d'entre eux prédomine sur l'autre en fonction de la structure technologique et du courant d'alimentation.

- *Emission spontanée*

Les porteurs excédentaires s'accumulent et se répartissent dans les bandes de conduction et de valence, occupant des états d'énergie croissante dans ces bandes (figure 43). Dans un modèle à une seule bande de valence, la répartition des porteurs dans leurs bandes respectives est décrite par un quasi-niveau de Fermi, E_{Fc} pour les électrons et E_{Fv} pour les trous de la bande de valence.

Cet écart à l'équilibre, décrit par des quasi-niveaux différents pour les électrons et les trous, conduit à une augmentation de l'émission spontanée dont le taux spectral $R_{spon}(h\nu)$ par unité de temps, de volume et d'énergie des photons émis $h\nu$ est donné par :

$$R_{spon}(h\nu) = \frac{1}{\tau_R} \rho_j(h\nu) f_c(h\nu) (1 - f_v(h\nu)) \quad [11] \quad \text{E II-28}$$

avec les quantités suivantes :

☞ τ_R est la durée de vie spontanée du matériau émetteur : on peut la supposer relativement indépendante de l'énergie des photons émis. C'est une quantité qui est propre au semiconducteur. On la définit de la manière suivante :

$$\frac{1}{\tau_R} = \frac{q^2 \chi_{vc}^2 n_{op} \omega_{vc}^2}{\pi c^3 \hbar \epsilon_0} = \frac{q^2 n_{op} E_g E_p}{2\pi c^3 \hbar^2 \epsilon_0 m_e} \quad \text{E II-29}$$

avec

χ_{vc}	Elément de la matrice dipolaire
n_{op}	Indice optique du matériau
ω_{vc}	Pulsation des photons émis
E_g	Energie du gap
E_p	Champ électrique
c	Célérité de la lumière
\hbar	Constante de Planck réduite
ϵ_0	Permittivité dans le vide
m_c	Masse de l'électron

☞ $\rho_j(h\nu)$ représente la densité d'états joints donnée par :

$$\rho_j(h\nu) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_r}{\hbar^2} \right)^{3/2} (h\nu - E_g)^{1/2} \quad \text{E II-30}$$

représentant le nombre d'états qui satisfont à la conservation de l'énergie $h\nu = E_c(\mathbf{k}) - E_v(\mathbf{k})$ et du moment (\mathbf{k} définit comme étant le vecteur d'onde est constant lors de transitions radiatives) lors de la transition d'un état d'énergie $E_v(\mathbf{k})$ de la bande de valence à un état d'énergie $E_c(\mathbf{k})$ de la bande de conduction (figure 43).

☞ $f_c(h\nu)$ et $f_v(h\nu)$ décrivent les fonctions de **Fermi-Dirac** décrivant l'occupation des états connectés par la transition optique, c'est à dire satisfaisant à :

$$f_c(h\nu) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_c(h\nu) - E_{Fc}}{kT}\right)} \quad \text{E II-31}$$

$$E_c(h\nu) = E_g + \frac{m_r}{m_c} (h\nu - E_g)$$

et

$$f_v(h\nu) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_v(h\nu) - E_{Fv}}{kT}\right)} \quad \text{E II-32}$$

$$E_v(h\nu) = -\frac{m_r}{m_v} (h\nu - E_g)$$

avec

m_c	Masse effective de densité d'état de la bande de conduction
m_v	Masse effective de densité d'état de la bande de valence
m_r	Masse effective relative

En règle générale, dans le cas d'une diode électroluminescente, la densité de porteurs excédentaires est suffisamment faible pour pouvoir s'autoriser à simplifier les fonctions de **Fermi-Dirac** par la fonction de **Boltzmann**. Les quasi-niveaux de Fermi sont considérés comme éloignés des extremums de bandes. La figure 43 schématise les transitions optiques dans un semiconducteur. Ces dernières sont verticales, c'est à dire à vecteur d'onde k constant. Les états $E_c(h\nu)$ et $E_v(h\nu)$ sont les états joints par les transitions optiques mettant en jeu des photons d'énergie $h\nu$.

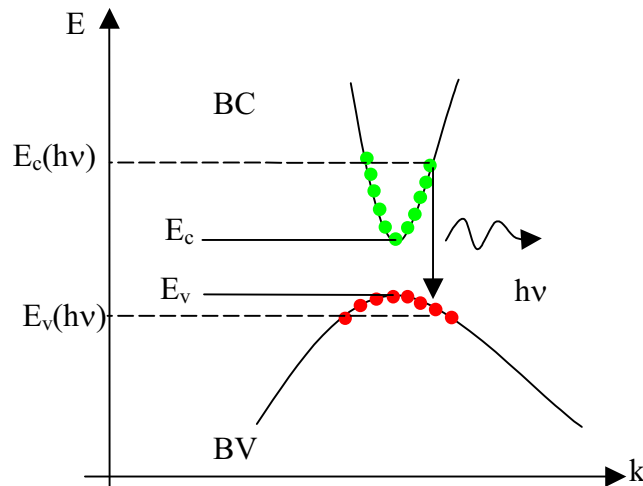


Figure 43 – Transitions optiques relatives à des recombinaisons de paires électron-trou

Le taux spectral d'émission spontanée peut alors s'écrire :

$$R_{\text{spont}}(h\nu) = K_{\text{spont}} (h\nu - E_g)^{1/2} \exp\left(-\frac{h\nu - E_g}{kT}\right) \quad \text{E II-33}$$

où K_{spont} est une constante de l'énergie des photons donnée par :

$$K_{\text{spont}} = \frac{(2m_r)^{3/2}}{\pi\hbar^2\tau_R} \exp\left(\frac{\Delta E_F - E_g}{kT}\right) \quad \text{E II-34}$$

Le terme ΔE_F représente la différence des quasi-niveaux de Fermi. Les facteurs $\exp(E_{Fc}/kT)$ et $\exp(E_{Fv}/kT)$ augmentent proportionnellement à la densité de porteur n et le taux spectral $R_{\text{spont}}(h\nu)$ est proportionnel à n^2 . Le spectre associé à l'émission spontanée est donné par la figure 44. Le maximum de l'intensité lumineuse est émis à :

$$h\nu_{\text{pic}} = E_g + kT/2 \quad \text{E II-35}$$

La largeur à mi-hauteur est donnée par :

$$\Delta h\nu = 1,8kT$$

E II-36

La figure 44 illustre cette égalité en traçant la fonction du taux spectral d'émission.

Considérant que λ_{pic} et $h\nu_{pic}$ sont reliées par $\lambda_{pic} (\mu m) = 1,24/h\nu_{pic} (eV)$, on en déduit que la largeur à mi-hauteur en longueur d'onde $\Delta\lambda$ est reliée à λ_{pic} par :

$$\Delta\lambda = 1,45\lambda_{pic}^2 kT$$

E II-37

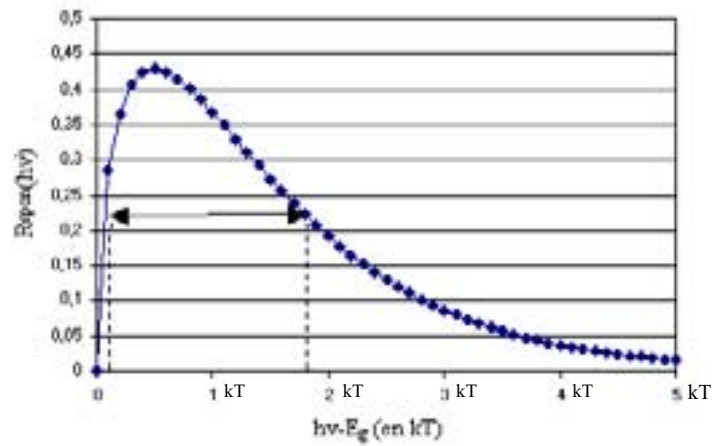


Figure 44 – Répartition spectrale du taux d'émission spontanée

La figure 45 représente les spectres d'émission pour des DELs réalisées à partir de différents composés III-V. On constate que, comme prévu par l'équation E II-37, l'émission est d'autant plus étroite en longueur d'onde que l'émission passe de l'IR à l'UV.

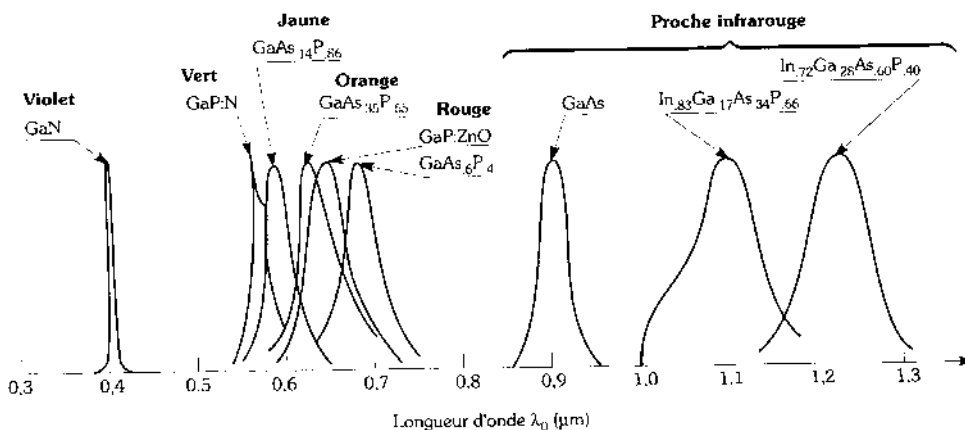


Figure 45 – Distribution spectrale d'émission des DEL obtenues à partir de différents composés III-V (d'après[11])

▪ *Emission stimulée*

L'approche développée dans le paragraphe précédent privilégie la description de l'émission spontanée. Mais les semiconducteurs peuvent être pompés suffisamment loin de leur équilibre thermodynamique pour réaliser l'inversion de population entre les électrons de la bande de conduction et les trous de la bande de valence. Il existe une condition de transparence, c'est à dire la concentration de porteurs pompés n_{transp} dans les bandes au-delà de laquelle le matériau devient transparent et se met à amplifier.

Au-delà de ce seuil de transparence, les photons d'énergie $h\nu$ vérifiant la condition : $E_g < h\nu < E_{F_c} - E_{F_v}$ (condition de **Durrafourg**) subissent alors une amplification optique. Le gain du milieu amplificateur est donné par :

$$\gamma(h\nu) = \alpha_0(\omega) [f_c(h\nu) - f_v(h\nu)] \quad \text{E II-38}$$

où α_0 représente l'absorption pour une population de la bande de conduction nulle, c'est à dire à courant nul, donnée par :

$$\alpha_0(\omega) = \frac{q^2 \chi_{vc}}{\lambda_0 \epsilon_0 \hbar n_{sc}} \left(\frac{2m_r}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{(\omega - E_g / \hbar)} \quad \text{E II-39}$$

La figure 46 représente l'inversion de population et l'amplification optique dans un milieu semiconducteur. Cette dernière illustre les formules E II-38 et E II-39 : la partie (a) représente les deux bandes d'énergie mis en jeu, la partie (b) représente les statistiques de **Fermi-Dirac** associées aux quasi-niveaux de Fermi de chaque bande et la partie (c) montre la courbe de gain du milieu (courbe noire épaisse) issue du produit de l'absorption $\alpha_0(h\nu)$ par le facteur $f_c - f_v$. Les symboles Δ et \square dénotent des énergies de photons situées de part et d'autre de la condition de **B.Durrafourg**

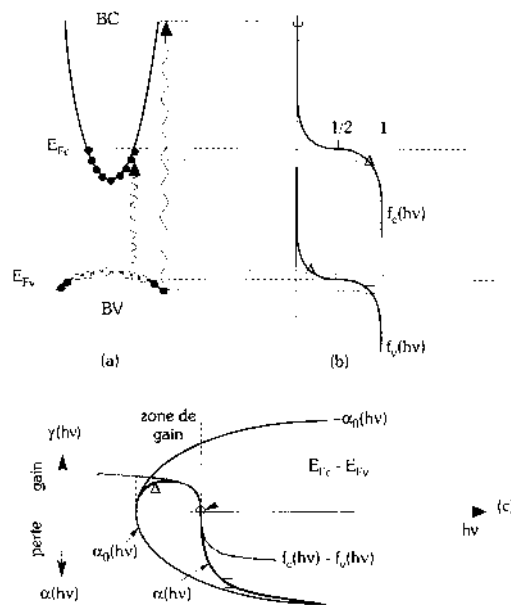


Figure 46 – Phénomène d'inversion de population et évolution du gain optique dans un milieu semiconducteur (d'après [11])

On constate que plus la densité de courant \mathbf{J} passant dans la diode est importante, plus la densité de porteurs \mathbf{n} est élevée, plus les quasi-niveaux de Fermi pénètrent dans les bandes et plus la courbe de gain est large (figure 46). Le gain maximal γ_{\max} caractérisé par le fait que les modes proches de cette valeur sont les modes susceptibles de "laser" ou produire une émission stimulée amplifiée, augmente presque linéairement avec la densité de porteurs \mathbf{n} au-dessus du seuil de transparence $\mathbf{n}_{\text{transp}}$. Une approximation de la dépendance de γ_{\max} vis-à-vis de \mathbf{n} par une fonction linéaire est généralement adoptée :

$$\gamma_{\max} = \alpha_0 \left(\frac{\mathbf{n}}{\mathbf{n}_{\text{transp}}} - 1 \right) \quad [11] \quad \text{E II-40}$$

Cette approximation fait correctement tendre le gain vers $-\alpha_0$ lorsque la population \mathbf{n} devient nulle. La figure 47 représente la variation du gain maximal en fonction de \mathbf{J} . Pour une densité \mathbf{n} comprise entre 0 et $\mathbf{n}_{\text{transp}}$, le milieu est absorbant, devient transparent au-delà de $\mathbf{n}_{\text{transp}}$ et reproduit dans la plupart des cas la dépendance de γ_{\max} vis-à-vis de \mathbf{n} au-delà de $\mathbf{n}_{\text{transp}}$.

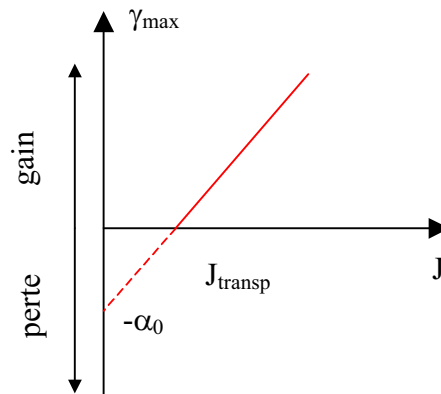


Figure 47 – Variation du gain d'une jonction semi-conductrice en fonction du courant de pompage dans un modèle d'approximation linéaire

Le gain maximal γ_{\max} est alors donné par :

$$\gamma_{\max} = \alpha_0 \left(\frac{\mathbf{J}}{\mathbf{J}_{\text{transp}}} - 1 \right) \quad \text{E II-41}$$

où le courant de transparence est donné par :

$$\mathbf{J}_{\text{transp}} = \frac{q\mathbf{d}}{\eta_i \tau_{\text{rad}}} \mathbf{n}_{\text{transp}} \quad \text{E II-42}$$

▪

▪ *Seuil d'oscillation laser*

Un milieu semiconducteur pompé électriquement au-delà du seuil de transparence, dans la zone active d'une jonction PN, amplifie les modes photoniques satisfaisant à la condition de **B.Durrafourg**. On peut alors être en présence d'oscillations lasers s'il est soumis à une contre réaction optique. Plusieurs méthodes existent pour effectuer cette oscillation. La méthode la plus simple est d'utiliser le miroir diélectrique naturel formé par l'interface entre semiconducteur et l'air. Ces miroirs sont obtenus naturellement par deux clivages qui permettent d'obtenir deux surfaces parfaitement parallèles (figure 48). L'interface semiconducteur/air fournit un miroir diélectrique dont la réflectance R_m est :

$$R_m = \frac{(n_{sc} - 1)^2}{(n_{sc} + 1)^2} \quad [11] \quad \text{E II-43}$$

avec n_{sc} indice optique du semiconducteur.

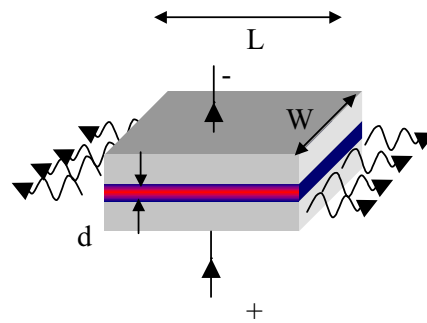


Figure 48 – Configuration d'un laser à injection à semiconducteur avec deux miroirs clivés

Les grandeurs d , L et W définissent le volume de la cavité laser. L'oscillation laser apparaît lorsque le gain du milieu amplificateur dépasse les différents mécanismes de perte du résonateur optique. On considère deux miroirs parfaitement parallèles espacés d'une distance L , représentative de la longueur de la cavité, comme l'indique la figure 49.

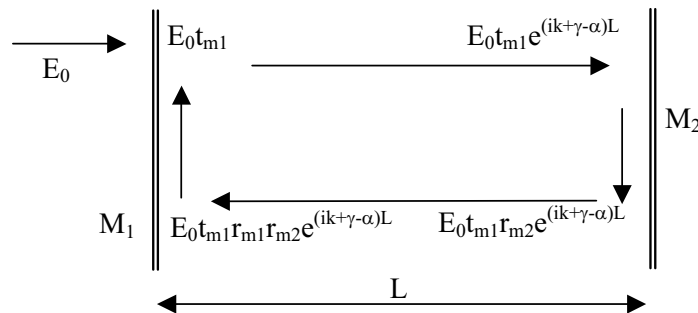


Figure 49 – Mécanismes d'établissement de l'oscillation laser dans une cavité

avec les constantes suivantes :

t_{mi}	Coefficient de transmission du miroir considéré
r_{mi}	Coefficient de réflexion du miroir considéré
γ	Gain du milieu entre les deux miroirs
α	Pertes du milieu entre les deux miroirs
E_0	Champ électrique de l'onde incidente

La sommation des champs électriques donne :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \frac{e^{i\omega t}}{1 - r_e r_s e^{(\gamma - \alpha_p)L} e^{i2kL}} \quad \text{E II-44}$$

Le champ électrique devient divergent lorsque le dénominateur s'annule permettant d'obtenir les deux conditions d'oscillation laser sur le gain et la phase.

▪ *Condition sur le gain*

Le gain du milieu doit compenser les différentes pertes de la cavité indiquées par le terme α qui sont de deux types :

- ☞ La perte intrinsèque α_m à la structure de la diode laser qui est la fuite des photons par les miroirs correspondant à la sortie laser du dispositif et décrit par :

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_{m1} R_{m2}} \quad \text{E II-45}$$

où R_{m1} et R_{m2} sont les coefficients de réflexion globaux des miroirs M_1 et M_2 . Généralement l'un des deux miroirs est totalement réflecteur afin de diminuer le courant de seuil nécessaire à l'émission laser.

- ☞ Une perte parasite α_p qui provient des porteurs libres des contacts électriques, de la diffusion sur des rugosités.

La condition de seuil d'oscillation laser est alors :

$$\gamma_{th}(\hbar\nu) = \alpha_p + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_{m1} R_{m2}} \quad [11] \quad \text{E II-46}$$

Cette dernière expression ne tient pas compte du caractère ondulatoire des photons qui doivent être aussi solution de l'équation de **Maxwell**. Dans le cas d'une double hétérostructure, les barrières de potentiel qui ont un gap supérieur à celui des puits de potentiels ont corrélativement un indice optique inférieur. Les ondes électromagnétiques sont donc piégées dans la partie d'indice supérieur c'est à dire la région amplificatrice (figure 50). On parle alors de confinement optique et électrique.

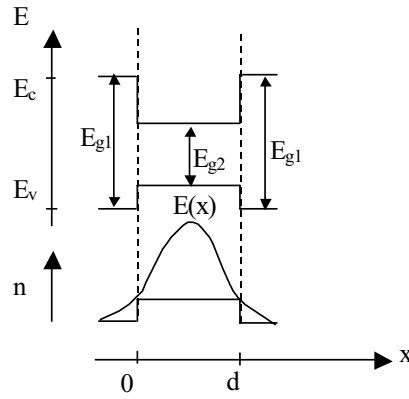


Figure 50 – Condition en énergie permettant une recombinaison électron-trou et un confinement optique dans une hétérostructure

La proportion de l'énergie effectivement présente dans la partie amplificatrice est définie par le facteur de confinement Γ :

$$\Gamma = \frac{\int_{-d}^0 |E(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E(x)|^2 dx} \quad \text{E II-47}$$

Ainsi, seule la portion Γ de l'énergie électromagnétique est soumise à l'amplification alors que l'on supposera que toutes les parties (dans la barrière et dans les puits) subissent les mêmes pertes. La condition sur le seuil d'oscillation laser s'en trouve donc affectée sous la forme :

$$\gamma_{th}(h\nu) = \frac{1}{\Gamma} \left(\alpha_p + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_{m1} R_{m2}} \right) = \frac{1}{\Gamma} (\alpha_p + \alpha_m) \quad \text{E II-48}$$

Nous pouvons donner cette équation sous la forme plus explicite pour le courant de seuil d'oscillation laser :

$$\alpha_0 \left[\frac{\eta_i \tau_{rad}}{q d n_{transp}} J_{th} - 1 \right] = \frac{1}{\Gamma} \left(\alpha_p + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_{m1} R_{m2}} \right) \quad \text{E II-49}$$

Le facteur de confinement Γ diminue avec l'épaisseur d de la zone active. Il existe un optimum pour l'épaisseur d de cette dernière qui permet de minimiser le courant de seuil. Pour cela, on réalise une hétérostructure dont les principaux apports sont de diminuer le courant de seuil laser et d'augmenter le confinement des photons par changement d'indice.

- *Condition sur la phase*

La condition sur la phase pour l'annulation du dénominateur de l'équation E II-44 est donnée par :

$$kd + \varphi = p\pi ; p=1,2,\dots \quad \text{E II-50}$$

où φ est la moyenne des déphasages induits par les miroirs. Les modes amplifiés seront donnés par :

$$v_p = p \frac{c}{2n_{op} L} ; p=1,2,\dots \quad \text{E II-51}$$

La prise en compte de ces deux conditions permet d'envisager l'étude du spectre optique d'une diode laser et de sélectionner un jeu de paramètre à suivre permettant de caractériser son comportement général en fonction de la contrainte appliquée.

- *Spectre optique d'une diode laser*

La figure 51 représente le synoptique d'une diode laser avec l'entrée représentée par l'émission spontanée. En effet, ce mécanisme physique est nécessaire pour initier l'émission de la diode laser. Par la suite l'émission spontanée est amplifiée par l'émission stimulée, elle définit la partie amplificatrice de la cavité. Enfin, l'ensemble est filtré par les miroirs de la cavité qui selon sa forme permet la sélection d'une ou de plusieurs énergies. L'ensemble est construit afin de former un oscillateur laser.

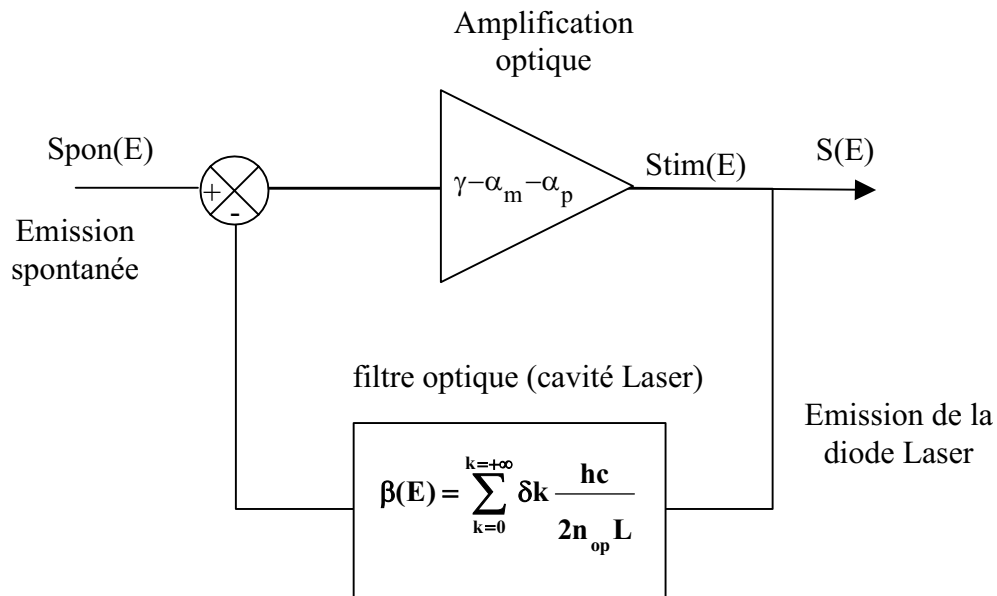


Figure 51 – Représentation schématique d'une cavité laser

Un exemple de spectre optique général d'une diode laser est donné par la figure 52c. L'émission spontanée et l'amplification par émission stimulée est représenté dans la figure 52a. La sélection des longueurs d'onde qui correspond à une cavité Fabry-Pérot est donnée par la figure 52b.

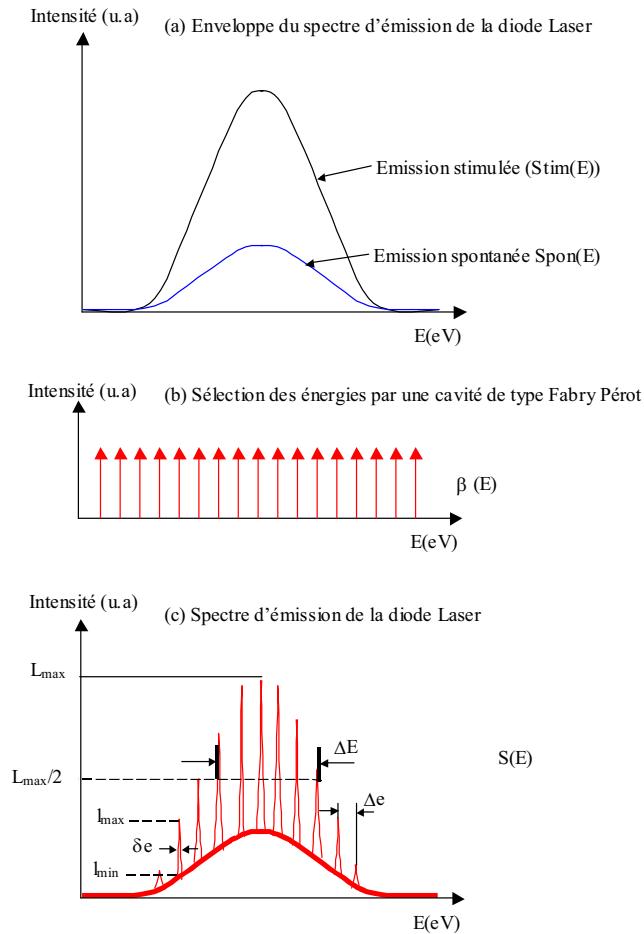


Figure 52 – Caractéristiques du spectre optique d’une diode laser

On définit trois paramètres du spectre de la diode laser : la largeur spectrale à mi-hauteur ΔE ($\Delta\lambda$), l’espacement entre modes Δe ($\Delta\lambda$) et la largeur à mi-hauteur d’un mode δe ($\delta\lambda$).

On peut remonter à la largeur de la cavité par la différence entre deux maxima successifs encore appelé espacement de modes. Comme on sait que $E = h\nu$, on remonte à la longueur de la cavité par ΔE soit :

$$\Delta\nu = \frac{c}{2n_{op}L} \Leftrightarrow L = \frac{c}{2n_{op}(\nu_{q+1} - \nu_q)} \quad \text{E II-52}$$

Un autre paramètre optique caractéristique des composants émissifs va être présenté dans la prochaine section : la puissance optique

II.2.b / Notion de puissance optique

- *Rendement interne et externe d’une DEL – Puissance optique d’une DEL*

On s’intéresse maintenant à l’énergie émise. Il s’agit de l’intégrale de l’équation exprimant le taux de recombinaison rappelée ci-après sur la structure de bande du semiconducteur. On trouve l’expression suivante (voir détail des calculs dans l’annexe A.2.2) :

$$\frac{e^{(E_{FC}-E_{FV}-E_G)/kT}}{\tau_R} \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_r}{\hbar^2} kT \right)^{3/2} \int_0^\infty u^{1/2} e^{-u} du \quad \text{E II-53}$$

$$u = \frac{h\nu - E_G}{kT}$$

La densité effective d'état a pour expression : $N_j = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_r kT}{\hbar^2} \right)^{3/2}$ en remplaçant la masse effective de conduction m_c par la masse effective réduite m_r . Nous en déduisons par calcul d'intégrale l'expression de R_{spon} que nous avons donné dans E II-33. Nous avons vu que cette grandeur prend en compte l'ensemble des recombinaisons radiatives spontanées dans le semiconducteur. Nous avons rassemblé l'ensemble des informations pour relier la puissance optique au courant injecté dans une DEL. Ce résultat n'est valable que dans le cas où les porteurs sont loin de la dégénérescence (c'est le cas d'une DEL). Dans ce cas, on peut exprimer le flux total de photons Φ émis dans le volume $V = W \times L \times d$ de la jonction :

$$\Phi = R_{\text{spon}} \frac{V}{S} = \frac{n}{\tau_{\text{rad}}} d \quad \text{E II-54}$$

On introduit alors le coefficient η_i donné par le rapport :

$$\eta_i = \frac{\tau_{\text{nrad}}}{\tau_{\text{tot}}} = \frac{1}{1 + \tau_{\text{rad}} / \tau_{\text{nrad}}} \quad \text{E II-55}$$

Ce coefficient est le rendement quantique interne. Il est représentatif du pourcentage de paires électron-trou effectivement transformé en photons lors de leurs recombinaisons. Le flux de photons émis est donné par :

$$\Phi = \eta_i \frac{J}{q} \quad \text{E II-56}$$

Cette dernière équation rend compte du rôle joué par η_i lors de la transformation du flux de porteurs J/q en flux de photons Φ . Cependant, toute la lumière émise dans la zone active n'est pas entièrement extraite du semiconducteur. Les principes de Fresnel expliquent ce phénomène représenté dans la figure 53 et commenté ci-après :

- Les rayons θ_1 (petits angles) traversent une zone semi-conductrice plus ou moins absorbante. En effet, dans le cas d'une homojonction la quantité de photons absorbés est très importante dans le volume. Seule les zones d'émission proche de la surface sont actives. Dans le cas d'une hétérostructure, le gap du matériau entourant la zone active est transparent (il n'absorbe quasiment aucun photon). Dans les deux cas, il reste la réflexion à l'interface semiconducteur/air. La portion transmise par les rayons d'incidence normale, ou rendement diélectrique η_{diel} , est donnée par l'équation de **Fresnel** :

$$\eta_{\text{diel}} = \frac{1}{n_{\text{sc}}(n_{\text{sc}} + 1)^2} \quad \text{E II-57}$$

où n_{sc} est l'indice de réfraction optique du semiconducteur.

- Les rayons θ_2 émis hors du cône défini par l'angle critique θ_c (pour le GaAs on évalue θ_c à environ 16°) sont totalement réfléchis. Si l'émission des DELs n'était régie que par ce principe, la portion de lumière transmise serait de 4%. Le phénomène de recyclage de photons explique que ce rendement serait nettement meilleur. Les photons réfléchis sont absorbés sous forme de paires électron-trou qui réémettent de la lumière en se recombinant et ainsi de suite.

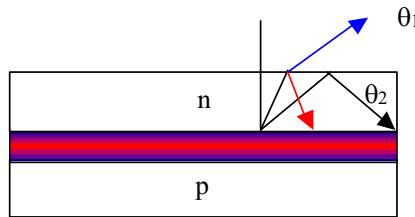


Figure 53 – Schéma de principe expliquant les deux types de réflexion dans un semiconducteur

Tous ces phénomènes permettent d'obtenir le rendement transmission η_t qui se multiplie au rendement quantique interne et montre que le flux de photons émis hors du semiconducteur diminue. La puissance de sortie P_s est alors donné par le produit du flux externe de photons par l'énergie des photons émis soit :

$$P_s = \eta_{\text{ext}} \frac{J}{q} h\nu \quad \text{E II-58}$$

où η_{ext} est le rendement quantique externe donné par le produit : $\eta_{\text{ext}} = \eta_t \eta_i$. Nous en déduisons la réponse d'une DEL en W/A comme le rapport de la puissance externe par la densité de courant :

$$\mathfrak{R} = \eta_{\text{ext}} \frac{h\nu}{q} = \eta_{\text{ext}} \frac{1,24}{\lambda_{\text{pic}}} \quad \text{E II-59}$$

- *Puissance de sortie d'une diode laser*

Nous pouvons définir trois zones de fonctionnement du laser :

- La première est de type DEL correspondant à une densité de courant inférieure au courant de transparence. L'émission spontanée est alors prépondérante et l'émission se produit dans tout l'espace.
- Lorsque la densité de courant est comprise entre le seuil de transparence et le seuil d'oscillation laser ($J_{\text{trans}} < J < J_{\text{th}}$), l'émission stimulée l'emporte sur l'émission spontanée. L'émission est directionnelle car le gain en $e^{-\gamma z}$ favorise l'émission proche de l'axe de la structure. Lorsque le maximum de la courbe de gain γ_{max} atteint la valeur de seuil γ_{th} , les modes d'ondes électromagnétiques correspondant à ce maximum sont amplifiés dans le plan

de la couche de la double hétéro jonction.

- Une fois le seuil d'oscillation dépassé $\mathbf{J} > \mathbf{J}_{th}$, la densité de porteurs est limitée à sa valeur seuil \mathbf{n}_{th} . Cette valeur correspond à la condition E II-48 d'égalité entre le gain et les pertes de la cavité. Tous les porteurs injectés dans la zone active se recombinent immédiatement sous forme d'émission stimulée, au rendement quantique η_i près. Ce rendement quantique tend vers 1 à mesure que le courant s'élève au-dessus du courant de seuil.

En négligeant les phénomènes de diffusion et en régime statique, l'équation d'évolution de la densité de porteurs permet d'obtenir la relation entre la densité de courant et les différents types de recombinaison dans un semiconducteur en incluant le phénomène d'émission stimulée, soit :

$$\frac{\mathbf{J}}{qd} = \mathbf{A}_{nr} + \mathbf{Bn}^2 + \mathbf{C}_{Aug} \mathbf{n}^3 + \mathbf{R}_{st} \mathbf{s} \quad \text{E II-60}$$

avec

\mathbf{A}_{nr}	Taux de recombinaison non-radiatif
\mathbf{B}	Coefficient de recombinaison bi-moléculaire
\mathbf{C}_{Aug}	Coefficient de recombinaison Auger
\mathbf{R}_{st}	Coefficient de recombinaison stimulée
\mathbf{s}	densité volumique de photons dans la cavité

Ces différentes définitions sont largement développées dans la littérature [18]. Au-dessus du seuil correspondant à l'émission laser de la cavité, le gain est bloqué à sa valeur seuil γ_{th} . Il en est de même pour la densité de porteurs correspondant à \mathbf{n}_{th} . L'équation E II-60 peut donc s'écrire :

$$\frac{\mathbf{J}}{qd} = \frac{\mathbf{n}_{th}}{\tau_{th}} + \mathbf{R}_{st} \mathbf{s} \quad \text{E II-61}$$

où τ_{th} est donné par :

$$\tau_{th} = \frac{1}{\mathbf{A}_{nr} + \mathbf{Bn}_{th} + \mathbf{C}_{Aug} \mathbf{n}_{th}^2} \quad \text{E II-62}$$

On introduit alors la densité de courant au seuil d'oscillation laser \mathbf{J}_{th} :

$$\mathbf{J}_{th} = \frac{qd}{\tau_{th}} \mathbf{n}_{th} \quad \text{E II-63}$$

Lorsqu'on introduit cette dernière dans l'équation E II-61 on obtient : $\mathbf{R}_{st} \mathbf{s} = (\mathbf{J} - \mathbf{J}_{th}) / qd$. Pour trouver le taux d'émission stimulée, on utilise le taux de variation de population $d\mathbf{n}/dt$ dû à la compétition entre l'absorption et l'émission stimulée donné par : $d\mathbf{n}/dt = \mathbf{c}' \gamma \mathbf{s} = \mathbf{R}_{st} \mathbf{s}$ où \mathbf{c}' est la vitesse de la lumière dans le matériau ($\mathbf{c}' = \mathbf{c} / \mathbf{n}_{op}$). Une fois le gain bloqué, le taux d'émission stimulée est donc $\mathbf{R}_{st} = \gamma_{th} \mathbf{c}'$. On obtient la densité de photons dans la cavité :

$$s = \frac{1}{q d \gamma_{th} c'} (J - J_{th}) \quad \text{E II-64}$$

On peut donc maintenant en déduire la valeur de la puissance de sortie. Elle est décrite en faisant le produit de la densité de photons s dans la cavité, par l'énergie portée par chaque photon $h\nu$, par le volume effectif du mode (Lwd/Γ) et par le taux d'échappement des photons hors de la cavité $c'\alpha_m$. On trouve donc l'expression suivante :

$$P_s = h\nu s L W \frac{d}{\Gamma} c' \alpha_m \quad \text{E II-65}$$

Compte tenu des expressions E II-48 et E II-64, on obtient finalement :

$$P_s = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_p} \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) \quad \text{E II-66}$$

où I représente l'intensité du courant $I = JLW$ soit encore :

$$P_s = \eta_{ext} \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) \quad \text{E II-67}$$

et l'expression du rendement interne est donnée par :

$$\eta_{ext} = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_p} = \eta_i \frac{\ln(1/R_m)}{\alpha_p L + \ln(1/R_m)} \quad \text{E II-68}$$

$$R_m = \sqrt{R_{m1} R_{m2}}$$

Cette partie nous permet de donner la caractéristique $P(I)$ générale d'une diode laser montrant la variation linéaire de la puissance optique en sortie des miroirs à partir du courant de seuil I_{th} (figure 54).

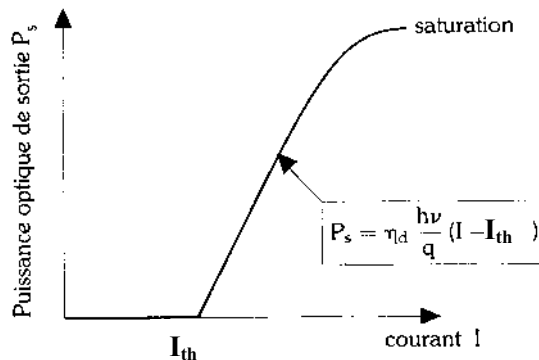


Figure 54 – Caractéristique générale $P(I)$ d'une diode laser (d'après [11])

II.2.c / Diode laser à puits quantiques

Nous ne développerons pas la théorie de ce type de diodes laser qui est longue et fastidieuse. Cependant, l'intérêt d'une telle structure réside dans la diminution du courant de seuil par confinement des porteurs. En effet, les puits quantiques sont plus étroits que les puits à double hétérostructure. Par l'adjonction de plusieurs puits quantiques, on peut augmenter le gain dans la cavité et obtenir de meilleurs rendements quantiques. De plus, on peut également augmenter la densité de courant afin de réaliser des diodes lasers de puissance. Autrement dit, un puits quantique peut accepter une certaine densité de courant maximale J_{\max} . En fabriquant une succession de puits quantiques, on peut augmenter cette valeur de densité de courant. Nous allons rappeler certains résultats qui permettent de comprendre le confinement électrique et la modification de l'émission spectrale par rapport à une DEL.

La figure 55 représente un puits quantique avec ces niveaux d'énergie discret.

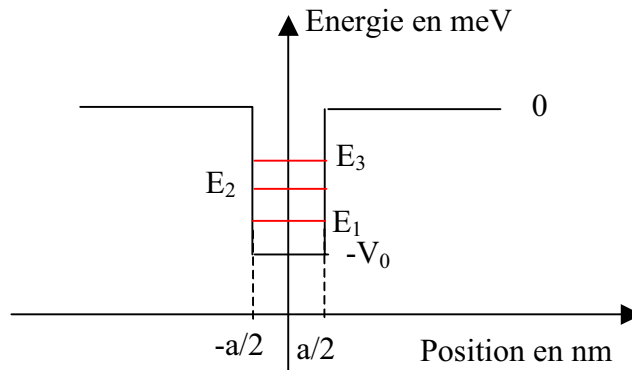


Figure 55 – Niveaux d'énergie d'un puits quantique unidimensionnel

Dans le cas d'une discrétisation des niveaux d'énergie, on observe que le nombre de ces derniers est en rapport avec la largeur et la profondeur du puits :

$$N = 1 + \text{Ent} \left[\frac{\sqrt{2m_e V_0} a}{\hbar \pi} \right] \quad \text{E II-69}$$

Le cas théorique d'un puits quantique infini permet de déterminer la valeur des différents niveaux d'énergie :

$$E_n = (n + 1)^2 \frac{\hbar^2 \pi^2}{8m_0 a^2} = (n + 1)^2 E_0 \quad \text{E II-70}$$

Dans la pratique la hauteur typique des puits quantiques est d'environ 400 meV et dépend des matériaux utilisés pour le constituer. Etant donné que l'énergie acquise par un porteur est essentiellement thermique, à 300 K (+27°C), cette dernière est d'environ 25 meV. On peut considérer que le porteur est parfaitement confiné dans ce puits quantique qui se comporte quasiment comme un puits infini. En première approximation, les états d'énergie sont ceux donnés par la relation E II-70.

Pour résumer notre approche, nous avons vu que les puits quantiques confinent les porteurs dans une région de l'espace sur une dimension. Les niveaux d'énergie que peuvent prendre les porteurs sont discrétisés (2 ou 3 en général). Nous avons développé l'aspect électronique du puits quantique,

intéressons-nous à l'aspect optique et plus particulièrement aux transitions optiques.

La figure 56 représente le schéma d'un puits quantique dans l'espace réel et l'espace des \vec{k} montrant qu'il existe trois types de transitions optiques :

- les transitions inter-bandes (1 et 3),
- les transitions croisées (4 et 5),
- les transitions intersousbandes (2).

Ces différentes transitions donnent des spectres d'émission particuliers.

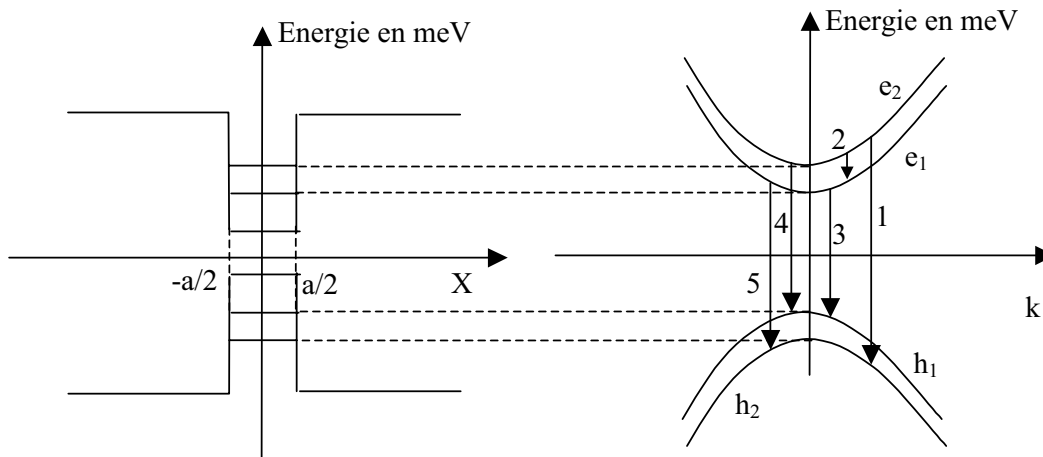


Figure 56 – Niveaux d'énergie dans les puits quantiques

Dans le cas d'un composant émissif, certaines transitions sont prépondérantes par rapport aux autres. En effet, dans le cas d'un composant excité de manière à favoriser l'inversion de population, les niveaux e_1 et e_2 sont remplis par des électrons. Les transitions intersousbandes sont quasiment inexistantes car les niveaux d'énergie sont fortement peuplés. Les transitions directes sont de loin les plus favorisées dans ce cas.

La figure 57 effectue un parallèle entre les niveaux d'énergie des bandes permises d'un puits quantique et son émission de lumière. La largeur spectrale d'émission dépend de l'injection de courant dans le composant. En effet, suivant le cas, un ou deux niveaux d'énergie peuvent être remplis. Aux faibles injections de courant, le niveau de plus basse énergie est rempli en premier. Lorsque le courant augmente, le deuxième niveau d'énergie se remplit à son tour.

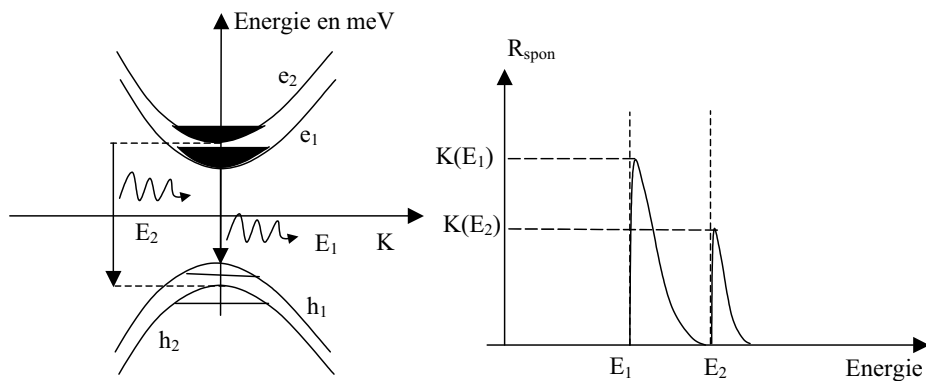


Figure 57 – Spectre d'émission d'un puits quantique à deux niveaux d'énergie

Le confinement des porteurs modifie l'évolution de $R_{\text{spont}}(\mathbf{E})$ comme l'indique l'équation E II-71 :

$$R_{\text{spont}}(\mathbf{E}) = K(E_1) \exp\left(\frac{E_g - h\nu}{kT}\right) + K(E_2) \exp\left(\frac{E_g - h\nu}{kT}\right) \quad \text{E II-71}$$

Le spectre d'émission est donc plus étroit que pour une homojonction. La caractéristique spectrale donne des informations sur la largeur du puits quantique [55]. Deux cas d'émissions spectrales de puits quantiques peuvent être considérés :

- ☞ dans le cas d'un recouvrement de spectre des émissions centrées sur E1 et E2, on dit que les puits quantiques sont couplés,
- ☞ dans le cas contraire, les puits sont découplés.

Les puits quantiques apportent aux structures d'émissions lasers quatre avantages très importants :

- ❑ Le confinement des porteurs sur un niveau d'énergie particulier implique que la condition de **B. Durrafourg** est atteinte très rapidement. Cela se traduit par une forte augmentation d'émissions stimulées.
- ❑ Le faible nombre de porteur nécessaire pour remplir les puits afin d'obtenir une émission laser implique que le courant de seuil diminue très fortement.
- ❑ Les puits quantiques confinent sur une dimension les photons près de l'axe optique. Cela se traduit par une augmentation de la sortance.
- ❑ La largeur spectrale d'émission est fortement réduite.

Il subsiste, cependant, un inconvénient se situant au niveau de la densité de courant maximale admissible par un puits quantique. En effet, la taille de ce dernier est telle que pour une faible densité de courant, le puits est complètement rempli. Au-delà de cette limite de densité de courant, l'hétérostructure entourant le puits quantique se remplit de porteurs. La conséquence directe est l'effet **Kink** qui se manifeste par l'apparition d'un pic de luminescence supplémentaire [56, 57, 58]. La puissance des diodes laser est donc limitée dans le cas d'une émission en bande étroite. Afin de franchir cette limite, on augmente la surface de la zone active contenant les puits quantiques par la technique de Ridge enterré (BRS) [22].

La théorie sur les puits quantiques est largement développée dans la littérature scientifique et en particulier par **E. Rosencher et B. Vinter** [11].

II.2.d / Synthèse des paramètres extraits des mesures optiques

Cette dernière partie rassemble dans le tableau 11 les paramètres optiques développés et mesurables par différentes méthodes d'analyses. Nous avons associé les résultats physiques qui introduisent des paramètres fondamentaux.

Paramètre	Valeur théorique		Exemples de valeurs
	DELS	lasers	
η_i : rendement interne	$\frac{1}{1 + \tau_{rad} / \tau_{nrad}}$		Proche de 1 [11]
η_{est} : rendement externe	$\eta_i \frac{4 n_{sc}}{(n_{sc} + 1)^2}$	$\eta_i \frac{\ln(1/R_m)}{\alpha_p L + \ln(1/R_m)}$	10% pour une DEL ; 35 % pour un laser [11]
\mathfrak{R} : réponse optique	$\eta_{ext} \frac{1,24}{\lambda_{pic}}$		0,1 W/A pour un DEL ; 0,33 W/A pour un laser [11]
P_s : puissance optique de sortie	$P_s = \eta_{ext} \frac{I}{q} \cdot h\nu$	$P_s = \eta_{ext} \frac{h\nu}{q} (I - I_{th})$	5 mW pour une DEL, 0,5 mW pour un laser [18]
λ_{pic} : longueur d'onde centrale	$\lambda_{pic} = \frac{hc}{E_g + kT/2}$		880 nm pour GaAs à 300 K (+27°C) [20]
$\Delta\lambda$: largeur spectrale	$1,45 \lambda_{pic}^2 kT$	La largeur spectrale d'une diode laser dépend de la zone active et du type de miroirs de la cavité.	35 nm pour une LED 935 nm.
$\Delta\lambda$: espacement de modes	Les DELs n'ayant pas de miroirs, les grandeurs $\Delta\lambda$ et L ne sont pas définies	$\Delta\lambda = \frac{c}{2n_{op} L}$	0,8 nm [19]
L : longueur de la cavité optique		$L = \frac{c}{2n_{op}(v_{q+1} - v_q)}$	500µm [11]

Tableau 11 – Tableau récapitulatif des différents paramètres optiques développés dans cette section

L'ensemble des phénomènes optiques des structures III-V prend naissance au niveau de la zone active. Nous n'avons donc pas cartographié l'origine des mécanismes physiques comme nous l'avons fait pour les caractérisations électriques.

III / MODELISATION ELECTRIQUE D'UN COMPOSANT EMISSIF

Cette partie s'attache à développer la méthodologie nécessaire pour exploiter le modèle d'un composant émissif. Cette démarche se positionne d'un point de vue équipementier en considérant que le modèle développé sera générique et représentera une structure simplifiée. En effet, nous ne nous intéressons pas à la structure précise du composant (caractéristique physique de chaque couche) mais à la structure fonctionnelle. En s'appuyant sur de nombreuses études déjà publiées, nous allons développer notre argumentation en supposant que la structure fonctionnelle comporte une zone active, des zones latérales, des zones neutres et des contacts, cette dernière étant suffisante pour la caractérisation d'un composant émissif [53, 59]. Ce procédé nous permettra d'assurer la validité de la méthode d'extraction mise au point.

Cette partie va être structurée autour de deux éléments :

- la mise en place des modèles électriques pour les DELs et les diodes laser,
- un exemple d'extraction de modèle sur des courbes expérimentales I(V).

L'ensemble du travail effectué permettra de relier les paramètres fonctionnels du composant aux zones structurales de ce dernier à travers le modèle. Le but est de simplifier les analyses de défaillance en structurant la recherche des zones dégradées avec l'architecture du modèle.

Les modèles caractérisent, de manière électrique, la structure interne des composants et non l'ensemble du système. En particulier pour des têtes optiques, nous n'avons pas d'élément modélisant l'alignement optique dans son ensemble. Nous verrons que les méthodes complémentaires d'analyses optiques permettent de palier à cette lacune. La modélisation se focalisera alors sur deux structures particulières :

- ☞ DEL émettant à 935 nm pour la détection de produit et application au code barre dont la technologie est InGaAs/GaAs.
- ☞ Diode laser pour applications de télécommunication dont la technologie est InGaAs/AlGaAs/GaAs et InGaAsP/InP associée à deux fonctions principales : les amplificateurs pour fibre optique par diode laser Ridge émettant à 980 nm et 1480 nm ; les émetteurs pour fibre optique avec diode laser enterrée BH émettant à 1310 nm pour les moyennes distances (quelques centaines de kilomètres) et à 1550 nm pour les longues distances (plusieurs milliers de kilomètres).

III.1 / Modélisation d'une DEL

Nous débutons cette partie en donnant le modèle complet d'une DEL basé sur une technologie InGaAs/GaAs couvrant la bande 850 nm–980 nm et sa structure générique. Cette introduction permettra de définir l'ensemble des éléments du modèle et de les situer au niveau de la structure.

III.1.a / Modèle complet

Le modèle complet d'une DEL peut se schématiser par la représentation de la figure 58 du modèle (a) et de la structure associée (b).

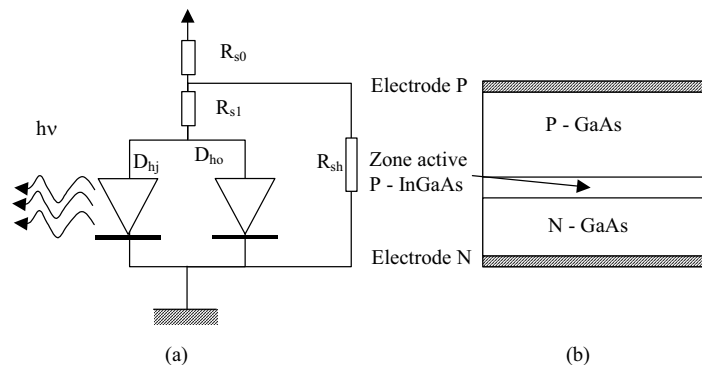


Figure 58 – Modèle électrique équivalent de la DEL

Ce modèle est architecturé autour de cinq éléments de bases :

- Une résistance de contact R_{s0} :
Cet élément est composé de différentes parties :
 - ☞ Contact métal/semiconducteur de type N

Il correspond au type de contact entre le métal et le semiconducteur. Ces derniers sont définis par l'affinité électronique χ du matériau. Pour une DEL au GaAs, les contacts N créent une barrière de potentiel à l'interface métal/semiconducteur introduite par la différence des travaux de sortie entre le métal et le semiconducteur (figure 59).

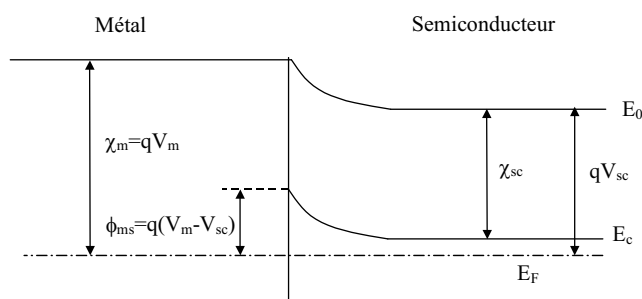


Figure 59 – Schéma de la barrière de potentiel métal/semiconducteur

On définit Φ_{ms} , la barrière de potentiel créée par la différence de niveau des travaux de sortie. La largeur de cette barrière dépend fortement du dopage et elle devient étroite lorsque le semiconducteur est fortement dopé. Le passage du courant s'effectue alors principalement par effet tunnel [60].

☞ Contact métal-semiconducteur P

Les contacts P sont, pour la plupart, des contacts dit "ohmiques". La résistance qu'il induit est négligeable devant les autres éléments résistifs. Pour le matériau InP, on utilise une couche supplémentaire P-InGaAsP formant une hétérobarrière avec P-InP. La résistance de ce type de contact a une caractéristique particulière. Par exemple, la valeur de la résistance est linéaire en fonction de $1/T$ pour des polarisations supérieures à la tension de seuil [61]. Dans ce cas particulier, la résistance induite est plus élevée que la résistance des zones neutres.

☞ Contact avec le système d'assemblage

Une part de la résistance de contact correspond à l'assemblage de la puce dans son environnement (packaging). On utilise un adhésif conducteur ou une brasure permettant d'effectuer deux fonctions principales : la distribution de l'alimentation électrique et une bonne dissipation thermique au cours du fonctionnement. Sa valeur est relativement faible (quelques mΩ).

- *Une résistance de couche d'accès R_{s1} :*
Elle est caractéristique des zones neutres semiconductrices.
- *Une diode hétérojonction D_{hj} :*
Elle caractérise la présence d'une hétérostructure ou une double hétérostructure. Pour les faibles niveaux d'injection de courant, c'est à dire la zone III (voir section II.1.b), le facteur d'idéalité vaut 2. La diode hétérojonction caractérise les phénomènes de recombinaisons dans la structure pour des faibles niveaux d'injection de courant.
- *Une diode homojonction D_{ho} :*
Elle est caractéristique du phénomène de diffusion que l'on retrouve selon deux cas différents :
 - ☞ Elle caractérise la présence d'une structure latérale homojonction. Pour les faibles niveaux d'injection de courant, le facteur d'idéalité vaut 1. La diode homojonction caractérise donc les phénomènes de diffusion dans la structure.

- ☞ Elle caractérise le phénomène de diffusion existant pour une hétérostructure à partir d'une certaine densité de courant. La condition est remplie lorsque le puits réalisé par la double hétérostructure est juste saturé. Un certain nombre de porteurs peut alors diffuser à travers la jonction.

Les deux diodes que nous venons de citer ont le même comportement dans la zone de génération-recombinaison (voir section II.1). Pour les faibles niveaux d'injection, nous pouvons considérer trois cas :

- ☞ Le facteur d'idéalité est égal à 1 : cela traduit la seule présence de la diode homojonction.
 - ☞ Le facteur d'idéalité est égal à 2 : cela traduit la seule présence de la diode hétérojonction.
 - ☞ Le facteur d'idéalité est compris entre 1 et 2 : on se trouve alors en présence des deux types diodes D_{hj} et D_{ho} en parallèle.
- *Une résistance de fuite R_{sh} :*

Cette résistance est très dépendante des matériaux constituant la DEL. Dans le cas du GaAs, les fuites de courant sont difficiles à mesurer et donc à interpréter. Pour le matériau InP, l'effet de la résistance est plus net. Les courant de fuite peuvent atteindre quelques dizaines de nA. Lorsque l'effet de la résistance de shunt est visible, sa caractéristique est souvent non-linéaire [52, 53]. Nous considérerons, alors, l'élément R_{sh} comme un dipôle électrique et non comme une résistance.

L'ensemble des éléments forme un schéma électrique équivalent à une DEL. Nous allons, à présent, donner un exemple de modélisation de DEL issu d'une mesure effectuée au Laboratoire.

III.1.b / Exemples de modèles électriques

Cet exemple permet de montrer les simplifications apportées au modèle complet d'une DEL présenté au début de la section dans la figure 58.

La simplification du modèle peut être, tout d'abord, effectuée en supposant que le courant dérivé dans la résistance de fuite R_{sh} est extrêmement faible devant le courant des deux diodes D_{hj} et D_{ho} . On peut ainsi réunir les deux résistances séries R_{s0} et R_{s1} représentées par la résistance R_s . Le schéma final est donné par la figure 60.

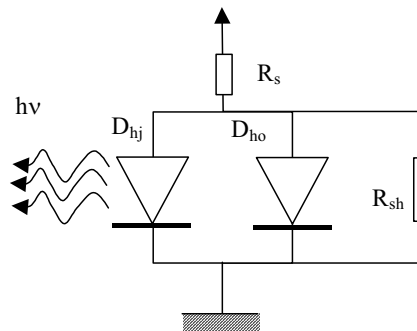


Figure 60 – Modèle équivalent d'une DEL 935 nm InGaAs/GaAs

Dans certain cas, la résistance de fuite est extrêmement élevée et il est difficile d'observer son comportement dans les très faibles niveaux d'injection. On peut alors considérer que l'effet de la résistance de fuite est négligeable et ainsi le modèle de la DEL présentée en figure 61 peut-être simplifié comme indiqué en figure 59.

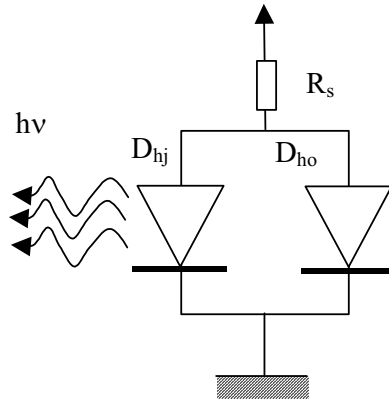


Figure 61 – Modèle équivalent d'une DEL sans résistance de shunt

Pour résumer l'ensemble des considérations de cette partie, nous avons superposé la courbe I(V) avec le schéma équivalent par zone dans la figure 62. Chaque modèle correspond à un mode de conduction qui est souligné par la coloration de l'élément dont l'effet est prépondérant.

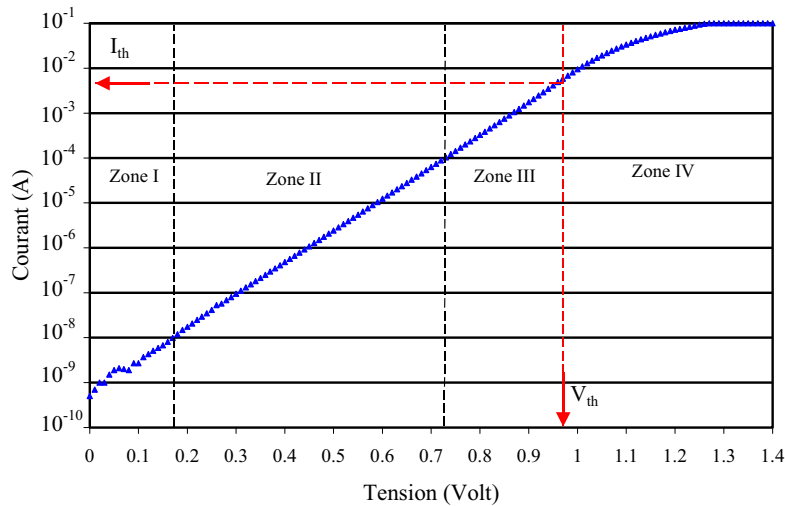
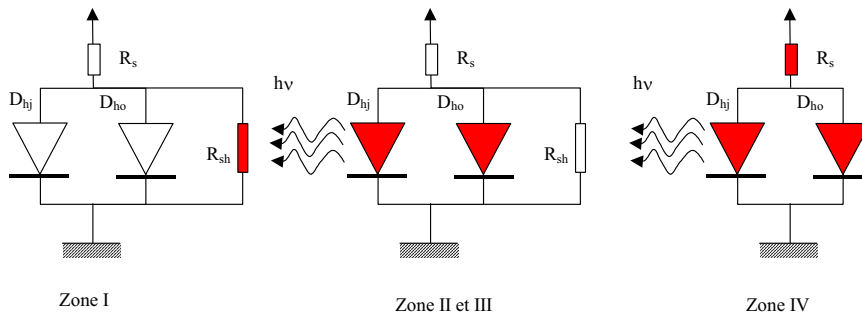


Figure 62 – Éléments prépondérants d'une DEL et caractéristique I(V)

On observe sur cette représentation que la valeur de R_{sh} est difficile à extraire. En effet, sur la zone correspondant à ce paramètre on atteint la limite inférieure du système de mesure et on ne peut extraire sa valeur. Nous la considérerons infinie, c'est à dire équivalent à un circuit ouvert en fonctionnement initial.

III.2 /Modélisation d'une diode laser

Nous débutons cette partie en donnant le modèle complet d'une diode laser basé sur une technologie InGaAsP/InP principalement utilisée pour des émissions de 1310 nm et 1550 nm, une technologie InGaAs/AlGaAs/GaAs principalement utilisée pour les amplificateur optiques à 980 nm et leur structure générique. Nous développerons deux structures différentes : les diodes laser Ridge émettant à 980 nm et les émetteurs laser émettant à 1310 ou 1550 nm. Cette introduction permettra de définir l'ensemble des éléments de chaque modèle et de les situer au niveau des différentes structures.

III.2.a / Structure "Ridge" utilisée pour l'amplification optique sur fibre optique

Cette structure particulière illustrée par la figure 63 est caractéristique des diodes laser Ridge [62, 63, 64]. Cette dernière est adaptée aux amplificateurs optiques car elle permet une émission de lumière avec une forte puissance optique. Nous présentons un parallèle entre la structure de la diode laser et le modèle électrique équivalent.

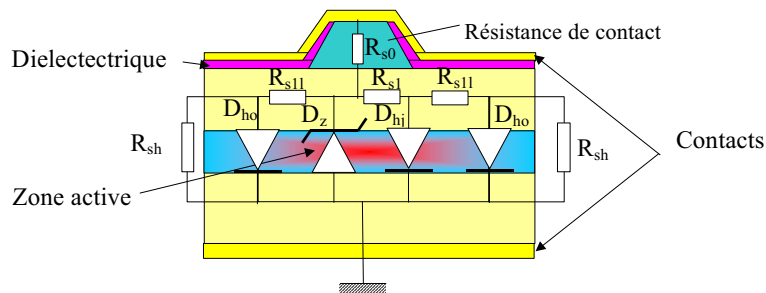


Figure 63 – Structure et modèle électrique équivalent d'une diode laser Ridge Fabry-Pérot 980 nm

- *Résistance de contact R_{s0} :*
Elle est de même nature que celle des DELs décrite dans la section précédente. En ce qui concerne la résistance induite par les hétérobarrières, deux cas possibles peuvent être envisagés. Dans le cas des diodes laser Fabry-Pérot, on parle d'une résistance d'hétérobarrière réalisée par un contact de type P-InGaAsP/P-InP au niveau du contact supérieur (voir figure 64b). En revanche les diodes laser DFB possèdent deux hétérobarrières [61].
- *Résistance de couche d'accès R_{s1} , R_{s11}*
Ce modèle caractérise la distribution de la résistance totale de couches d'accès en deux composantes R_{s1} , R_{s11} . La résistance R_{s1} correspond aux zones neutres conduisant à la zone active ; la résistance R_{s11} caractérise les zones neutres menant aux jonctions latérales.
- *Diode hétérojonction D_{hj} et diode homojonction D_{ho} :*
Elles correspondent aux mêmes définitions que pour la DEL.

Les structures actuelles des diodes lasers favorisent le phénomène de recombinaison et sont souvent représentées par une hétérojonction.

- *Une diode Zener D_z :*
Cette diode Zener n'est pas une représentation structurelle. En effet, elle représente l'effet laser, qui bloque la tension des diodes D_{hj} et D_{ho} . D'un point de vue électrique, l'utilisation d'une diode Zener pour modéliser ce phénomène est correct mais elle n'est reliée à aucune partie de la structure.
- *Une résistance de fuite R_{sh} :*
Cet élément est défini de la même manière que pour les DELs. Cependant, pour les

diodes lasers sur InP, ce phénomène est bien plus visible. On observe un courant de fuite d'environ 1 nA.

III.2.b / Structure enterrée BH utilisée pour l'émission à travers une fibre optique

Nous considérons, dans un deuxième temps, le modèle complet d'une diode laser décrit dans la Figure 64a. Ce dernier comporte l'ensemble des éléments caractéristiques de la structure de la diode laser exposée dans la figure 64b [53]. L'ensemble des éléments du modèle s'apparente à la description effectuée pour les diodes laser Ridge. Nous ne détaillerons pas les éléments du modèle.

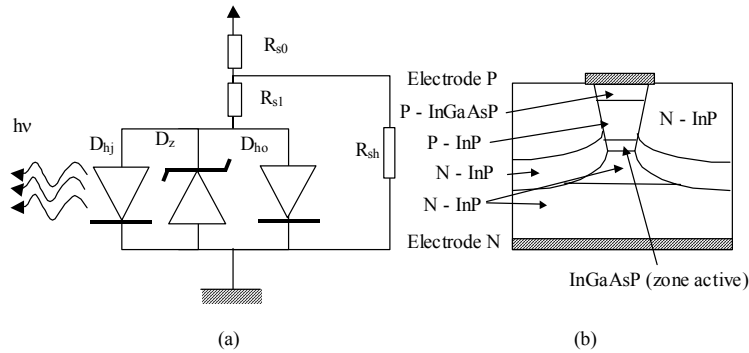


Figure 64 – Modèle complet d'une diode laser InGaAsP/InP Fabry-Pérot

Cette structure est utilisée pour les émissions laser à travers une fibre optique pour les applications aux télécommunications. Elle représente donc le type de diodes laser étudiées au Laboratoire. Pour cette raison, nous avons effectué un exemple d'extraction de modèle à partir de courbes expérimentales I(V) mesurées au Laboratoire.

III.2.c / Exemple de modèles électriques

Cet exemple permet de montrer les simplifications que nous pouvons apporter au modèle complet présenté au début de la section.

La simplification du modèle peut être, tout d'abord, effectuée en supposant que le courant dérivé dans la résistance de fuite R_{sh} est extrêmement faible devant le courant des deux diodes D_{hj} et D_{ho} . On peut ainsi réunir les deux résistances séries R_{s0} et R_{s1} représenté par la résistance R_s . Le schéma final est donné par la figure 65. La structure de la diode laser est une double hétérostructure avec confinement latéral par deux canaux (DCBH).

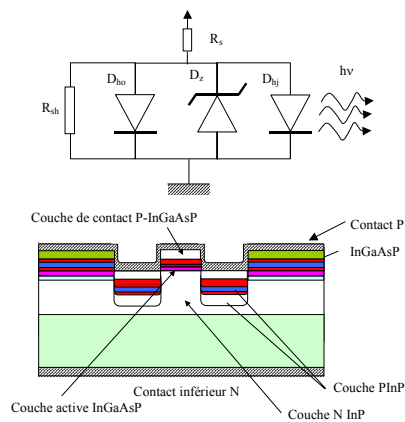


Figure 65 – Structure et modèle électrique équivalent d'une diode laser DCBH Fabry-Pérot

Au très faibles polarisations, seule la résistance de fuite R_{sh} conduit le courant. Par la suite, les diodes D_{ho} et D_{hj} conduisent. Le courant passant dans R_{sh} est donc négligeable. L'émission de la diode laser est principalement de l'émission spontanée, on dit que la diode laser fonctionne comme une DEL [19]. Ce fonctionnement perdure jusqu'au moment où le courant atteint sa valeur de seuil I_{th} . La diode Zener D_z entre en fonctionnement pour bloquer la tension des diodes D_{hj} et D_{ho} à la valeur V_{th} . La limitation du courant dans la diode laser est assurée par la résistance série R_s . Cette partie de fonctionnement correspond à l'émission stimulée de la zone active.

Pour résumer l'ensemble des considérations de cet exemple, nous avons superposé la courbe $I(V)$ avec le schéma équivalent par zone dans la figure 66. Chaque modèle correspond à un mode de conduction qui est souligné par la coloration de l'élément dont l'effet est prépondérant.

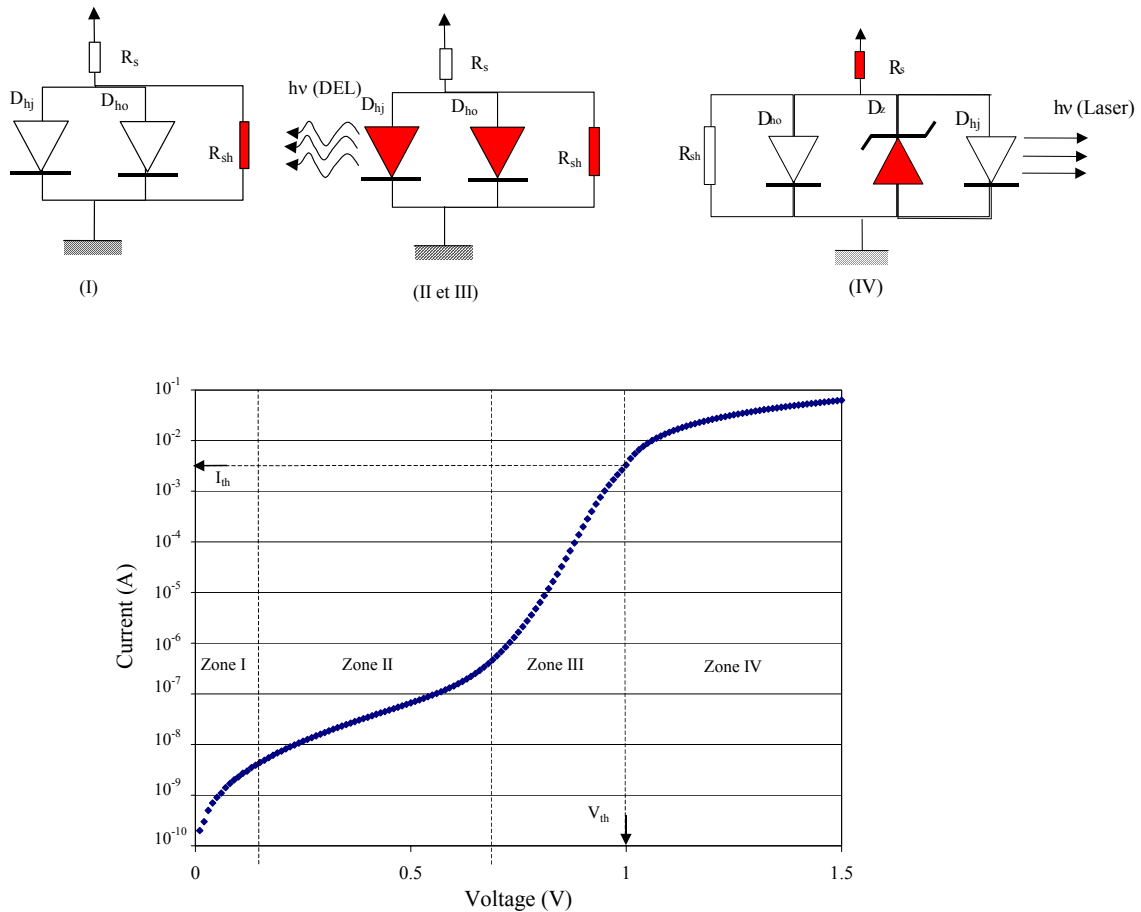


Figure 66 – Eléments prépondérants d'une diode laser Fabry-Pérot et caractéristiques $I(V)$

III.3 / Synthèse

Les modèles exposés dans cette section sont issus d'une synthèse bibliographique. La démarche utilisée pour obtenir ces modèles est celle d'un fabricant. Elle suit une règle de construction de modèle partant de la structure du composant pour révéler le modèle. Par la suite, on compare les courbes $I(V)$ théoriques et expérimentales afin de corriger éventuellement le modèle établi.

Dans notre cas, cette démarche n'est pas réalisable. En effet, nous ne connaissons pas la structure interne exacte du composant. Cependant, la structure générale de ce dernier est connue en se basant sur l'application à laquelle est attaché ce module. Par exemple, nous savons que les diodes laser utilisées pour les émetteurs appliqués aux télécommunications sont des diodes à double hétérostructure enterrée avec puits quantiques. Cette information nous permet de choisir, dans la littérature, le modèle

le plus adapté à notre étude. La détermination des différents paramètres du modèle s'effectue à partir des courbes expérimentales I(V). La précision de notre modèle est nettement plus faible que celle d'un fabricant. Cependant rappelons que nos travaux s'intéressent à des modules dont la taille moyenne peut atteindre le centimètre. La dimension maximale d'une des parties de la structure générique définies est de l'ordre du micromètre qu'il faut comparer au volume d'investigation représenté par le module. Nous allons à présent détailler le banc d'analyses électro-optiques développé au Laboratoire

IV / DESCRIPTION DU BANC D'ANALYSES ELECTRO-OPTIQUES

Nous venons d'exposer les différents modèles électriques relatifs à une DEL et une diode laser utilisant des paramètres reliés à leur structure technologique. Notre principal objectif n'est pas d'élaborer un nouveau modèle en fonction de la technologie mais de relier les variations des paramètres à des dégradations précoces et/ou au diagnostic de défauts. L'extraction de ces paramètres se fait grâce à un banc d'analyses électro-optiques mis en œuvre durant la première partie de nos travaux. La dernière partie de ce chapitre est donc consacrée à la description et à la caractérisation des performances du banc. Nous allons débiter cette partie en déterminant les critères de choix des sous-ensembles du banc.

IV.1 / Critères de choix des sous-ensembles du banc

L'ensemble des sections exposés jusqu'ici a montré les liaisons existantes entre le modèle électrique d'un composant émissif et la physique qui explique les différents fonctionnements de ce dernier. Afin de les évaluer, nous devons utiliser un système de mesure courant-tension caractérisé par :

- ❑ La mesure de la tension, considérée comme une grandeur imposée par le système de mesure. Cette dernière doit être maîtrisée sur une grande plage de valeurs afin d'effectuer des mesures sur l'ensemble des zones de fonctionnement des composants.
- ❑ Du courant, considéré comme une grandeur pertinente des composants. Comme nous voulons exploiter l'ensemble des paramètres physiques exposés jusqu'ici, il est nécessaire que cette mesure soit effective jusqu'au nA. Cette limite correspond d'une part à un matériel courant dans les Laboratoires et d'autre part permet de balayer l'ensemble des zones de fonctionnement des composants émissifs (I à IV). La répétitivité des mesures est nécessaire afin d'évaluer l'évolution des paramètres électriques des composants dus à leur dégradation. En particulier, le courant de seuil qui a été identifié comme un indicateur de défaillance dans la littérature. Cette exigence ne peut être atteinte que par une maîtrise des conditions de mesures et en particulier la répétitivité de la température. Ce premier point constitue une exigence sur la mesure courant-tension.

Afin de compléter les mesures électriques nous avons choisi de développer des systèmes de mesures optiques. Ces analyses sont, en particulier, nécessaires pour donner des informations sur le désalignement optique du système. En effet, nous avons vu que le modèle électrique ne prenait en compte qu'une faible partie de l'aspect alignement du système.

C'est ce point qui nous a motivé pour développer un banc complet d'analyses optiques. Ce dernier se compose de deux éléments :

- ❑ Mesure de puissance optique : cet élément doit mesurer des puissances optiques pour des composants émissifs infrarouges dont la bande d'émission est comprise entre 880 nm et 1800 nm. La sensibilité du système de mesure doit permettre d'observer une évolution faible de l'efficacité optique au cours des vieillissements.
- ❑ Mesure de spectre optique : cette mesure permet de donner la représentation spectrale de l'émission d'un composant. Il est possible, en particulier, de déterminer la longueur d'onde centrale nécessaire pour effectuer la mesure de puissance optique absolue. En effet, les systèmes de mesures de puissances optiques sont calibrés en longueur d'onde. D'autre part, ce système doit permettre la mesure de spectre sur une diode laser. Les raies d'émissions des diodes lasers actuelles sont inférieures au nanomètre et donne une idée de la sensibilité du système considéré.

Les composants photoniques sont très sensibles à la variation de température et notamment la valeur de la puissance optique et de la longueur d'onde centrale. Pour cela, un système de régulation de température sera nécessaire de la même manière que pour les mesures I(V).

Nous allons, à présent, développer le banc d'analyse qui a été entièrement conçu dans le cadre de nos travaux au Laboratoire. Il se présente sous la forme de trois blocs fonctionnels que nous allons décrire en donnant les principales informations sur la qualité et les performances des mesures que nous développons au Laboratoire. Trois éléments essentiels forment ce banc :

- ❑ un système d'acquisition de mesure des paramètres électriques basés sur un analyseur de semiconducteur de type HP4145,
- ❑ un système d'analyse de spectres optiques basé sur un monochromateur de 320 mm de focale à deux réseaux couvrant la bande 300 nm - 1800 nm,
- ❑ un système de mesure de la puissance optique en fonction du courant d'alimentation

Le système d'analyse est régulé en température en fonction du type de composants caractérisés :

- ❑ un cryostat à azote liquide pour les composants "nus" ou dont le volume d'encapsulation est faible,
- ❑ une enceinte spécifique en aluminium étanche intégrant un module à effet Peltier alimenté sous vide primaire pour des composants de dimension plus large.

De plus, il est adapté pour les composants ayant une consommation en courant allant jusqu'à 100 mA, de puissance 200 mW et émettant de 300 nm à 1800 nm.

Nous allons à présent détailler le banc d'analyses électro-optiques en précisant les spécifications générales de chaque élément ainsi que leur caractérisation associée.

IV.2 / Analyses courant (tension) - Performances

Les analyses courant – tension en fonction de la température nous permettent l'étude des paramètres électriques tels que :

- la résistance de shunt R_{sh} ,
- le courant de génération recombinaison I_{gr} ,
- le courant de saturation I_s ,
- le facteur d'idéalité de la diode η ,
- le courant de seuil I_{th} ,
- la tension de seuil V_{th}
- la résistance de l'ensemble du composant composée des résistances des zones neutres semiconductrice N et P et les résistances de contacts R_s .

Nous allons, à présent, développer le banc de mesure électrique nécessaire pour déterminer les différents paramètres cités ci-dessus.

IV.2.a / Schéma de principe de l'ensemble

La figure 67 présente le schéma de principe du système de mesure I(V) en température.

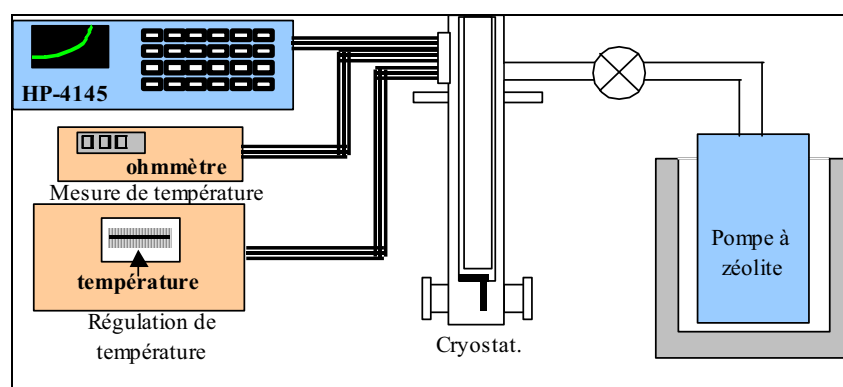


Figure 67 – Système de mesure courant-tension en température

IV.2.b / Caractéristiques techniques

Le matériel nécessaire à l'étude électrique des composants est constitué :

- D'un analyseur de semiconducteur (HP-4145 A) connecté par des bus IEEE à l'unité centrale. Ce système permet l'étude des caractéristiques I(V) des composants pour un courant variant de 1 nA à 100 mA avec une erreur relative maximale de $\pm 0,5\%$ sur le courant et une erreur relative de $\pm 0,2\%$ sur la tension pour une variation de 0 à 20 V, correspondant à la tension maximale délivrée par le générateur intégré du HP 4145 A.
- D'un cryostat traditionnel, à double enveloppe, permettant de faire varier la température du composant de 77 K (-196°C) à 473 K (+200°C) avec une erreur de température maximale de 0,3 K correspondant à la précision de la sonde platine PT100. Il est composé d'une chambre à vide pour éviter la perturbation de l'air et de l'humidité au contact du composant à diverses

températures, de résistances chauffantes permettant l'augmentation de la température au-dessus de 77 K (-196°C) et d'une chambre permettant de contenir l'azote liquide. Nous utiliserons ce système pour des températures allant de 77 K (-196°C) à 398 K (+125°C). L'erreur relative sur la température est évaluée à $\pm 0.4\%$.

Les matériaux séparant la tête du cryostat et le composant testé sont de très bons conducteurs thermiques (cuivre / laque d'argent / feuille de mica très fine) mais ils présentent une résistance thermique non nulle. On évalue un offset de température à 3 K entre la tête du cryostat et la puce située dans son boîtier. Afin de simplifier l'étude, nous considérerons les températures de consigne comme exactes.

- D'une unité de contrôle de température utilisée pour contrôler les variations de température lors des mesures I(V). Elle commande les résistances chauffantes afin de réguler les températures supérieures à 77 K (-196°C). Le contrôle de température a une résolution de 0,1 K. L'erreur relative sur la température est la même que celle du cryostat car la commande est réglée sur la sonde PT100 du cryostat.

Le cryostat est prévu pour des composants de volume relativement faible et la caractérisation de têtes optiques intégrées n'est donc pas possible. Nous avons donc conçu un cryostat spécifique permettant l'étude de système ayant une surface plus importante (900mm^2). La figure 68 détaille le plan du cryostat fabriqué au Laboratoire. Il comprend plusieurs parties :

- une chambre en aluminium AU4G usinée afin de réaliser un parallélépipède rectangle creux de $150\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ nécessaire aux diverses manipulations et branchements effectués et étanche à l'air afin d'effectuer un vide primaire (10^{-2} Torr),
- un module PELTIER (surface active 900 mm^2) permettant la variation de température de 233 K (-40°C) à 358 K (+85°C), gamme de températures donnée par le constructeur,
- un couvercle en cuivre avec circulation d'eau afin de garder la surface de référence du module thermoélectrique (Peltier) à 290 K (+17°C),
- une connexion optique afin de réaliser les mesures optiques dans la gamme de température citée ci-dessus
- des connexions électriques afin de réaliser des mesures I(V).

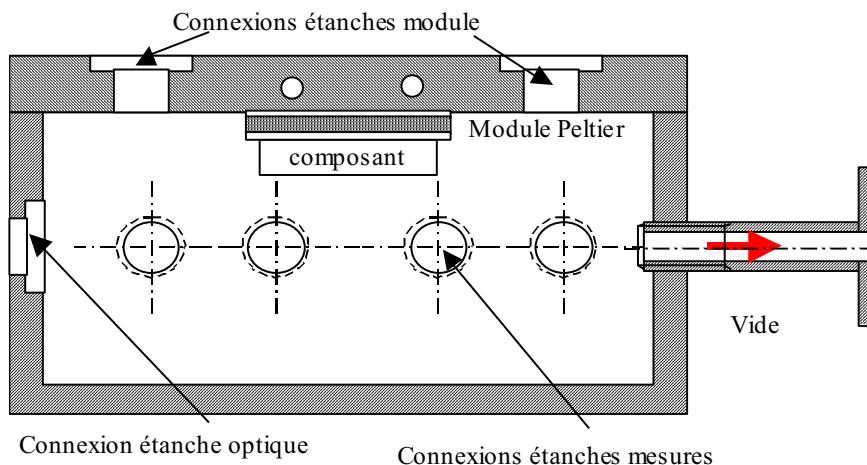


Figure 68 – Cryostat adapté aux têtes optiques intégrées (vue de face en coupe axiale)

Une alimentation laser permet d'effectuer la régulation en température et en courant de la diode laser et les caractéristiques associées sont les suivantes :

- L'alimentation laser comporte un générateur de courant régulé. La régulation est possible de 0 à 1 A par pas minimum de 100 μ A. L'erreur relative sur le courant d'alimentation du laser est de $\pm 0,1$ %.
- La résolution en température est de 0,5 K pour un réglage avec une sonde platine PT100 et de 0,1 K pour une sonde AD590. Pour des raisons de stabilité de température et de mise en œuvre, nous avons privilégié la solution avec la sonde platine PT100. Le dispositif à un décalage en température de 3K que nous avons déterminé avec un dispositif à double sonde platine de même précision. Le décalage a été pris en compte et n'apparaîtra pas dans nos résultats pour faciliter la lecture et l'interprétation. L'erreur relative sur la température est de $\pm 0,2$ % correspondant à la précision de la sonde platine.

La figure 69 représente les caractéristiques I(V-T) d'une DEL InGaAs/GaAs émettant à 935 nm. Ces caractéristiques mettent en lumière l'influence de la température démontrée dans la partie II et la diminution des courants de fuite à basse température.

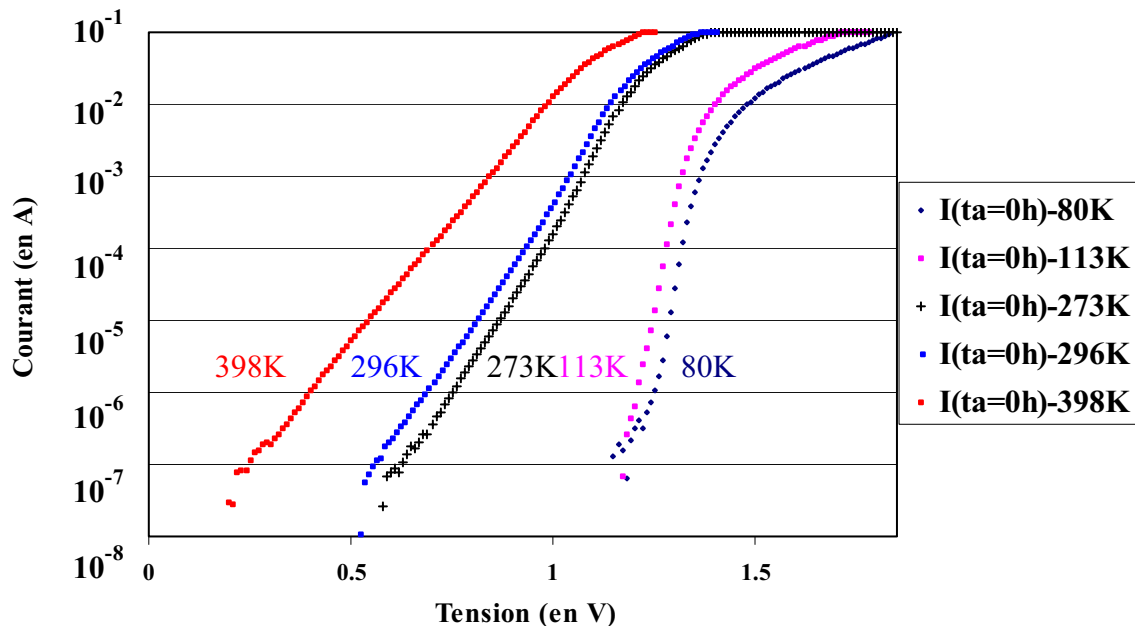


Figure 69 – Caractéristiques courant – tension en fonction de la température d'une DEL InGaAs/GaAs 935 nm

La répétitivité des mesures sur un composant de référence est très satisfaisante puisque la dérive des paramètres électriques est inférieure à $\pm 0,5$ % maximum.

IV.3 / Analyse du spectre optique - Performances

Nous avons montré que les analyses optiques permettent de déterminer les paramètres fonctionnels mais également les paramètres technologiques des composants optoélectroniques. Nous limiterons notre étude au spectre optique en relevant la longueur d'onde centrale λ_{pic} et la largeur spectrale à mi-hauteur $\Delta\lambda$ pour les DELs. Concernant les diodes laser, les spectres optiques sont porteurs d'informations supplémentaires. Nous mesurerons les espacements de modes $\Delta\lambda$, la largeur d'un mode à mi-hauteur $\delta\lambda$ et la largeur de la bande spectrale $\Delta\lambda$. Nous tenterons de relier les analyses électriques et optiques afin d'évaluer le comportement du composant en fonction de la durée de vieillissement.

IV.3.a / Schéma de principe de l'ensemble

La figure 70 présente le synoptique du banc d'analyse de spectres optiques. L'ensemble est monté sur une table optique sur coussin d'air permettant d'isoler le montage des vibrations extérieures.

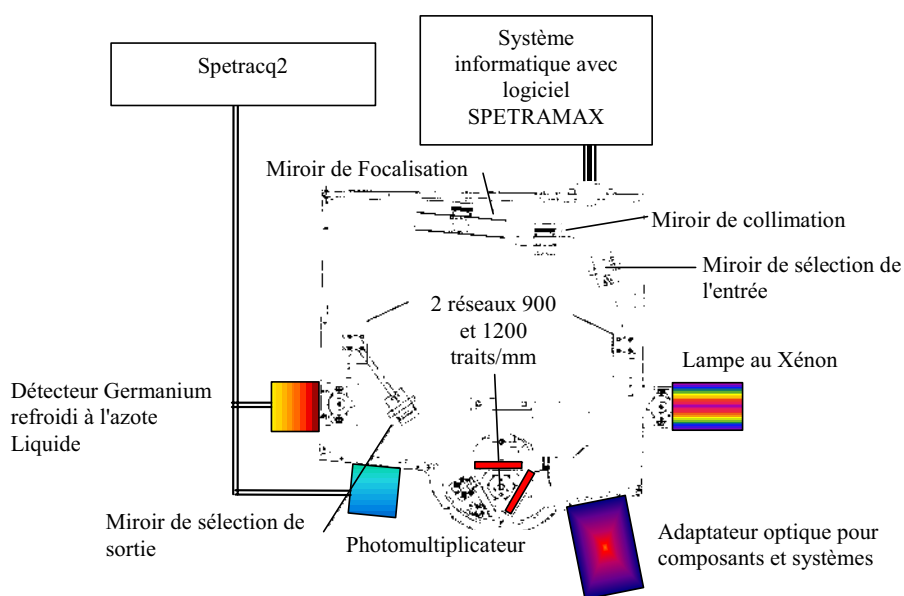


Figure 70 – Représentation schématique du système de mesure de spectres optiques

IV.3.b / Caractéristiques techniques

Le système d'analyse de spectre optique se compose de :

- D'un monochromateur TRIAX 320 comportant deux entrées et deux sorties, un miroir de focalisation, un miroir de collimation, un miroir d'entrée, un miroir de sortie, deux réseaux couvrant la gamme 300 nm - 1800 nm – réseau 1200 traits par mm couvrant la gamme 300nm – 1000 nm avec une résolution de 1 Å et un réseau 900 traits par mm couvrant la gamme 900 – 1800 nm avec une résolution de 0,1 Å. Le TRIAX 320 est un monochromateur à fentes entrées et sorties automatique 10 µm à 2 mm pilotées par carte IEEE avec une focale de 320 mm et une résolution de 1 Å. L'erreur relative sur la longueur d'onde est de $\pm 10^{-3}$ %.
- D'un système d'acquisition de mesure SPECTRACQ2 permettant la conversion des données pour une analyse informatique par liaisons série, situé entre les détecteurs et l'ordinateur. La liaison n'est pas simultanée.
- D'un détecteur Germanium couvrant la gamme 800 nm - 1800 nm utilisé pour l'infrarouge et

relié par câble blindé au SPECTRACQ2.

- D'un photomultiplicateur et son alimentation haute tension couvrant la gamme 300 nm – 800 nm utilisé pour les composants à base de nitrure dont l'alimentation est pilotée par le SPECTRACQ2 et relié à ce dernier par un câble coaxial afin de transférer les données.

Les mesures de spectres optiques se font à température ambiante pour tous les composants sauf pour les diodes laser où nous contrôlerons la température à l'aide d'un module thermoélectrique (Peltier). Les composants sont montés sur un adaptateur. L'erreur sur l'amplitude du spectre est résolue par une mesure systématique d'un composant de référence qui ne vieillit pas. Cette mesure est effectuée pour chaque composant et après chaque temps de vieillissement.

La figure 71 représente un spectre optique mesuré avec un pas de 0,1 Å. Nous observons les largeurs des pics $\delta\lambda$ sont d'environ 0,18 nm, l'espacement entre deux pics $\Delta\lambda$ consécutifs est constant et vaut 0,8 nm et la bande spectrale $\Delta\Lambda$ de la diode laser est d'environ 10 nm. L'espacement entre deux modes (ou deux pics) permet de remonter à la longueur L de la cavité optique proche de 360 μm (voir partie II.2.a).

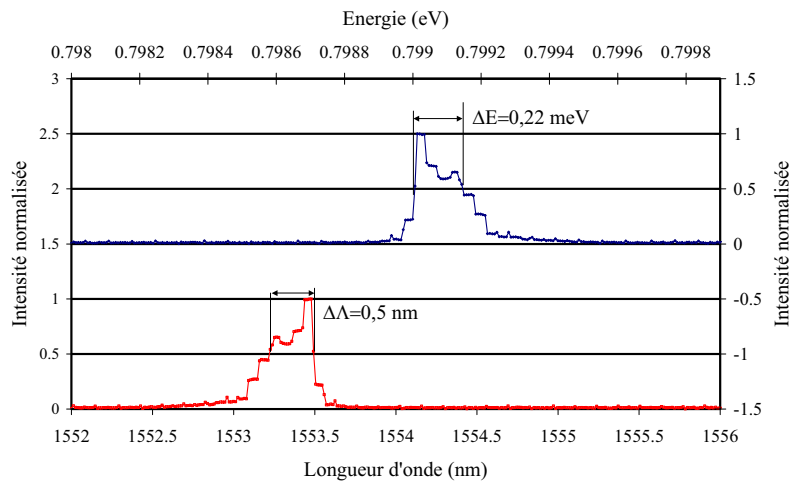


Figure 71 – Spectre optique d'une diode laser DFB InGaAsP/ InP 1550 nm

Une évaluation de la répétitivité sur plus de 100 mesures a été effectuée pour évaluer la dérive du spectre optique de la diode laser. On note un déplacement maximal de l'enveloppe du spectre de $\pm 0,1$ Å.

Les deux grandeurs $\Delta\lambda$ et $\Delta\Lambda$ sont caractéristiques de la zone active du composant. Leur modification est uniquement reliée à une dégradation de la zone active (puits quantiques et hétérostructure).

IV.4 / Principes d'analyses de la puissance optique - Performances

La puissance optique est une grandeur physique clé dans l'étude des émetteurs sur semiconducteur. Elle est reliée directement à l'utilisation du composant ou du système. Les variations observées peuvent indiquer de défaillance sur la sortie optique du système (pertes de couplage optique, variation de l'efficacité optique...). On peut remonter au rendement du système (puissance optique / puissance électrique) ou bien à une valeur proportionnelle à la surface du spectre optique. L'étude des systèmes peut porter aussi bien sur le composant que sur les structures complexes. Cet aspect est confirmé par les travaux de A.M.Ojeda [65].

IV.4.a / Schéma de principe de l'ensemble

La figure 72 présente le système de mesure de puissance optique.

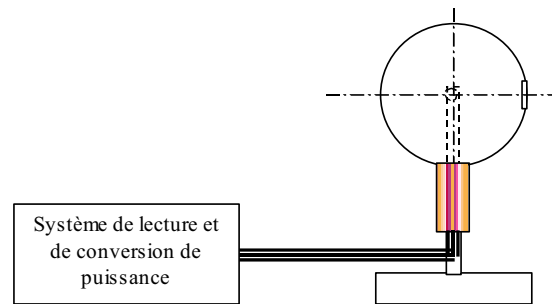


Figure 72 – Système de mesure de puissance optique

IV.4.b / Caractéristiques techniques

Le système d'analyse de puissance optique se compose de :

- d'une sphère d'intégration SPECTRALONG permettant l'étude de système émettant entre 300 nm et 1800 nm,
- d'un détecteur SDL (Short Detector Light) utilisé pour les longueurs d'onde allant de 300 nm à 940 nm,
- d'un détecteur GDL (Great Detector Light) utilisé pour les longueurs d'onde allant de 940 nm à 1800 nm,
- d'un système de mesure de courant permettant, par l'intermédiaire d'un tableau de conversion, de mesurer la puissance optique. Ce système est calibré de 300 nm à 1800 nm tous les 10 nm.

Les études de puissance optique se font à température ambiante pour tous les composants sauf pour les lasers où nous contrôlerons la température à l'aide d'un module Peletier. Le système a été réglé par le fournisseur. L'erreur relative sur le flux de photons pour des longueurs d'onde comprises entre 900 nm et 1500 nm est de $\pm 2,8\%$.

La figure 73 représente la puissance optique d'une diode électroluminescente en fonction de I .

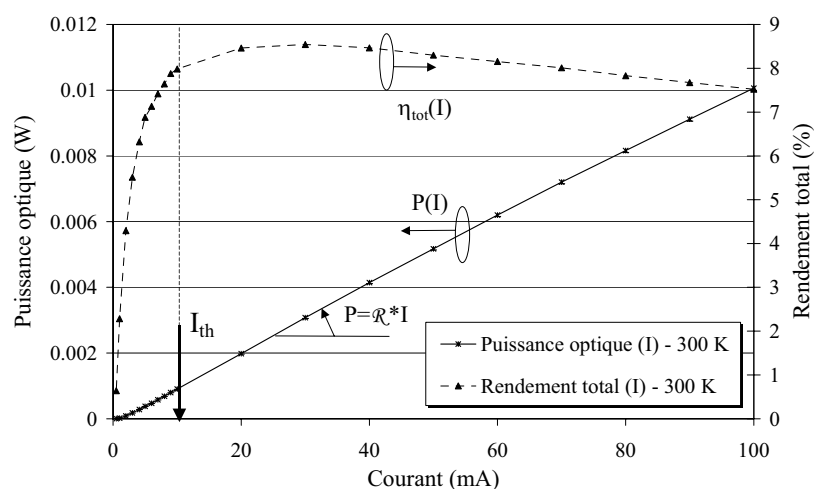


Figure 73 – Représentation de la puissance optique en fonction du courant

La répétitivité des mesures de puissance optique sur un composant de référence est très satisfaisante puisque l'on note des dérives de l'efficacité optique inférieure à $\pm 0,5$ % maximum.

V / CONCLUSION

Dans ce chapitre, les principaux résultats des mécanismes physiques mis en jeu dans un composant photonique émissif ont été rappelés, de manière à mettre en lumière les paramètres fonctionnels électriques et optiques pertinents et leurs grandeurs typiques associées caractérisant une technologie. Ces paramètres ont été utilisés afin d'exploiter un circuit équivalent retenu à partir d'une synthèse bibliographique approfondie en fonction des technologies étudiées InGaAs/GaAs et InGaAsP/InP.

Une étude de l'ordre de grandeur de la dérive des paramètres à extraire en fonction de tests accélérés a permis de dimensionner les moyens de mesure appropriés. Un banc de test spécifique a donc été développé pour réaliser des mesures électriques et optiques dépendantes de la température. Les performances du banc, en tenant compte de l'effet de "tracking" (2.10^{-4} eV/K pour la longueur d'onde centrale d'une diode laser), ont été caractérisées :

- ☞ en sensibilité ($\pm 0,5\%$),
- ☞ en reproductibilité ($\pm 0,5\%$).

L'objectif majeur de ce banc va permettre de construire une méthodologie globale pour effectuer une étude de défaillances de composants photoniques émissifs soumis à des vieillissements accélérés par l'intermédiaire :

- d'une mesure d'un jeu de paramètres pour lesquels un critère de défaillance sera défini,
- d'une localisation de la zone de défaillances et du mécanisme de dégradation associé à partir du modèle électrique retenu,
- d'une dissociation de défauts reliés au composant et à l'assemblage de la tête optique par une approche de type "signatures de défaillance"

L'intérêt de ce banc est également renforcé par le caractère non destructif des mesures effectuées comparativement aux analyses physico-chimiques ne garantissant pas une fiabilité absolue d'investigation. L'utilisation conjointe de ce banc et de la méthodologie associée va être mise en oeuvre dans le chapitre III pour l'extraction de signatures de défaillance de DELs InGaAs/GaAs 935 nm et de têtes optiques InGaAsP/InP 1310 nm après vieillissements accélérés.

Chapitre III - Mise en évidence de signatures de défaillance de systèmes optoélectroniques émissifs

I / INTRODUCTION

Le chapitre II s'est attaché à exposer les briques technologiques de base des composants optoélectroniques pour des applications de télécommunication et les moyens associés de caractérisations électro-optiques. En particulier, nous avons présenté les méthodes d'extraction du schéma électrique équivalent de composants photoniques basées sur une technologie InGaAsP/InP et InGaAs/GaAs. Les analyses électriques ont permis de démontrer la richesse des informations apportées et l'intérêt fondamental pour le diagnostic de défaillances de composants, souvent isolés de leur environnement, au travers de nombreuses études [19, 59].

L'accroissement de l'intégration des fonctions électroniques et optiques dans un même boîtier parallèlement à la forte progression en débit rendent nécessaire la mise en place de méthodologies appropriées, basées sur des mesures de plus en plus simplifiées, pour l'évaluation des défaillances rendue complexe pour un équipementier. De plus, l'utilisation croissante de têtes optiques ou modules intégrés, devant fonctionner dans des conditions opérationnelles de température de plus en plus sévères (-40°C/+85°C), implique de prendre en compte le composant dans son ensemble en tenant compte des interactions avec l'assemblage et/ou l'encapsulation, fréquemment à l'origine des défaillances.

Le chapitre III va permettre de mettre en évidence l'étendue des possibilités du banc d'analyse, développé au Laboratoire IXL, tant au niveau des performances en vue de la caractérisation fine des technologies étudiées, qu'au niveau des interprétations, pour l'analyses de défaillance.

Notre travail suivra la méthodologie suivante :

- analyser le profil de mission afin de déterminer les niveaux de contrainte de vieillissement adaptés,
- procéder à une analyse technologique des assemblages étudiés réalisée par microscopie électronique à balayage (MEB) et l'émission de rayons X par dispersion d'énergie (EDX) pour une connaissance de l'architecture du composant,
- caractériser le système optoélectronique émissif afin d'obtenir le modèle équivalent en s'appuyant sur les modèles relatifs à des technologies InGaAs/GaAs et InGaAsP/InP,
- exposer les résultats expérimentaux en se focalisant sur la variation des paramètres retenus en fonction du temps de vieillissement et relier la variation des paramètres électriques au mécanisme et à la localisation de la dégradation.

L'objectif est de mettre en évidence des signatures de défaillance précoces affectant le composant ou la perte de l'alignement optique en combinant l'ensemble des analyses électro-optiques et la connaissance des mécanismes de dégradation déjà mis en évidence par les nombreuses études menées sur des composants, souvent "nus", proches des technologies étudiées.

Ces travaux portent sur deux types de composant : des diodes électroluminescentes (DELs) 935 nm et des têtes optiques Fabry-Pérot 1310 nm.

Cet ensemble d'objectifs permettra de caractériser les performances du banc ainsi que ses limites. Nous déterminerons, en particulier, la capacité du banc à répondre à un besoin d'équipementier et/ou d'un fabricant. Le faible nombre de composants testés et le contexte de l'étude permettent plus une évaluation du potentiel d'analyses de défaillance qu'une analyse de fiabilité. Néanmoins avec ce travail, nous posons les bases d'une méthodologie pour l'estimation de la durée de vie d'un système à partir d'un plus grand nombre d'échantillons et d'un jeu de paramètres fonctionnels facilement exploitables.

II / CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES ET PROFILS DE MISSION

Les profils de mission sont déterminés par le constructeur et dépendants des caractéristiques du système. Suivant les conditions extérieures et son utilisation, on peut déterminer un certain nombre de contraintes différentes qui s'appliquent au système de manière simultanée ou non. Ces dernières sont, dans le cadre de notre étude, des contraintes extérieures. Après une étude des profils de mission des systèmes optoélectroniques émissifs IR, il ressort que la température et le courant d'alimentation sont les deux contraintes extérieures les plus critiques [6, 19]. Cette partie va présenter les dispositifs des systèmes utilisés pour réaliser ces contraintes de manière à s'approcher des caractéristiques des profils de mission réels.

II.1 / Cycles thermiques

La grandeur physique que nous faisons évoluer est la température. Un cycle thermique est conditionné par la pente de montée et de descente en température ainsi que les paliers de température d'après la norme IEC-68-2-14. La figure 74 représente les caractéristiques associées à un cycle thermique typique qui a été programmé sur une étuve de type SECASI SIRPAC. Nous avons programmé des cycles thermiques symétriques, c'est à dire ayant une pente de montée et de descente en température identique. Les caractéristiques de l'étuve permettent une pente maximale de 5 K par minute pour une rampe de température. Les températures extrêmes sont de 213 K (-60°C) et 433 K (+160°C). La température de l'enceinte est mesurée par une sonde platine dont la précision est de $\pm 0,3$ K à $\pm 0,5$ K.

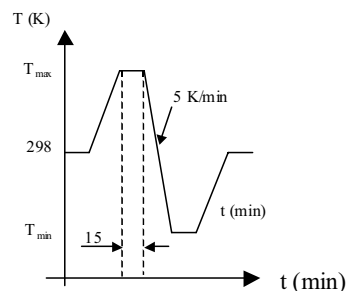


Figure 74 – Représentation d'un cycle thermique

II.2 / Stockage thermique

Les étuves de type **Heraeus Instruments** permettent d'effectuer des paliers de température sur une durée programmable (UT6P) ou non (UT6) en suivant la norme Bellcore 000468 section 4-18. La température est toujours supérieure à la température ambiante pour atteindre un maximum de 523 K (+250°C). Les variations de température que nous avons mesurées sont de ± 1 K au maximum par rapport à la consigne de 398 K (+125°C). Ces tests ont été réalisés sur 1500 heures de fonctionnement avec des mesures de température effectuées par une sonde platine PT100 dont la précision absolue en

température est de 0,3 K.

II.3 / Alimentation du composant par courant continu

La dernière contrainte imposée est le courant d'alimentation débité dans les composants. Cette manipulation n'a été réalisable que pour les DELs car les têtes optiques, avec une diode laser, nécessitent une régulation de courant beaucoup plus fine. Nous avons utilisé une alimentation stabilisée en tension et en courant : (3,5 V/(1A à 1,5 A) – pour 10 composants consommant 100 mA à 150 mA chacun) avec une résistance de $10\Omega/0,5\text{ W}$ et un potentiomètre $1\text{ k}\Omega/0,5\text{ W}/10$ tours de réglage du courant en série par ligne d'alimentation. La figure 75 représente le schéma électrique du système d'alimentation en courant des DELs. La précision du courant d'alimentation a été évaluée à $\pm 2\%$ sur 1500 heures de fonctionnement.

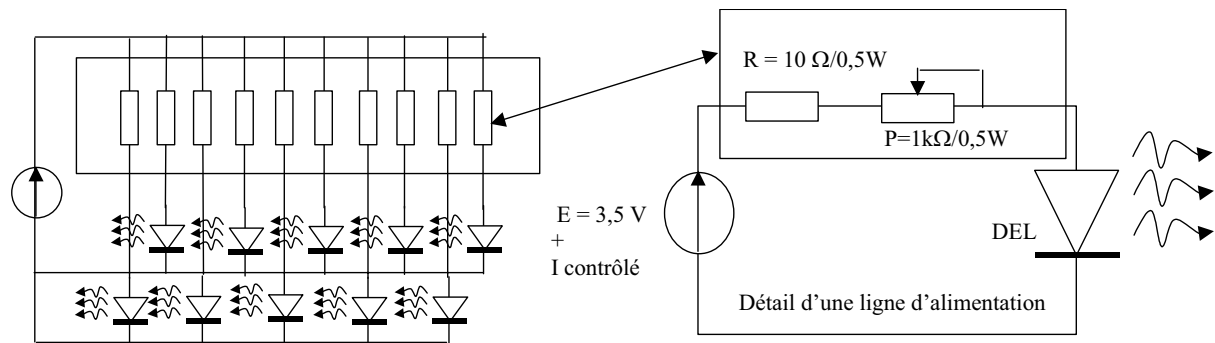


Figure 75 – Représentation du pseudo générateur de courant alimentant une DEL

Les contraintes de température et de courant peuvent être couplées afin de réaliser les conditions extérieures très proches des profils de mission. En utilisant le banc d'analyses électro-optiques, caractérisé au chapitre II, nous avons observé l'évolution des paramètres des composants en fonction des contraintes environnementales et du temps de vieillissement. Les parties suivantes détaillent les différentes campagnes de vieillissement élaborées pour les DELs et les têtes optiques. Le type de vieillissement imposé dépend du type de composant et des mécanismes de dégradation générés avec comme objectif principal : l'interaction entre le composant et l'assemblage après des tests accélérés.

III / ANALYSES DES VIEILLISSEMENTS DE DELs

Les caractéristiques principales de ces dernières correspondent à une émission de lumière de longueur d'onde centrale 935 nm ($T=300\text{ K}/+27^\circ\text{C}$) et une puissance optique minimale de 4,8 mW (valeurs typiques du fabricant). Les autres caractéristiques données par le constructeur seront développées ultérieurement. Ces composants sont réalisés à l'aide d'un boîtier TO46 avec une sortie optique par lentille. Les mesures $I(V, T)$ ont été effectuées pour une gamme de température s'étendant de 77 K (-196°C) à 398 K ($+125^\circ\text{C}$) et les mesures optiques à 300 K ($+27^\circ\text{C}$) afin de caractériser les DELs. Notre travail s'est concentré sur l'extraction de leurs paramètres.

Cette partie a un triple objectif :

- ❑ déterminer le type de vieillissement le plus critique induisant la perte de puissance optique la plus importante, en respectant ses profils de missions,
- ❑ définir les zones de dégradations au sein de la puce,
- ❑ évaluer l'impact de la contrainte environnementale expliquant les dégradations.

III.1 / Déroulement de la campagne de vieillissement

Cette partie permet de déterminer le déroulement de la campagne de vieillissement sur les DELs 935 nm. Elle est constituée de deux parties :

- la détermination des paramètres fonctionnels,
- la présentation du déroulement de la campagne de vieillissement.

Pour étudier ces composants, nous avons utilisé un lot composé de 100 DELs soumises à des vieillissements de nature différente.

III.1.a / Profils de mission - Paramètres fonctionnels

Les transferts de données par voies aériennes et la détection de présence de produits sont les applications typiques de ces composants. Les conditions extérieures peuvent être sévères, c'est à dire qu'elles peuvent atteindre des températures extrêmes de 218 K (-55°C) et de 398 K (+125°C). Les profils de mission définis par le fabricant et les caractéristiques typiques de la DEL sont présentés dans le tableau 12.

Paramètres du fabricant	Valeurs typiques à 300 K (+27°C)
P_{opt} : Puissance optique	$P_{min}=4,8$ mW, $V = 1,47$ V ($I = 100$ mA)
T_{utile} : Température d'utilisation	218 K à 398 K (-55°C à +125°C)
I_{NOM} : courant nominal	100 mA
λ_{pic} : longueur d'onde d'émission	935 nm
$\Delta\lambda$: largeur spectrale	50 nm
θ_e : angle d'émission	20 °
θ : temps de montée ou descente	0,7 μ s

Tableau 12 – Liste des paramètres donnés par le fabricant

Les DELs fonctionnent en courant continu ou pulsé ($F_{max} = 50$ kHz). Les profils de mission étant définis, les conditions de vieillissements peuvent être déterminées. Pour cela, nous avons effectué, à l'aide des travaux de **M. Fukuda** et **M. Schwob**, une estimation de l'amplitude des contraintes à appliquer aux DELs 935 nm induisant une dégradation du composant avec un facteur d'accélération optimal [19, 66]. Ce facteur d'accélération doit être suffisamment élevé pour observer des défaillances des composants après une durée de vieillissement réduite (moins de 2000 heures) mais pas trop élevé pour ne pas induire de défaillances catastrophiques. Les manipulations conduisant à déterminer le facteur d'accélération et l'énergie d'activation n'est pas l'objet de notre travail. Nous avons donc utilisé les travaux de **M. Fukuda** et **O. Ueda** pour déterminer, tout d'abord, les contraintes environnementales critiques : le courant d'alimentation I_a et la température de l'enceinte de vieillissement T_{enc} [19, 21]. Par la suite, nous avons évalué l'amplitude de ces contraintes ($I_a=110$ mA ou $T_{enc}=423$ K/+150°C) pour la technologie des DEL 935 nm afin d'obtenir un facteur d'accélération d'environ 50.

Dans le cadre de ce travail, notre objectif est triple :

- Déterminer les mécanismes de défaillance au sein de la puce dans son environnement final constitutif du système,
- Evaluer la défaillance de l'assemblage du composant,
- Discriminer les dégradations de type puce nue des dégradations de type assemblage.

L'étape finale a été de choisir le courant d'alimentation $I_a=110$ mA pour obtenir un facteur d'accélération de 50. La validation de ce point a été effectuée par une phase de préparation des vieillissements. Afin d'activer essentiellement la défaillance de la puce, nous avons soumis les DELs à un stockage en température. Cependant, une part de la perte de puissance optique peut provenir d'une défaillance de type assemblage. Pour cela, nous avons effectué des cycles thermiques permettant d'activer essentiellement la défaillance de l'assemblage. Quatre types de vieillissements différents ont donc été retenus :

- ☞ *le stockage passif correspondant à un stockage à 398 K (+125°C) sans courant d'alimentation,*
- ☞ *le stockage actif correspondant à un stockage à 398 K (+125°C) avec un courant d'alimentation de 110 mA ($I_{nom} + 10\%$),*
- ☞ *les cycles thermiques passifs correspondants à un cycle thermique 218 K/398 K (-55/+125°C) (pente de 5 K/min - palier de 15 min – temps total pour un cycle 102 min) sans courant d'alimentation,*
- ☞ *les cycles thermiques actifs correspondants à un cycle thermique 218 K/398 K (-55/+125°C) (pente de 5 K/min - palier de 15 min – temps total pour un cycle 102 min) et une alimentation en courant de 110 mA ($I_{nom} + 10\%$).*

La comparaison des résultats issus de ces quatre types de vieillissement permettra donc de discriminer les défaillances de type puce nue des défaillances de type assemblage, objectif majeur de la thèse.

III.1.b / Méthodologie et déroulement des campagnes de vieillissement

Cette section présente le déroulement de la campagne de vieillissements composée de trois phases différentes que nous exposerons dans l'ordre chronologique. Nous avons ajouté une étude préliminaire nécessaire afin d'établir un plan de travail adapté aux DELs.

- Phase n°0 – Etude préliminaire (100 DELs)

Cette phase comporte trois points essentiels différents :

- *Analyses technologiques*

Afin de déterminer les matériaux utilisés pour l'assemblage de la DEL, nous avons effectué des analyses par microsections grâce aux techniques d'analyses MEB et EDX. Nous avons utilisé 5 échantillons permettant d'évaluer la dispersion technologique.

- *Analyses électro-optiques - modélisation*

Les analyses électriques ont été effectuées pour des températures allant de 80 K (-193°C) à 398 K (+125°C) et à température ambiante (300 K/+27°C) pour les analyses optiques : L(E) et P(I). Compte tenu de l'amplitude des températures de mesures, une évaluation de l'impact de ces conditions sur les dérives des caractéristiques I(V), P(I) et L(E) a été effectuée. La phase expérimentale a montré que la dérive des paramètres électriques et optiques est inférieure à l'erreur de mesure induite par la manipulation et l'erreur intrinsèque de l'appareil ($\pm 0,5\%$ maximum). En d'autres termes, les mesures I(V), L(E) et P(I) sont reproductibles et s'inscrivent dans l'erreur de mesure.

La deuxième partie de cette phase consiste à déterminer les paramètres électro-optiques de la DEL dans les conditions initiales, c'est à dire sans vieillissement. Nous avons effectué le relevé des paramètres sur l'ensemble des DELs étudiées (95 DELs dédiées à la mesure électro-optique) afin d'en donner une valeur minimum, typique et maximum. Cette deuxième partie se traduit par l'extraction du modèle de la DEL.

- *Phase de préparation des vieillissements*

Cette phase a permis de déterminer la périodicité des mesures pour un stockage actif (398K (+125°C)/110 mA) et passif (398K (+125°C)/0 mA). Ces mesures ont été effectuées toutes les 24 heures sur une durée totale de vieillissement de 1000 heures et ont nécessité l'utilisation d'un lot de 16 DELs/95 (8 par condition de vieillissement). A la vue des résultats, nous avons évalué la périodicité des mesures à 200 h pour ces conditions de vieillissement. De plus, le comportement électro-optique relativement proche des différents composants en fonction du temps de vieillissement nous ont conduit à réduire le nombre d'échantillons à 10 par condition de vieillissement. Pour les cycles thermiques, nous n'avons pas fait d'étude préliminaire. Cependant, en utilisant les résultats précédents, nous avons évalué la périodicité à 100 cycles correspondant à un temps de vieillissement de 170 heures. Pour ne pas alourdir le document, cette partie n'a pas été détaillée.

- Phase n°1 – Détermination de la contrainte critique (41 DELs)

Pour cette phase nous avons utilisé 41 composants :

- ☞ 1 composant de référence utilisé pour les analyses électro-optiques,
- ☞ 10 composants pour chaque type de vieillissement (40 DELs).

La périodicité des mesures pour les analyses électro-optiques est de 200 heures pour le stockage et 100 cycles pour les cycles thermiques.

L'objectif de cette phase est de déterminer la contrainte critique pour les DELs. Compte tenu de l'ensemble des informations exposées, il existe deux types de contraintes différentes :

- le courant d'alimentation,
- la température.

Nous démontrerons que la contrainte critique est le courant d'alimentation.

- Phase n°2 – Identification et analyse des mécanismes de défaillance

La phase n°2 s'intéresse à l'identification et à l'analyse des mécanismes de défaillance observés pour la contrainte critique identifiée dans la section précédente. Nous avons établi un critère de défaillance fixé à une chute de 20 % de la puissance optique initiale.

Nous classerons les mécanismes de défaillance en suivant la démarche suivante :

- ☞ nous observerons l'évolution de la puissance de chaque DEL,
- ☞ pour les DELs ayant franchi le critère de défaillance, nous présenterons les signatures de défaillance observées,
- ☞ nous établirons un rapprochement avec les signatures de défaillance observées sur les structures InGaAs/GaAs "puces nues" et nous modéliserons la défaillance, puis en regroupant l'ensemble des données, nous identifierons les zones dégradées.

Afin de déterminer l'évolution de l'amplitude des défaillances en fonction de la contrainte critique, nous avons établi une troisième phase.

- Phase n°3 – Impact de la contrainte critique sur les dérives de paramètres (32 DELs)

Cette dernière phase a pour but de confirmer la criticité du courant d'alimentation. Pour cela nous avons effectué une campagne de vieillissement par contrainte échelonnée de 0 à 150 mA. Nous pourrions préciser quelle partie du composant est la plus sensible à la condition environnementale critique. L'utilisation du modèle électrique équivalent permet de simplifier cette étude et nous avons divisé cette phase en deux parties distinctes :

- *Etude préliminaire pour les vieillissements*

Nous avons utilisé 12 DELs pour déterminer la périodicité des mesures en fonction de l'augmentation de la contrainte critique (courant d'alimentation). Nous avons considéré des courants d'alimentations de 125 mA (6 DELs) et 150 mA (6 DELs). En effectuant une mesure des paramètres électro-optiques toutes les 24 heures, nous avons estimé une périodicité des mesures de 100 heures pour la contrainte en courant de 125 mA et de 24 heures pour la contrainte en courant de 150 mA. Ces premiers résultats ont permis d'établir que les signatures de défaillance sont identiques à celles observées pour le courant I_a de 110 mA mais la chute de puissance optique atteint plus rapidement le critère de défaillance.

- *Etude des vieillissements*

Cette phase d'étude a nécessité 21 DELs au total. Pour chaque condition de contrainte de courant supplémentaire (125 et 150 mA), nous avons utilisé 10 DELs plus une DEL utilisée pour la référence des mesures électro-optiques. Afin de regrouper toutes les manipulations effectuées pour l'étude des DELs, une synthèse est présentée dans tableau 13.

- Synthèse sur le déroulement de l'étude des DELs

Cette section permet de réunir les principales phases du déroulement de la campagne de vieillissement afin de permettre une meilleure compréhension du travail global.

Phase de l'étude	Nombre de composant utilisées par phase	Caractéristiques et objectifs
n°0	100	5 DELs pour les analyses technologiques (MEB et EDX) 95 DELs pour les analyses électro-optiques de référence (pas de vieillissement) dont 16 DELs permettant de déterminer les cycles des mesures et 5 DELs permettant de déterminer l'impact des mesures en température sur la dérive des paramètres. Objectifs : Etablir une connaissance des matériaux utilisés pour l'assemblage de la DEL, obtenir une base de données statistiques pour sa caractérisation et valider les conditions de mesures $I(V)$, $P(I)$ et $L(E)$.
n°1	41	10 DELs stockage actif 10 DELs stockage passif 10 DELs cycles thermiques actifs 10 DELs cycles thermiques passifs 1 DEL référence pour chaque étape de mesures électro-optiques Objectif : Détermination de la contrainte critique
n°2		Objectifs : Identification et analyses des signatures de défaillance pour la contrainte critique.
n°3	33	12 DELs permettant de déterminer : <ol style="list-style-type: none"> 1. une augmentations de la contrainte critique acceptable pour les DELs, c'est à dire ne donnant pas lieu à de nouveaux mécanismes de défaillance, 2. la périodicité des mesures à effectuer pour chaque augmentation de contrainte. 20 DELs pour les vieillissements. 1 DEL de référence pour les mesures électro-optiques. Objectif : Déterminer l'impact de la contrainte environnementale sur les paramètres électro-optiques de la DEL.

Tableau 13 – Chronologie des phases de vieillissement des DELs 935 nm

III.2 / Caractérisation initiale des DELs : aspect électrique et optique

Cette partie est architecturée en deux sections. La première section présente les analyses technologiques réalisées sur les DELs physiquement intégrés. La deuxième partie développe la modélisation électrique puis structurelle de la DEL.

III.2.a / Evaluation technologique

Les DELs étudiées sont des composants encapsulés dans un boîtier TO46 avec une sortie optique par lentille. Dans le but de détailler la structure de la DELs, nous avons développé deux niveaux structurels : la technologie d'alignement de la DEL et l'assemblage de la puce. Cette analyse a été réalisée par MEB et EDX. Ces méthodes d'analyse ne permettent pas d'observer la structure interne de la puce. L'utilisation de la MEB et de l'EDX est nécessaire pour déterminer l'assemblage du système en vue d'une simulation électro-thermique développée dans l'annexe B.2.

- Technologie et procédé d'alignement optique

La figure 76a représente la structure de la DEL par imagerie MEB utilisant un faisceau d'électrons de largeur $1\mu\text{m}$ accéléré sous un potentiel de 20 kV et avec un grossissement de 14. Nous détaillerons la structure en partant de la puce vers la lentille en suivant le parcours des photons comme l'indique la figure 76b. La puce à base de GaAs de dimension $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ est reportée avec un adhésif chargé à l'argent d'épaisseur moyenne $1\mu\text{m}$ sur un support en alliage de Fe/Ni. Cette dernière émet principalement des photons de manière latérale. Elle se situe dans une cavité conique tronquée sur laquelle est déposée une couche mince de Nickel ($2\mu\text{m}$). L'ensemble permet de réaliser des miroirs à 45° dont la fonction est de diriger la lumière émise par la puce vers la lentille (SiO_2). Afin d'améliorer le rendement du système (nombre de photons émis par rapport au nombre de porteurs injectés) la puce est enrobée par du SiO_2 (voir chapitre II). La lentille en SiO_2 est maintenue et alignée avec l'ensemble puce/cône d'émission par un cylindre creux en Fe/Ni. La fixation de l'ensemble est réalisée par sertissage.

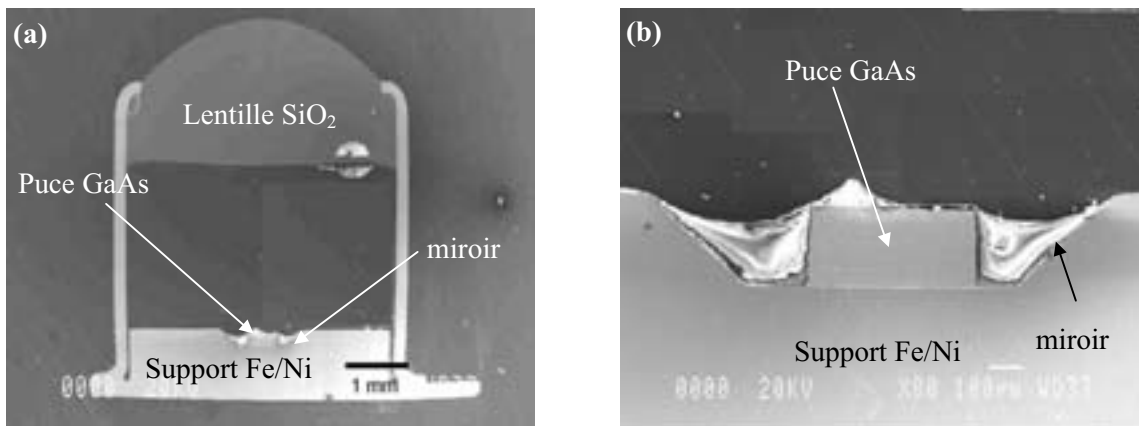


Figure 76 – Structure de la DEL dans son ensemble, (a) grossissement $\times 14$ et (b) grossissement $\times 20$

- Technologie des contacts et du report

Les zones visualisées par MEB et analysées par EDX sont les contacts électriques entre la puce et son environnement. La figure 77 représente le schéma structurel de la DEL dans lequel les zones observées sont détaillées.

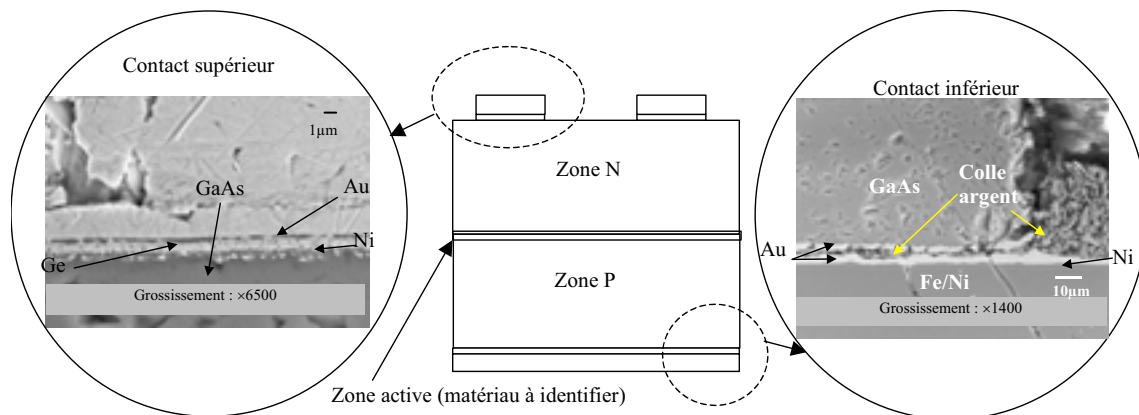


Figure 77 – Structure de la DEL et technologie du report

Les analyses EDX ont permis de déterminer les différents matériaux mis en jeu au sein des contacts. Le contact supérieur est réalisé par des couches minces de Ni (0,5 μm) déposé sur le GaAs dopé N puis Ge (0,5 μm) et enfin Au (1 μm). Le contact inférieur est réalisé par une couche mince d’Au (1 μm) déposé sur le GaAs dopé P, une couche de colle chargée à l’argent d’épaisseur d’environ 1 μm puis d’une couche de Ni (2 μm) déposée sur le support en Fe/Ni.

L’objectif, de caractériser technologiquement le composant d’un point de vue système est, à présent, atteint. En effet, pour répondre aux exigences d’un équipementier, la connaissance de la technologie d’alignement, de report et de contact est suffisante pour deux raisons majeures :

- Les méthodes d’analyses (SIMS, TEM...) utilisées pour préciser la zone interne (dopage et épaisseur) de la DEL demande un investissement prohibitif par rapport à l’objectif majeur qui est d’analyser les défaillances du composant d’un point de vue système. Notre proposition est de donner une évaluation de la structure adaptée à la définition d’un système par les méthodes d’analyses électro-optiques développées dans la prochaine section sans avoir une connaissance poussée à priori de l’architecture interne du composant.
- Les caractéristiques de l’assemblage du composant et les matériaux utilisés sont, à présent, déterminés et permettent une éventuelle étude par simulation physique du composant soumis à des contraintes de vieillissement. Ce point ne sera pas abordé dans le cadre de ce chapitre.

L’objectif majeur est, à présent, d’évaluer le potentiel des méthodes simples analyses électro-optiques pour la caractérisation des composants considérés.

III.2.b / Caractérisations électro-optiques et modélisation électrique de la DEL

Cette section a pour objectif d’extraire le modèle électrique de la DEL étudiée et de l’associer à une structure générique comportant une zone active, des zones latérales, des zones d’accès et des contacts. Avant de donner ce modèle, nous allons observer les différentes courbes associées aux mesures électro-optiques effectuées. Chacune de ces courbes permet de déterminer un ou plusieurs paramètres que nous identifierons, puis de construire le modèle de la DEL en utilisant la méthodologie exposée au cours du chapitre II.

- Extraction du modèle électrique associé

La figure 78 représente les caractéristiques $\text{LogI}(V)$ et $I(V)$ d'une DEL pour les températures extrêmes (80 K/-193°C et 398 K/+125°C) et la température ambiante (300 K/+27°C). Nous avons indiqué les différentes zones de fonctionnement de manière analogue aux zones explicitées dans le chapitre II pour la température de mesure de 300 K (+27°C). L'évaluation de la Zone I correspondant à R_{sh} n'est pas observée avec le HP 4145 A utilisé au Laboratoire. Etant donné que la résolution de cet appareil est évaluée à 10^{-9} A et que le courant de fuite typique d'une DEL à base de GaAs est de 10^{-12} A (voir chapitre II), l'observation de ce dernier n'est pas réalisable avec notre matériel. L'extraction des paramètres V_{th} , I_{th} et R_s se fait à partir des courbes $I(V)$; I_r , η et I_s à partir des courbes $\text{LogI}(V)$.

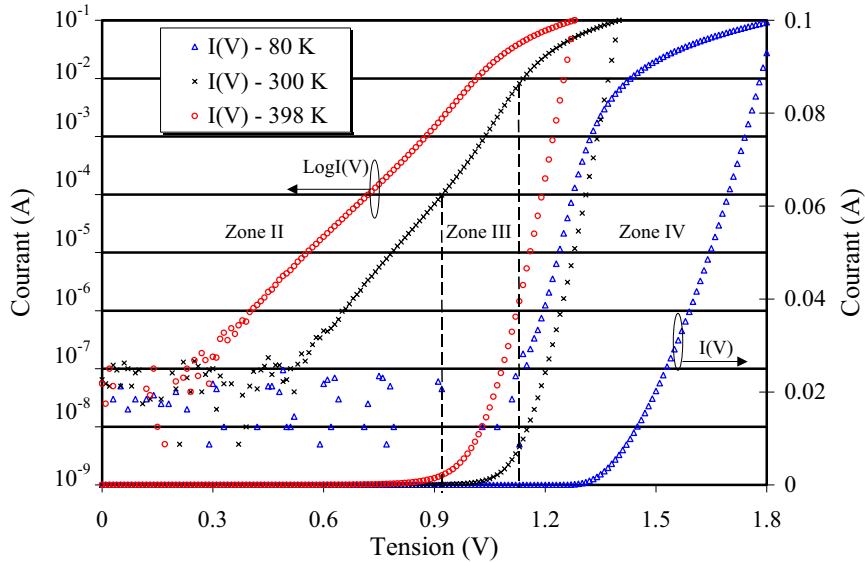


Figure 78 – Caractéristiques $\text{LogI}(V)$ en fonction de la température

Les valeurs typiques de I_r , I_s , η , R_s , I_{th} et V_{th} extraites de la courbe à 300 K (+27°C) sont reportées dans le tableau 14. On remarque que la valeur du facteur d'idéalité η , paramètre de la zone III, est égale à 1,6. En se reportant au chapitre II, un tel phénomène est traditionnellement modélisé par une diode homojonction favorisant la diffusion en parallèle avec une diode hétérojonction favorisant la recombinaison radiative. La conséquence directe est que la structure de la zone active de la DEL comporte au moins une double hétérostructure compte tenu des conclusions effectuées dans le chapitre II.

Paramètres	Valeurs typiques à 300 K (+27°C)
I_r : courant de saturation de recombinaison	3.10^{13} A
I_s : courant de saturation	5.10^{-15} A
η : facteur d'idéalité	1,6
R_s : résistance série	2,5 Ω
I_{th} : courant de seuil	8,56 mA
V_{th} : tension de seuil	1,14V

Tableau 14 – Valeurs typiques des paramètres électriques à 300 K (+27°C)

La puce se trouvant dans un cône tronqué, on peut supposer que l'émission de cette dernière est principalement latérale. De ce fait, la zone active s'étend sur la totalité de la surface $L \times W$ (figure 79). La DEL comporte deux plots de $150 \mu\text{m}$ de diamètre permettant le transport d'une importante densité de courant. La surface de la zone active doit être la plus importante possible afin de conserver un bon rapport puissance optique/courant soit environ 5% [22].

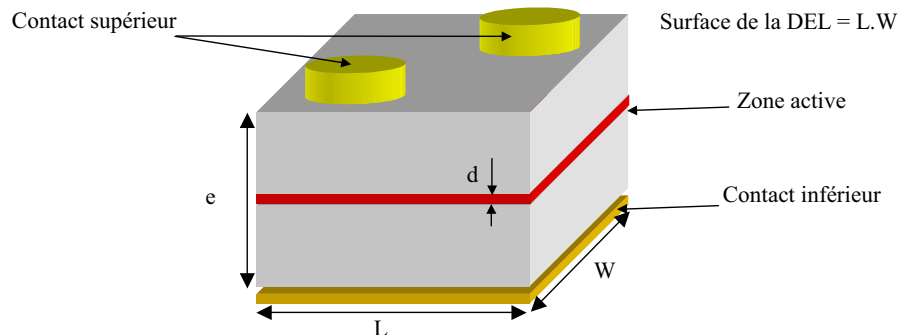


Figure 79 – Paramètres géométrie de la DEL 935 nm

La figure 80 présente le schéma équivalent extrait à partir des paramètres du tableau 14. On observe la présence des deux types de diode : homojonction D_{ho} et hétérojonction D_{hj} . La résistance R_s représente l'ensemble des résistances de contact, d'assemblage et de zones d'accès.

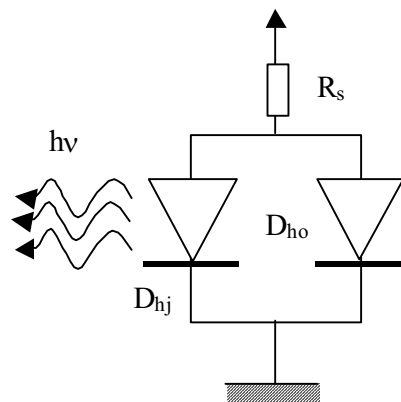


Figure 80 – Modèle électrique de la DEL 935 nm GaAs

La suite de l'exposé consiste à déterminer les paramètres de chacune des diodes D_{hj} et D_{ho} . Pour cela, le comportement électrique de chaque diode pour obtenir les courants I_{Dho} et I_{Dhj} sera modélisé. Par la suite, les deux contributions de courant seront additionnées pour former le courant théorique $I_{modèle}$. Nous comparerons le courant $I_{modèle}$ avec le courant mesuré dans la DEL pour les conditions suivantes :

- ☞ température de mesure $T = 300 \text{ K} (+27^\circ\text{C})$,
- ☞ temps de vieillissement $t = 0$ heure.

La figure 81 représente les courbes $I(V)$ expérimentales à $300 \text{ K} (+27^\circ\text{C})$ et simulées, relatives à I_{Dhj} , I_{Dho} et $I_{modèle}$. L'objectif majeur est de comparer la courbe $I(V)$ expérimentale à $300 \text{ K} (+27^\circ\text{C})$ avec la courbe $I_{modèle} = I_{Dho} + I_{Dhj}$.

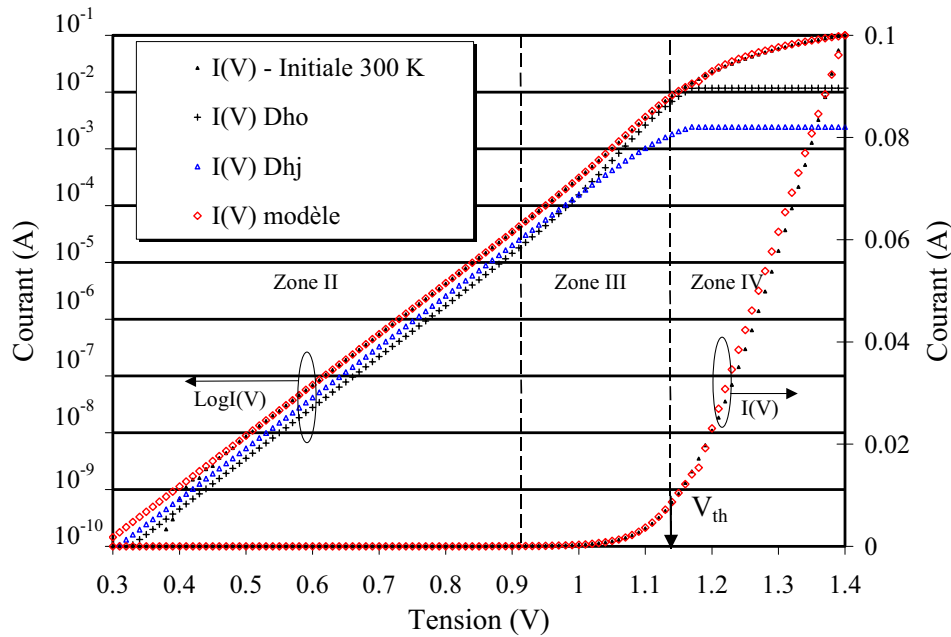


Figure 81 – Courbes I(V) théoriques et expérimentale de la DEL 935 nm à 300 K (+27°C)

Le tableau 15 rassemble les différentes valeurs des paramètres de chaque courbe courant-tension tracée dans la figure 81 : I(V) expérimentale, I_{Dhj} et I_{Dho} . Cette considération permet de quantifier chaque paramètre du modèle.

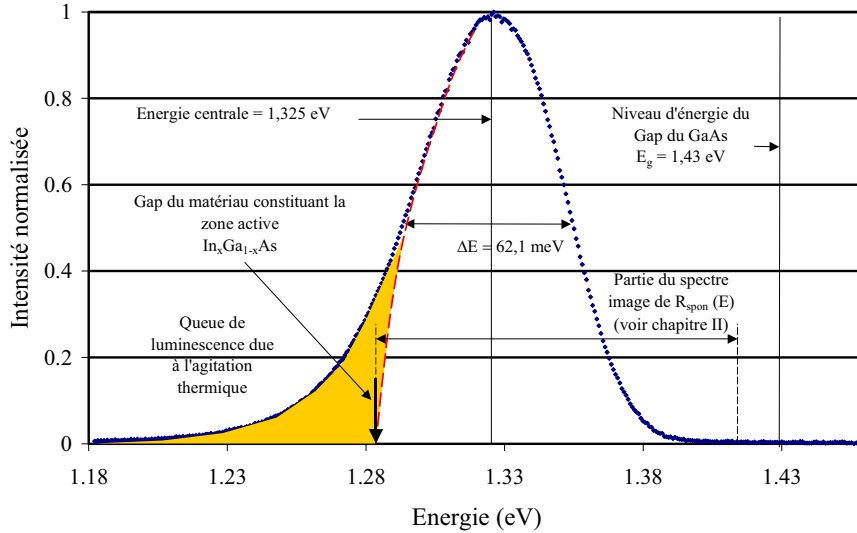
	Paramètres du modèle		Paramètres expérimentaux DEL
	D_{ho}	D_{hj}	
I_r : courant de saturation de recombinaison	$1,2 \cdot 10^{-13}$ A	-	$1,2 \cdot 10^{-13}$ A
I_{hj} : courant de photon	-	$1,8 \cdot 10^{-13}$ A	$1,8 \cdot 10^{-13}$ A
I_s : courant de saturation	$3,25 \cdot 10^{-22}$ A	-	$5 \cdot 10^{-15}$ A
η : facteur d'idéalité	1	2	1,6
R_s : résistance série	-	-	2,5 Ω
I_{th} : courant de seuil électrique	$6,77 \cdot 10^{-3}$ A	$1,79 \cdot 10^{-3}$ A	$8,56 \cdot 10^{-3}$ A
V_{th} : tension de seuil électrique	1,14V	1,14V	1,14V

Tableau 15 – Comparaison des paramètres électriques des courbes $I_{modèle}$ et I(V) expérimentale

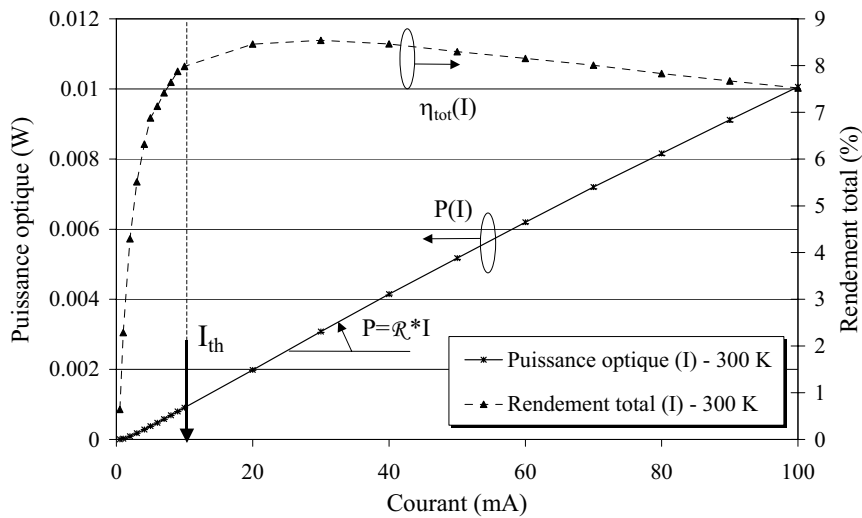
L'ensemble des considérations de cette première phase a permis de valider expérimentalement le modèle adapté au composant considéré et d'établir un jeu de paramètres électriques relativement simple à déterminer. Afin de compléter ces analyses, nous allons décrire les caractéristiques optiques.

- Caractéristiques optiques – Information sur la zone active

La figure 82 présente les caractéristiques optiques expérimentales $L(E)$, $P(I)$ et $\eta_{tot}(I)$ d'une DEL à 300 K (+27°C). Le spectre optique donne des informations sur la constitution de la DEL alors que la puissance optique et le rendement total indique l'efficacité optique de la DEL.



(a) Spectre optique d'une DEL à 300 K (+27°C)



(b) $P(I)$ et $\eta_{tot}(I)$ à 300 K (+27°C)

Figure 82 – Caractéristiques expérimentales optiques $L(E)$, $P(I)$ et $\eta_{tot}(I)$ mesurées à température ambiante (300K)

La caractéristique $L(E)$ permet de préciser la constitution de la zone active. Nous avons représenté sur la figure 82a l'énergie du gap du GaAs (1,424 eV) matériau substrat de la DEL (donnée par le fabricant). On observe que l'ensemble du spectre se situe à des énergies inférieures à cette dernière (1,18 à 1,39 eV). Le matériau substrat est donc optiquement transparent à l'émission de la zone active, c'est à dire que l'émission de cette zone ne subit aucune absorption optique dans le GaAs. La répartition spectrale de la luminescence de la DEL indique que le matériau constituant la zone d'émission est différent du GaAs. Le minimum d'énergie du spectre d'émission correspond au gap de ce matériau en tenant compte de l'agitation thermique (voir chapitre II – spectre d'émission d'une DEL). Ce matériau a un gap évalué à 1,28 eV. Le matériau le plus probable est le $In_xGa_{1-x}As$ avec un taux de substitution x d'environ 15% en prenant comme référence les informations des deux premiers chapitres de la thèse [11, 67]. La zone active de la DEL est une double hétérostructure par épitaxie de matériaux de différente nature $In_{0,15}Ga_{0,85}As / GaAs$. Cette conclusion est en accord avec la constatation faite à partir des mesures électriques.

Le deuxième paramètre caractéristique du spectre optique est la largeur spectrale à mi-hauteur. Le chapitre II donne la relation existante entre ce paramètre et la température de la jonction. La largeur spectrale mesurée est d'environ 62,1 meV (48 nm) typiquement observée pour un composant émettant à 935 nm (voir détail au chapitre II) et correspond à une température de jonction de 450 K (177°C). La différence de température entre la jonction et la surface de la DEL s'explique par les différentes résistances thermiques de l'assemblage (voir annexe B.2).

La figure 82 représente les courbes $P(I)$ et $\eta_{tot}(I)$. La courbe $P(I)$ comporte deux zones différentes : une zone correspondante aux faibles niveaux d'injection de courant située en dessous du seuil I_{th} et une zone de moyenne et forte injection de courant située au-dessus du seuil.

Intéressons-nous d'abord à la partie sous le courant de seuil de la DEL en rappelant que la recombinaison Auger est quasi-nulle pour ce niveau d'injection [68]. L'expression du courant en fonction des taux de recombinaison (voir chapitre II) peut s'écrire comme :

$$\frac{J_n}{qd} = \frac{J_p}{qd} = \frac{J}{qd} = A_{nr}n + Bn^2 \quad \text{E III-1}$$

en considérant que $Bn^2 \ll A_{nr}n$. On peut exprimer la luminescence de la DEL par la relation : $L = Bn^2$. En simplifiant l'équation E III-1, on retrouve une relation entre la luminescence et la densité de courant :

$$L = \frac{B}{A_{nr}^2} \left(\frac{J}{qd} \right)^2 \quad \text{E III-2}$$

Nous avons donc une relation entre P et I qui est un polynôme du second degré :

$$P = \beta I^2 \quad \text{E III-3}$$

Le coefficient constant β du terme carré est proportionnel au rapport B/A_{nr}^2 . En examinant cette partie de la courbe $P(I)$, on peut évaluer l'évolution de la durée de vie des porteurs en fonction du temps de vieillissement. En effet, le terme B est relié à la durée de vie des porteurs par l'expression suivante :

$$B = \frac{1}{t_{\text{rad}}} \frac{N_j}{N_c N_v}$$

E III-4

Les paramètres N_c , N_v et N_j représentent les densités effectives d'état de conduction de valence et moyenne. La deuxième partie de la courbe $P(I)$ de la figure 82b permet d'extraire l'efficacité optique de la DEL. La valeur typique est $\mathfrak{R} = 6,23 \cdot 10^{-2} \text{ W / A}$. Ce paramètre nous permet de donner le rendement externe de la DEL proche de 4,75% dans notre cas (voir les détails des calculs dans le chapitre II – puissance optique d'une DEL). Nous avons tracé le rendement optique comme le rapport de $P_{\text{opt}}/P_{\text{elec}}$. Le rendement optique du composant considéré est extrêmement faible (moins de 5%) par rapport à la valeur de la densité de courant évalué à 100 A/cm^2 . Le chapitre II a permis d'établir la relation existante entre la puissance de sortie optique et la puissance électrique injectée pour une puce. Pour une DEL à base de GaAs, on évalue $\mathfrak{R} = 21 \cdot 10^{-2} \text{ W / A}$. La différence entre la puce nue et l'assemblage est déterminée par un rendement optique de l'assemblage. Ce dernier peut évoluer dans le cas d'un désalignement optique. Notre travail consiste donc à discriminer une perte de puissance optique intrinsèque à la puce d'une perte de couplage optique.

- Synthèse sur la modélisation électrique – paramètres fonctionnels et physiques de la DEL

Les mesures électriques effectuées sur les DELs avant vieillissement ont permis d'extraire un modèle électrique équivalent composé d'une résistance R_s , d'une diode homojonction D_{ho} et d'une diode D_{hj} présentées dans la figure 83. Ce modèle définit des paramètres fonctionnels V_{th} , I_{th} , R_s et physiques I_r , I_s et η décrit dans le tableau 16. Les paramètres fonctionnels sont essentiellement utilisés pour évaluer la dispersion technologique des DELs considérées alors que les paramètres physiques permettent de caractériser finement le composant en déterminant les mécanismes physiques internes à la puce. Le paramètre η caractérise la zone active du composant et les courants I_r et I_s , déterminent le type de conduction interne à la puce.

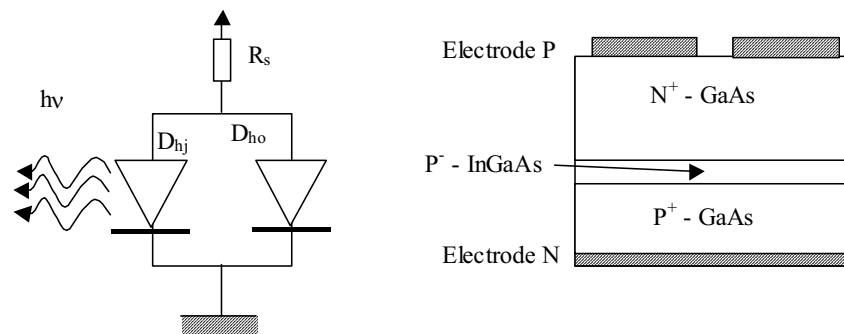


Figure 83 – Schéma du modèle électrique et de la structure de la DEL 935 nm

	Paramètres	Valeurs min	Valeurs typiques	Valeurs max
Paramètres électriques	$I_r = I_{gr} + I_{hj}$: courant de saturation de recombinaison	$2 \cdot 10^{-13}$ A	$1,225 \cdot 10^{-12}$ A	$5 \cdot 10^{-12}$
	I_s : courant de saturation	$5 \cdot 10^{-15}$ A	$1,375 \cdot 10^{-14}$ A	$5 \cdot 10^{-14}$ A
	η : facteur d'idéalité	1,594	1,647	1,736
	I_{th} : courant de seuil	1,378 mA	5,222 mA	11,37 mA
	V_{th} : tension de seuil	1,128 V	1,141 V	1,147
	R_s : résistance série	2,463 Ω	2,54 Ω	3,833 Ω
Paramètres optiques	β : facteur de luminescence $I < I_{th}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$ W/A ²	$4 \cdot 10^{-6}$ W/A ²	$5,8 \cdot 10^{-6}$ W/A ²
	\mathfrak{R} : facteur de luminescence $I > I_{th}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$ W/A	$7,949 \cdot 10^{-2}$ W/A	$8,84 \cdot 10^{-2}$ W/A
	λ_{pic} : longueur d'onde centrale	936,5 nm	946 nm	949,5
	$\Delta\lambda$: largeur spectrale à mi-hauteur	47 nm	48,5 nm	50,5 nm

Tableau 16 – Valeurs minimales, typiques et maximales des paramètres des DELs étudiées à 300 K (+27°C)

Les caractéristiques optiques L(E) et P(I) ont permis de compléter et de confirmer les informations collectées précédemment. Les paramètres spectraux, énergie centrale E_{pic} et la largeur spectrale ΔE sont des paramètres fonctionnels et physiques. Ils permettent de caractériser la zone active et particulièrement d'apporter des informations complémentaires sur le matériau de cette dernière (InGaAs). Les paramètres déterminés à partir des mesures de puissance optique sont des paramètres physiques qui caractérisent le taux de luminescence du composant en fonction du courant.

Cette partie a permis de définir un jeu de paramètres fonctionnels et physiques dédiés à la technologie des DELs InGaAs/GaAs facilitant leur analyse de défaillance.

III.3 / Identification et exploitation des signatures de défaillance

Les paramètres, définis dans la section précédente, sont reliés aux éléments du modèle électrique de la DEL. Ces éléments étant eux-mêmes reliés aux zones de la structure générique du composant, on peut envisager une étude simple de la dégradation des DELs. La difficulté est de mettre en évidence la relation étroite entre les paramètres fonctionnels et les phénomènes physiques régissant le fonctionnement de la DEL. Le chapitre II a permis de rappeler un grand nombre de ces relations qui seront utilisées pour déterminer les mécanismes de défaillance.

Cette partie se concentre sur les vieillissements de la phase n°1 avec deux objectifs :

- déterminer le vieillissement le plus critique,
- effectuer une analyse de défaillance pour les DELs au-delà du critère de défaillance.

III.3.a / Détermination de l'impact des différents types de vieillissement

L'ensemble des résultats sur les DELs soumises aux différents vieillissements a pour objectif de déterminer le vieillissement le plus critique. Le critère de défaillance est déterminé par une perte de puissance optique relative évaluée à 20% en accord avec les standards actuels de qualification relatifs aux DELs [69, 70, 71]. La quantité de composants par type de vieillissement étant de 10, nous réduirons le nombre de composants présentés pour les analyses de vieillissement à quatre composants dont la chute de la puissance optique est la plus significative.

Après 1200 heures de vieillissement, nous avons évalué le taux de défaillance¹⁵ de chaque condition de vieillissement. Le tableau 17 donne une évaluation du taux de défaillance en fonction du type de vieillissement.

Type de vieillissement	Stockage passif	Stockage actif	Cycles thermiques passifs	Cycles thermiques actifs
Taux de défaillance (%)	0	20	<5	<10

Tableau 17 – Evaluation du taux de défaillance en fonction du type de vieillissement

La figure 84 représente l'évolution de la puissance optique relative mesurée pour un courant de 100 mA et une température de 300 K (+27°C) en fonction du temps de vieillissement. Pour les cycles thermiques, nous avons traduit le cycle thermique en durée équivalente à un temps de vieillissement.

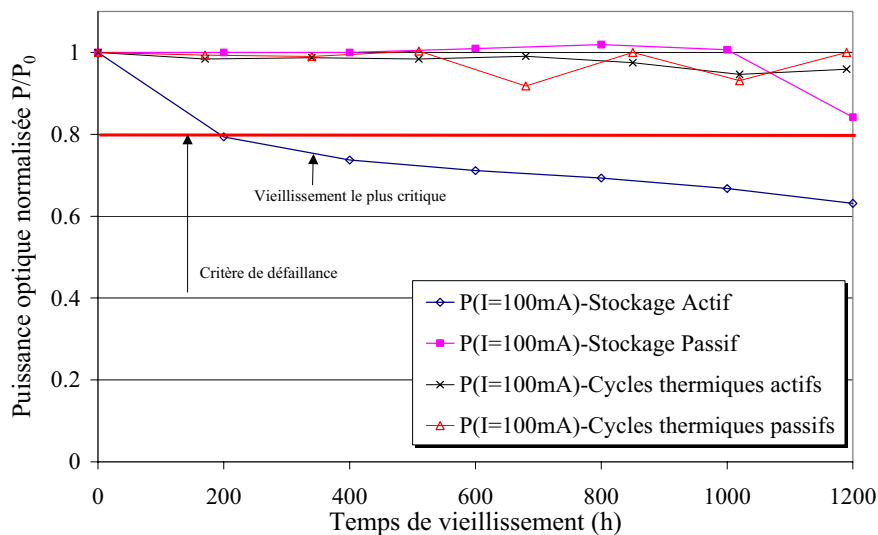


Figure 84 – Evolution de la puissance optique, mesurée à 100 mA, en fonction du temps de vieillissement

Il ressort de ces courbes et du tableau 17 que **le stockage actif est identifié comme étant le vieillissement le plus critique pour la technologie considérée**. La comparaison entre le stockage actif et passif nous permet de supposer que le facteur aggravant est le courant d'alimentation imposé aux DELs. Afin d'identifier les zones affectées, l'étude se focalisera sur les différents paramètres évoluant pour le stockage thermique actif. Une bibliothèque, relative à la technologie sur substrat GaAs et présentée au chapitre I, donnant les relations entre les signatures de défaillance et les zones dégradées a permis :

¹⁵ Taux de défaillance : nombre de composants franchissant le critère de défaillance divisé par le nombre total de composants.

- d'aider à l'identification des signatures de défaillance,
- de confirmer les conclusions apportées au terme de chacune des analyses.

III.3.b / Analyses des signatures de défaillance en stockage actif

Les méthodes d'analyses électro-optiques vont, à présent, nous permettre d'obtenir l'évolution des paramètres électriques et optiques de la DEL définis dans la partie III.2.b. Dans le cas d'une incertitude sur le mécanisme physique, nous utiliserons les résultats de mesure effectuée en température. Nous identifierons les signatures de défaillance en les classant par ordre croissant d'injection de courant de la zone I à la zone IV. L'évolution de la puissance optique est une caractéristique majeure pour l'étude de ces composants en vieillissement car ce paramètre est en relation directe avec le critère de défaillance établi précédemment. Pour cette raison, nous observerons en priorité cette évolution afin de conclure sur la défaillance du composant.

La figure 85 représente la variation de la puissance optique pour quatre composants sur dix. Parmi ces composants, il est à noter qu'une DEL comportait un défaut de fabrication et nous l'avons retirée de l'étude à posteriori. Le défaut se manifestait par une émission de lumière centrée sur une longueur d'onde de 900 nm et une tension de seuil à 1,3 V.

La figure 85 montre deux modes de défaillances différents : une chute de puissance optique rapide et graduelle. La chute de puissance rapide (DEL A3) montre un franchissement du critère de défaillance après 200 h alors que les autres DELs atteignent ce critère après 1200 heures. Concernant les spectres optiques, nous n'avons noté aucune évolution de la longueur d'onde centrale et aucun élargissement spectral. Pour cette raison, nous ne représenterons pas l'évolution de ces deux paramètres en fonction du temps de vieillissement car ils n'apportent pas d'information complémentaire intéressante.

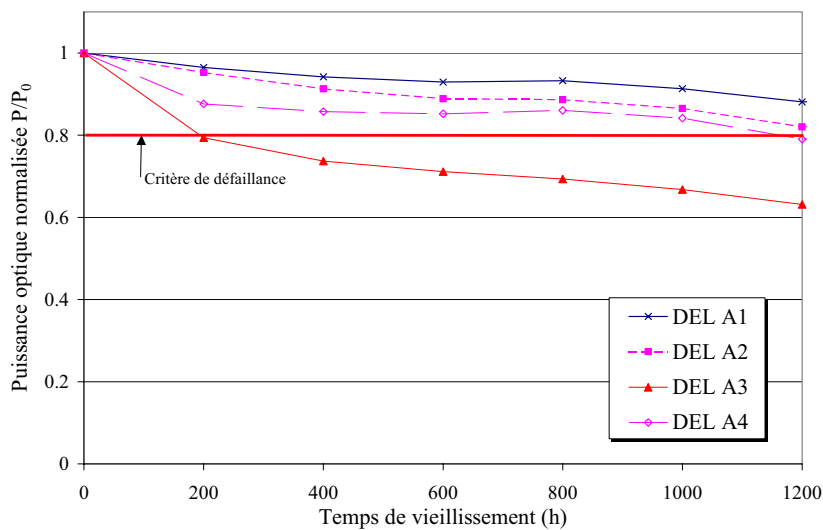


Figure 85 – Evolution de la puissance optique à 300 K/+27°C (I=100 mA)

La figure 86 représente les courbes LogI(V) de la DEL A3 en fonction du temps de vieillissement mesurées à 300 K. Dans le cas des DELs, rappelons que pour la zone I les mesures ne sont pas exploitables à faibles niveaux d'injection. Nous nous intéresserons donc directement à la zone II de la caractéristique LogI(V). Trois modes de dégradation différents sont observés :

- une forte augmentation du courant de recombinaison d'environ une décade dans la zone II,
- une augmentation plus faible d'environ 150 % du courant de saturation dans la zone III,
- une variation de la pente I(V) en linéaire d'environ 40% dans la zone IV.

Afin de préciser l'évolution de la caractéristique I(V), la dérive des paramètres sera décrite par zone de fonctionnement (Zone II à IV).

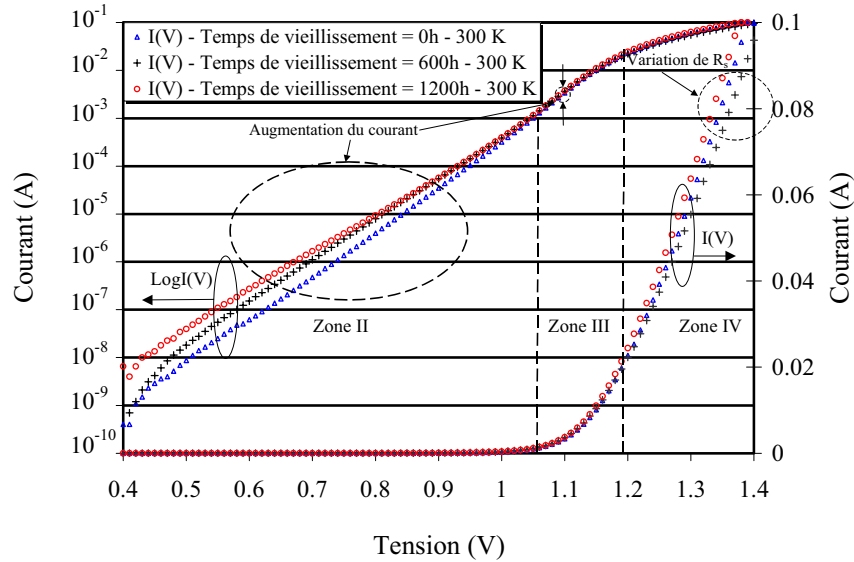


Figure 86 – Courbes I(V) expérimentales en fonction du temps de vieillissement mesurées à 300 K (+27°C) de la DEL A3

- Mécanismes relatifs à la zone II

Dans le cas de la DEL, le courant de saturation de recombinaison $I_r = I_{gr} + I_{hj}$ est principalement constitué par la composante de recombinaisons radiatives I_{hj} . Rappelons que la caractéristique $\text{LogI}(V)$ est une droite dans la base (LogI, V) ; son expression est la suivante :

$$I = I_{hj0} e^{qV/2kT} \Leftrightarrow \text{Ln}I = \text{Ln}I_{hj0} + \frac{qV}{2kT} \quad \text{E III-5}$$

où I_{hj0} est la valeur du courant de saturation de recombinaison radiative déterminée initialement ($t=0$ heure). Une augmentation de cette partie de la courbe $\text{LogI}(V)$ est généralement corrélée à la diminution de la durée de vie des porteurs dans la zone active [19]. Ceci entraîne une chute de la puissance optique d'une part et l'augmentation du paramètre I_{hj0} d'autre part. Si cette augmentation est constante, elle se traduirait par un décalage parallèle de la courbe $\text{LogI}(V)$ sur la zone II comme l'indique la figure 87. Or après 1200 heures de vieillissement, on observe une évolution de la pente de la partie linéaire de la courbe $\text{LogI}(V)$ située dans la zone II, que l'on nomme p . On définit cette dernière par la relation suivante :

$$\begin{cases} I = I_0 \exp(pV) \\ I = (I_{hj} + I_{hj0}) \exp(-bV) \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p = b(t) + \frac{q}{kT} \\ I_0 = I_{hj}(T) + I_{hj0} \end{cases} \quad \text{E III-6}$$

où $I_{hj}(T)$ et $b(t)$ sont des paramètres que nous identifierons dans la prochaine partie. La figure 87 représente le courant de la DEL avant et après vieillissement (1200 heures) et le courant caractérisant une augmentation constante du paramètre I_{hj} . On s'aperçoit que la variation de ce paramètre ne peut pas être constante et dépend donc de la tension d'alimentation V . Afin de focaliser l'étude sur ce problème, nous nous sommes intéressés plus particulièrement sur l'évolution de la pente p de la courbe $\text{Log}I(V)$ plutôt que sur le paramètre I_{hj} .

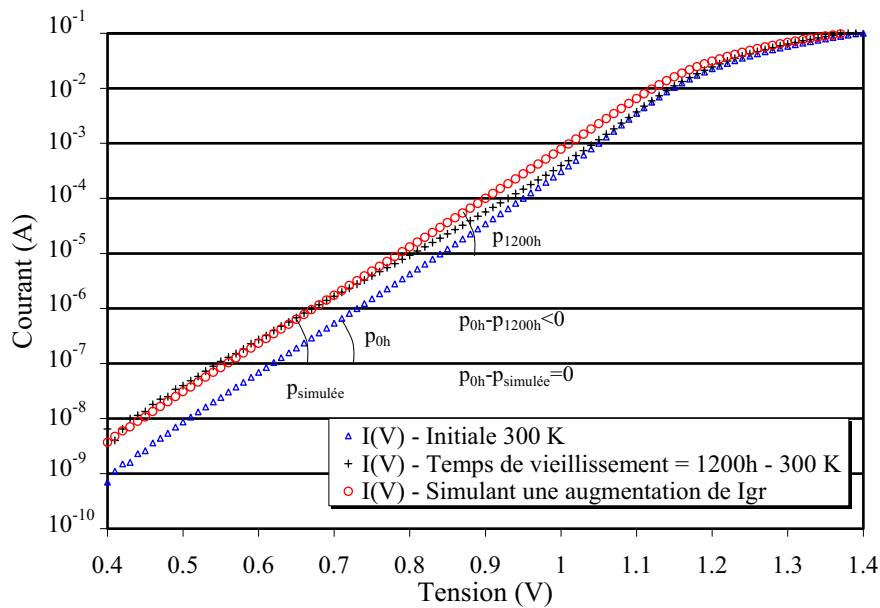


Figure 87 – Comparaison entre le mode de vieillissement réel à 1200 h pour la DEL A3 et une évolution du paramètre I_r

La figure 88 présente l'évolution relative de la pente p du courant dans la zone II en fonction du temps de vieillissement. On observe une diminution moyenne de 5% qui se traduit par une augmentation de courant d'environ une décade.

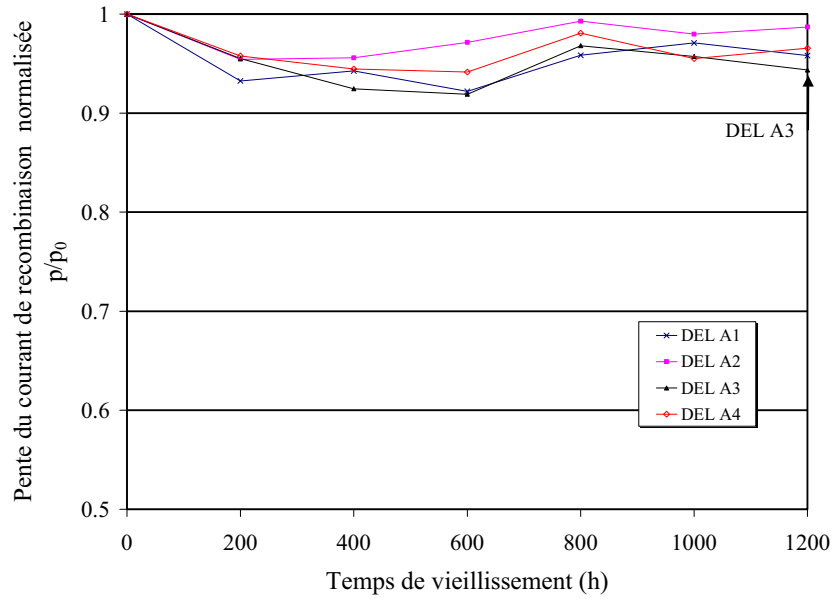
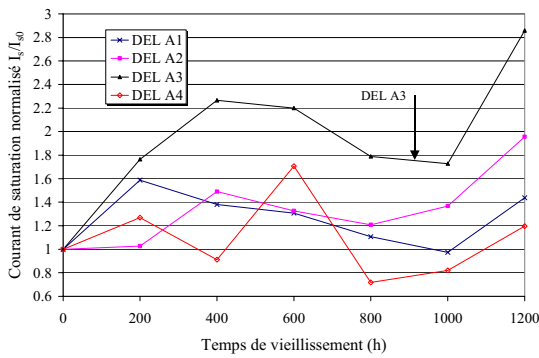


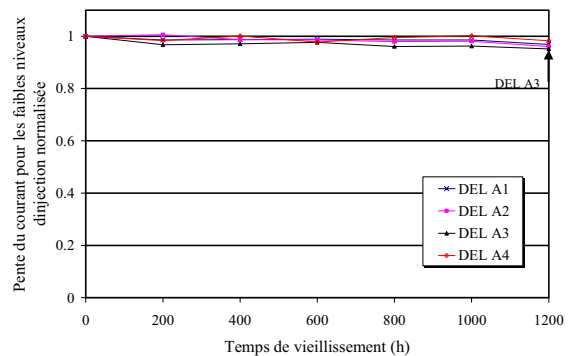
Figure 88 - Evolution du paramètre p en fonction du temps de vieillissement mesuré à $T= 300\text{ K (+}27^\circ\text{C)}$

- Augmentation du courant dans la zone III

La figure 89a montre l'évolution relative du courant de saturation (I_s/I_{s0}) pour l'ensemble des DELs. On observe une augmentation du courant de saturation I_s de 300 % pour la DEL n°3 et quasiment deux fois moins pour les autres DELs. Remarquons que sur la courbe $\text{LogI}(V)$, cette variation est très inférieure à une décade. La figure 89b montre l'évolution relative du facteur $1/nU_t$ qui est la pente de la courbe $\text{logI}(V)$ dans la zone III. L'évolution de ce paramètre est inférieure à 5% pour l'ensemble des DELs.



(a) Evolution de I_s en fonction du temps de vieillissement



(b) Evolution de $1/(n.U_t)$ en fonction du temps de vieillissement

Figure 89 – Evolution des valeurs des paramètres de la zone III en fonction du temps de vieillissement

- Evolution de R_s

La figure 90 présente les variations de la résistance série R_s , paramètre de la zone IV, dont la valeur augmente dans un premier temps d'environ 30 à 40% puis diminue en dessous de sa valeur d'origine (moins de 5 %). On note que la DEL A2 se comporte différemment avec une résistance série qui diminue d'environ 30 % après 1200 heures de vieillissement. Ce comportement est atypique et une analyse par microsection a montré que le report de la puce était effectué à l'aide d'une brasure AuSn et non de la colle chargée à l'argent. Nous détaillerons ce point ultérieurement.

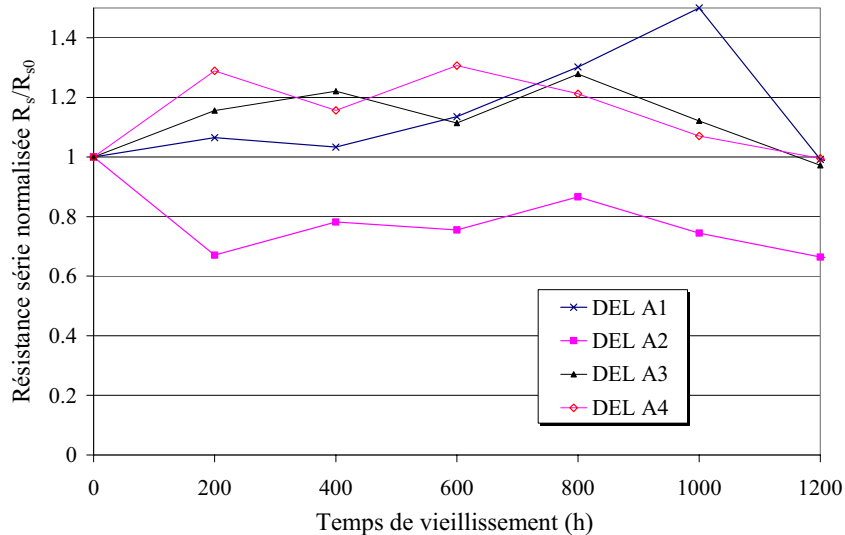


Figure 90 – Evolution de R_s en fonction du temps de vieillissement

A ce stade, nous avons montré que l'ensemble des paramètres électriques retenus présente une évolution en fonction du temps de vieillissement que nous avons classé en trois signatures différentes :

- ☞ la diminution de la pente du courant de recombinaison dans la zone II,
- ☞ l'augmentation de courant dans la zone III,
- ☞ les variations de la résistance série.

Ces trois signatures de défaillance sont associées à un ou plusieurs mécanismes de dégradation. Nous pouvons établir un premier diagnostic rapide sur les technologies des DEL InGaAs/GaAs. La dérive relativement importante des paramètres électriques nous permet de localiser les zones dégradées au sein de la puce. L'assemblage et plus particulièrement l'alignement optique reste donc intègre. La suite de notre exposé va permettre d'affiner les analyses des signatures de défaillance afin de localiser la zone dégradée au sein de la puce de manière plus précise.

Nous allons, à présent, procéder à une analyse des mécanismes de défaillance en tenant compte de la dérive comportementale du composant et de l'assemblage à partir de l'évolution des paramètres fonctionnels et physiques identifiés précédemment (tableau 16). Cette analyse sera menée avec un double objectif :

- exploiter les études menées sur les technologies similaires permettant d'émettre des hypothèses justifiées des mécanismes de défaillance relatifs aux variations électro-optiques observées.
- Modéliser l'évolution des paramètres retenus, après les caractéristiques initiales menées avec notre banc, en modifiant le schéma électrique et les valeurs des éléments dans le but d'identifier le(s) mécanisme(s) de dégradation à l'origine de la perte de puissance optique.

III.3.c / Analyses des mécanismes de défaillance relatifs à la zone II

Cette première section s'intéresse aux très faibles niveaux d'injection correspondant à la zone II de la courbe $\text{Log}I(V)$ de la DEL A3. Dans cette zone, une augmentation du courant d'environ une décade est observée pour une température de mesure de 300 K (+27°C). Dans la section précédente, nous avons établi que le changement de pente p de la caractéristique $\text{Log}I(V)$ pour la zone II était plus appropriée pour suivre l'évolution de la courbe $\text{Log}I(V)$. Nous avons tracé p et sa variation relative Δp par rapport à leur valeur d'origine en fonction de la température de mesure et du temps de vieillissement dans la figure 91.

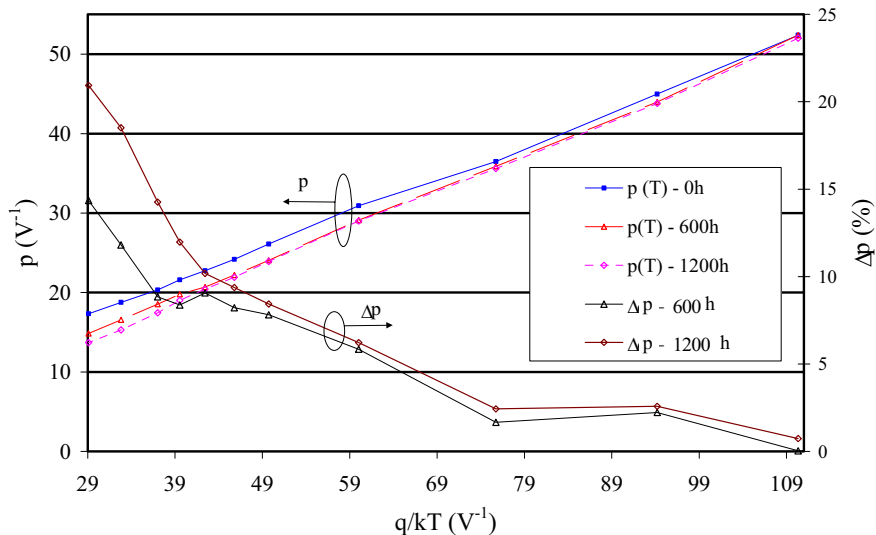


Figure 91 – Caractéristique p et Δp en fonction de la température de mesure et à différents temps de vieillissement

Le comportement de p en fonction de $u = q/kT$ est linéaire pour la mesure sans vieillissement (figure 91). Ce comportement est en accord avec la théorie développée dans le chapitre II. La pente de la droite est proche de $1/2$ puisque le phénomène physique prépondérant, dans cette zone II, est la recombinaison de porteurs dans la zone active. Cette pente évolue en fonction du vieillissement. Cela se traduit par l'apparition d'un phénomène physique que nous allons déterminer dans la suite de l'exposé. Concernant les variations relatives Δp , on observe une variation plus importante à haute température (398 K/+125°C) indiquant que le phénomène est activé thermiquement.

Ces mécanismes de dégradation corrélerent des signatures de défaillance identifiées dans l'étude de **M. Fukuda** sur la technologie GaAs "puce nue" [19, 72] :

- diminution de la résistance de fuite R_{sh} ,
- diffusion de centres recombinants dans la zone active.
 - *Modélisation d'une diminution de la résistance de fuite R_{sh}*

Cette section présente la modélisation traduisant l'effet des résistances de fuites d'après **M. Vanzi** [62]. Nous considérons en première approximation une résistance dont la caractéristique $I(V)$ est linéaire : $\frac{dR_{sh}}{dI} = \frac{dR_{sh}}{dV} = 0$. Sa valeur diminue en fonction de temps de vieillissement. Les courbes simulées correspondent à la somme du courant dans la DEL initialement à laquelle on ajoute la contribution du courant dans le dipôle R_{sh} ($1G\Omega < R_{sh} < 1k\Omega$).

La figure 92 compare les courbes LogI(V) simulant la diminution de la résistance de shunt Rsh et les courbes expérimentales LogI(V) avant et après vieillissement. On observe une modification de la pente de la courbe LogI(V) mais le comportement est très différent de celui que l'on observe sur la courbe LogI(V) après 1200 heures de vieillissement.

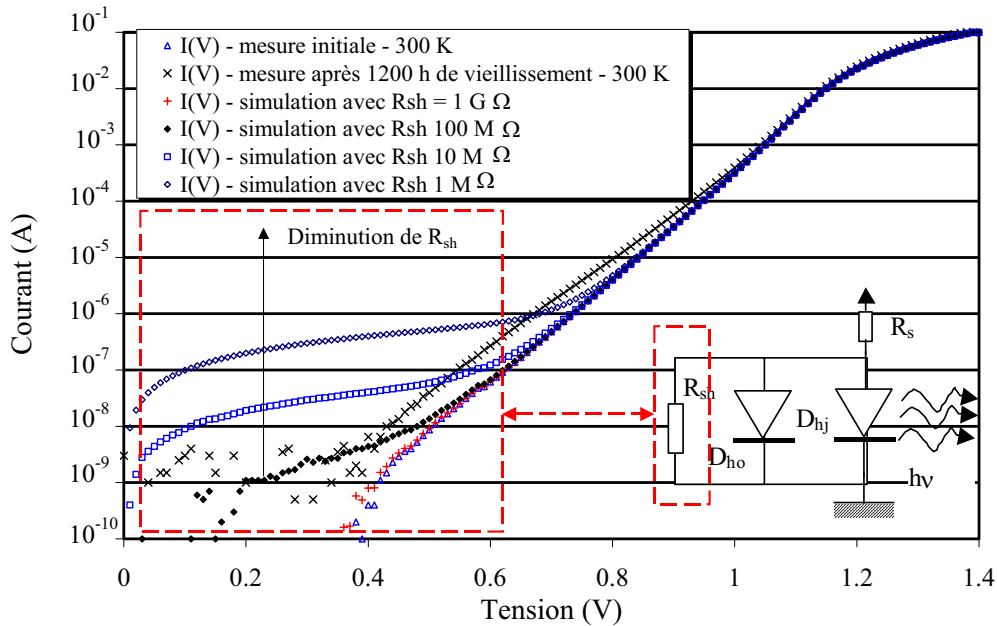


Figure 92 – Modélisation de la diminution de la résistance de fuite pour une température de 300 K (+27°C)

L'augmentation du courant ne semble pas corrélée, à priori, à la diminution de la résistance de fuite R_{sh} . Il nous faut donc envisager une analyse plus fine sur le deuxième mécanisme de défaillance envisagé.

- *Modélisation de la diffusion de centres recombinants dans la zone active*

L'objectif de cette section est de montrer de manière qualitative la diffusion de centres recombinants, origine des variations du paramètre p décrites dans la section précédente.

La figure 93a représente le schéma de bande de l'hétérostructure à l'équilibre thermodynamique de la DEL d'après **M.Fukuda [19]**. Nous avons représenté les largeurs de charge d'espace relatives aux deux hétérostructures. W_1 représente la largeur de charge d'espace de l'hétérostructure PN^+ et W_2 de l'hétérostructure P^+P . Dans la figure 93b la jonction est polarisée dans le sens direct, W_1 évolue en fonction de la tension V appliquée à la diode de la même manière qu'une jonction PN classique alors que W_2 n'évolue quasiment pas en fonction de la tension V .

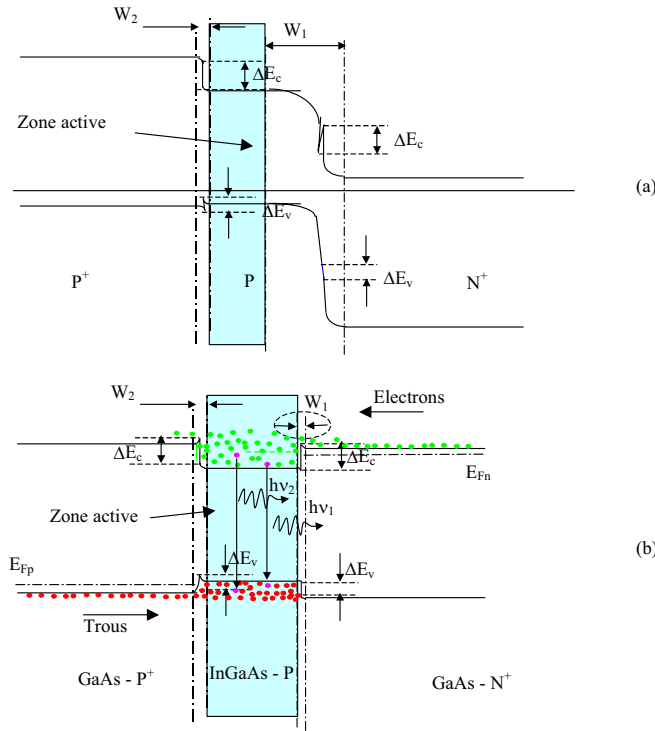


Figure 93 – Schéma de bande de l'hétérostructure de la DEL à l'équilibre thermodynamique et pour un niveau d'injection de courant donné

La diffusion de dopants dans la zone active peut provenir de la zone N^+ de la jonction ou bien la zone P^+ . Nous allons, à présent, déterminer quelle interface de la zone active (P^+P ou PN^+) est altérée et déterminer l'équation approchée du courant après 1200 heures de vieillissement. Pour cela, nous allons rappeler rapidement les phénomènes de transport de courant dans une jonction aux très faibles niveaux d'injection de courant.

Le phénomène de transport électronique dans la DEL est la recombinaison de porteurs dans la zone active prépondérant devant les recombinaisons dans la zone de déplétion pour un potentiel positif supérieur à kT/q . En reprenant l'expression du courant de recombinaisons de porteurs de l'équation E III-7, on observe que seul le courant de saturation de recombinaisons I_{hj} est un paramètre susceptible d'évoluer en fonction de V .

$$I = I_{hj} e^{qV/2kT} \quad \text{E III-7}$$

Nous allons détailler sa valeur en fonction des paramètres physiques :

$$I_{hj} = qn_i \times d \left(\frac{1}{\tau_{nrad}} + \frac{1}{\tau_{rad}} \right) \quad \text{E III-8}$$

- où n_i est la densité de porteur intrinsèque,
- d est la largeur de la zone active,
- τ_{rad} est le temps de recombinaison radiative,
- τ_{nrad} est le temps de recombinaison non-radiative.

La diffusion de dopant s'observe généralement par la diminution de la durée de vie totale τ_{tot} des porteurs. Ce phénomène entraîne une modification du courant de saturation I_{hj} . L'expression du paramètre physique τ_{tot} est donnée par :

$$\frac{1}{\tau_{tot}} = \frac{1}{\tau_{nrad}} + \frac{1}{\tau_{rad}} = kN_0 \quad \text{E III-9}$$

où N_0 est le dopage moyen de la zone considérée. La variation du paramètre d peut également entraîner une évolution du paramètre I_{hj} .

Le taux de recombinaisons, considéré au chapitre II, représente le phénomène de recombinaisons dans la zone active. Dans la mesure où cette zone évolue avec la tension d'alimentation V , le taux de recombinaisons est lui aussi fonction de V . Dans notre cas, largeur de la zone active d évolue en opposition avec la zone de charge d'espace W_1 qui est fonction de la tension d'alimentation V . En reprenant l'ensemble des considérations menées jusqu'ici, on peut donc supposer que l'interface N^+P est le lieu de diffusion de dopant.

Nous allons, à présent modéliser le phénomène physique de diffusion de dopants pour mettre en équation l'augmentation du courant dans la zone II de la caractéristique $\text{Log}I(V)$. Afin de simplifier le calcul, nous avons émis deux hypothèses principales que nous justifierons à posteriori :

Hypothèse n°1 : Nous supposons que la loi de diffusion des centres recombinants est identique à la loi de diffusion de dopants classiques dans les semiconducteurs. Ceci entraîne une augmentation du dopage de la zone active.

Hypothèse n°2 : La diffusion des dopants de la zone N^+ vers la zone P donne lieu à une diminution du dopage P de la zone active. Cependant, pour simplifier les calculs, nous considérerons que le dopage de cette zone augmente pendant les vieillissement de manière à traduire l'augmentation du nombre de centres recombinants.

Nous allons commencer par déterminer le profil de dopage permettant de traduire la diffusion des centres recombinants dans la zone active. Pour cela nous donnerons la loi de diffusion générale dans les solides puis nous en déduirons le profil de dopage en introduisant la première hypothèse.

La loi de diffusion des dopants dans les solides se note :

$$D = D_0 \exp[-qQ/kT] \quad \text{E III-10}$$

où D_0 représente la constante de diffusion,
 Q est l'énergie d'activation.

La résolution de la loi de **Fick** montre que le profil de concentration se met sous la forme suivante :

$$N(x, t) = \frac{\mu}{2(\pi Dt)^{1/2}} \exp(-x^2/4Dt) \quad \text{E III-11}$$

où μ est la masse du dopant par unité de surface,
 D la valeur du taux de diffusion pour la température de diffusion considérée.

L'équation E III-11 exprime la variation de dopage en fonction de la distance à l'interface où se situe la concentration maximum de dopants en considérant l'hypothèse n°1.

La figure 94 présente le profil général de dopage de la double hétérostructure initialement en trait plein puis avec la prise en compte du phénomène de diffusion de centres recombinant (trait discontinu), en accord avec l'hypothèse n°2. Le profil de dopage exponentiel s'explique par la considération de la loi de **Fick**. Les hétérostructures sont réalisées par épitaxie et expliquent la variation abrupte du profil de dopage initial. La pénétration des centres recombinants est relativement étroite (quelque nm) car le processus est faible. En effet, la température de la jonction est de l'ordre de 555 K/+282°C (voir annexe B.1) pendant le vieillissement (+125°C/110 mA) et active faiblement la diffusion de dopant de $5.10^{-23} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ [73]. La variation de dopage dans la zone N^+ existe mais est très faible par rapport au dopage initial ($\Delta N \ll N_d$) et peut être négligé en première approximation.

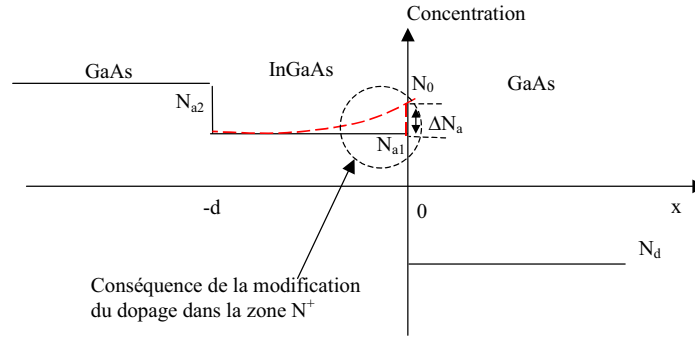


Figure 94 – Modification du profil de dopage en fonction du vieillissement

L'expression du profil de dopage dans la zone active après vieillissement peut se mettre sous la forme :

$$N(x) = (N_0 - N_{a1}) \exp(-mx^2) + N_{a1} \quad \text{E III-12}$$

avec m , un paramètre définissant la loi d'évolution du dopage dans la zone active. Nous avons vu, dans le chapitre II, que le taux maximum de recombinaisons se situait au centre de la zone active. Nous avons donc effectué les calculs pour $x = \frac{d}{2}$ (voir chapitre II).

Nous avons exprimé ce paramètre en fonction du dopage dans le cas de la diffusion de centres recombinants en reprenant l'expression E III-12:

$$\tau_{\text{tot}} = \frac{1}{kN(d/2)} = \frac{1}{k[(N_0 - N_{a1}) \exp(-md^2/4) + N_{a1}]} \quad \text{E III-13}$$

Si on remplace la valeur de τ_{tot} dans l'expression de I_{hj} on trouve:

$$I_{hj} = \frac{qn_i kd [(N_0 - N_{a1}) \exp(-md^2/4) + N_{a1}]}{2} \quad \text{E III-14}$$

$$I_{hj} = \frac{qn_i kd [(N_0 - N_{a1})]}{2} \exp(-md^2/4) + \frac{qn_i kd [N_{a1}]}{2}$$

$$I_{hj} = a \exp(-md^2/4) + I_{hj0} = I_{h_jcr} + I_{hj0}$$

Le courant de saturation I_{hj} est donc la somme de deux termes. Le terme I_{hj0} est le courant de saturation initial. Le terme I_{hjer} est le courant induit par les centres recombinants.

Dans l'équation E III-13, nous considérons que la durée de vie des porteurs minoritaires moyenne est donnée pour la valeur $d/2$ et la valeur de d est proportionnelle à \sqrt{V} : $d=M\sqrt{V}$ d'après [11].

L'expression littérale de I_{hjer} est alors la suivante :

$$I_{hjer} = a \exp(-bV) \quad \text{E III-15}$$

avec
$$a = \frac{qn_i kd(N_0 - N_{a1})}{2}$$

$$b = \frac{mM}{16Dt} = \frac{K}{16Dt}$$

L'ensemble de notre étude donne la valeur du courant total de recombinaisons :

$$I = [I_{hj0} + a \exp(-bV)] \exp(qV/2kT) \quad \text{E III-16}$$

Cette équation traduit l'expression du courant en tenant compte de la diffusion de dopants. La démarche utilisée est de déterminer les constantes a et b afin de faire coïncider la courbe théorique $I(V)$ issue de E III-16 avec la courbe expérimentale obtenue après une durée de vieillissement de 1200 heures. Nous prendrons en compte également la température afin de confirmer les hypothèses formulées au début de l'étude.

▪ *Validation expérimentale de la modélisation*

Cette partie permet de mettre en évidence la validité du modèle du courant induit par les centres recombinants en comparant la loi théorique extraite précédemment de l'équation E III-16 et les courbes expérimentales $I(V)$ après vieillissement. L'équation E III-16 traduit l'augmentation du courant de recombinaison. Cette dernière est une équation à deux variables, le temps de vieillissement t et la température de mesure T . La température de vieillissement étant fixe, elle intervient comme paramètre et non comme variable.

Les deux paramètres a et b issus de l'équation E III-16, sont des variables indépendantes. En effet, a ne dépend que de T et b ne dépend que de t , soit donc :

$$\left(\frac{\partial a}{\partial t} \right)_{T=\text{constante}} = \left(\frac{\partial b}{\partial T} \right)_{t=\text{constante}} = 0 \quad \text{E III-17}$$

Nous allons aborder, à présent, deux études différentes visant à mettre en évidence expérimentalement l'évolution de $a(T)$ et de $b(t)$.

☞ Etude à temps de vieillissement constant et à température de mesure variable

La figure 95 représente respectivement les courbes $I(V)$ vieilles (1200 h), non vieilles pour une température de mesure de 300 K (+27°C) et la courbe relative au courant théorique traduisant la diffusion de dopants. On observe une très bonne corrélation entre la courbe simulée et la courbe $I(V)$ expérimentale correspondant à un temps de vieillissement de 1200 heures.

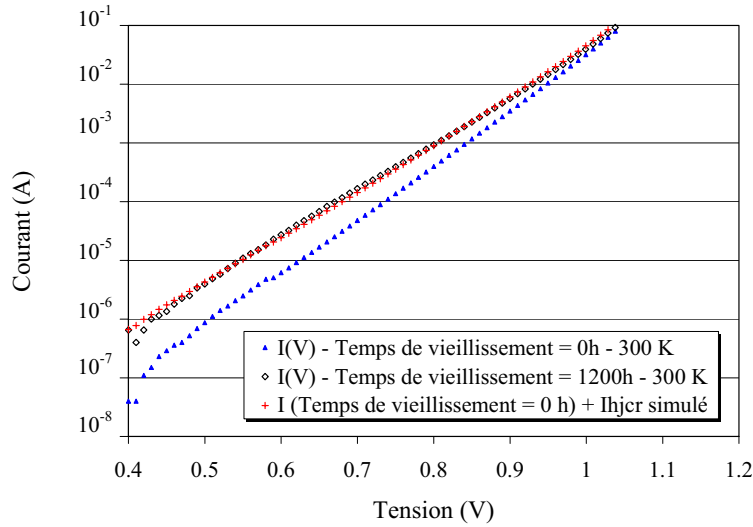


Figure 95 – Comparaison des courbes I(V) expérimentale et simulée à 300 K (+27°C)

Nous avons extrait la valeur des paramètres **a** et **b** définis dans l'équation E III-16 résumée dans le tableau 18 :

a	$1,74 \cdot 10^{-11} \text{ A}$	$\frac{qn_i kd(N_0 - N_{a1})}{2}$
b	$5,5 \text{ V}^{-1}$	$\frac{K}{16Dt}$

Tableau 18 – Valeur théorique et expérimentale des paramètres de l'équation E III-16 pour la condition (t=1200 heures, T = 300 K/+27°C)

Nous pouvons exprimer le paramètre **a** en fonction de I_{hj0} :

$$\mathbf{a} = I_{hj0} \left[\frac{N_0 - N_{a1}}{N_{a1}} \right] \quad \text{E III-18}$$

On en déduit l'expression de N_0 :

$$N_0 = N_{a1} \left[1 + \frac{\mathbf{a}}{I_{hj0}} \right] \quad \text{E III-19}$$

Pour un dopage initial N_{a1} de 10^{21} m^{-3} , on évalue le dopage à l'interface N_0 à $3 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$. Le nombre de centres recombinants supplémentaires et l'augmentation du courant de recombinaison sont étroitement corrélés. Cette conclusion est en accord avec les considérations de **M. Fukuda** et **O. Ueda** dans lesquels une analyse par TEM a été réalisée pour confirmer le phénomène de diffusion de dopant [19, 68]. L'hypothèse n°2, relative à l'augmentation du dopage de type P dans la zone active, est donc vérifiée.

Pour confirmer cette hypothèse, il est nécessaire d'effectuer la comparaison pour une température de mesure différente. Si nous reprenons les mêmes paramètres **a** et **b** que nous avons explicité dans le tableau 18, seul le paramètre **a** dépend de la température de mesure. La figure 96 présente les courbes avant vieillissement, après 1200 h de vieillissement pour une température de 398 K (+125°C) et la courbe théorique prenant en compte la diffusion de centres recombinants. Nous observons une bonne correspondance entre la courbe expérimentale après 1200 heures de vieillissement et la courbe théorique.

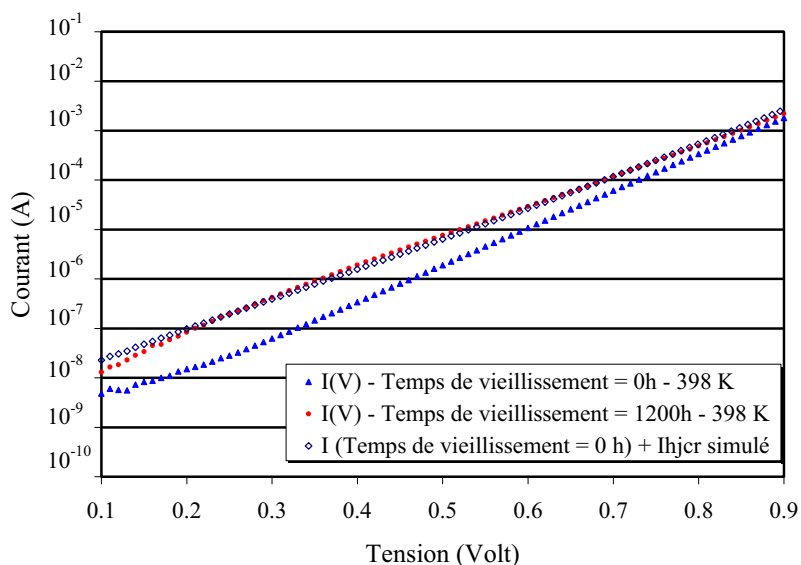


Figure 96 – Comparaison des courbes I(V) expérimentales et théoriques à 398 K (+125°C)

Nous avons extrait la valeur des paramètres **a** et **b** définis dans l'équation E III-16 que nous présentons dans le tableau 19.

a	$1,74 \cdot 10^{-8} \text{ A}$	$\frac{qn_1kd(N_0 - N_{a1})}{2}$
b	$5,5 \text{ V}^{-1}$	$\frac{K}{16Dt}$

Tableau 19 – Valeur théorique et expérimentale des paramètres de l'équation E III-16 pour la condition (t=1200 heures, T = 398 K/+125°C)

Nous confirmons que seul le paramètre **a** a évolué alors que **b** est rigoureusement constant. La condition de mesure, caractérisée par une température supérieure (398 K/+125°C), implique une augmentation du courant de recombinaison qui est relié à un phénomène activé thermiquement, c'est à dire que le courant de recombinaison augmente lorsque la température de mesure augmente. On évalue le rapport $\frac{a}{I_{hj}}$ pour une température de mesure de 300K (+27°C) à 102 et pour une température de 398 K (+125°C) à 98. L'équation E III-19 met alors en évidence que le paramètre N_0 est un paramètre

constant car le rapport $\frac{a}{I_{hj}}$ a une évolution extrêmement faible.

$$I_{hj}$$

☞ Etude à température de mesure constante et à temps de vieillissement variable

La figure 97 présente respectivement les courbes I(V) vieilles (60 h), non vieilles pour une température de mesure de 300 K (+27°C) et la courbe relative au courant théorique traduisant la diffusion de dopants. On observe une très bonne corrélation entre la courbe simulée et la courbe I(V) expérimentale correspondant à un temps de vieillissement de 600 heures.

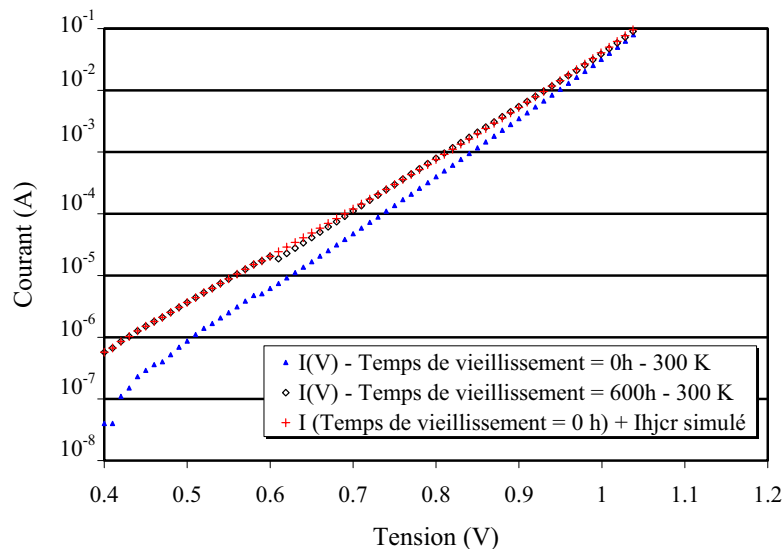


Figure 97 - Comparaison des courbes I(V) expérimentale et simulée à 300 K (+27°C)

Nous avons extrait la valeur des paramètres **a** et **b** définis dans l'équation E III-16 résumée dans le tableau 20 :

a	$1,74 \cdot 10^{-11} \text{ A}$	$\frac{qn_i kd(N_0 - N_{a1})}{2}$
b	6 V^{-1}	$\frac{K}{16Dt}$

Tableau 20 – Valeur théorique et expérimentale des paramètres de l'équation E III-16 pour la condition (t=600 heures, T = 300 K/+27°C)

Afin d'évaluer l'évolution de la variable **b** en fonction du temps, nous avons comparé les paramètres **a** et **b** pour une température de mesure de 300 K (+27°C) et pour un temps de vieillissement de 600 heures et de 1200 heures. Les valeurs de **a** et **b** après 1200 heures de vieillissement et pour une température de mesure de 300 K (+27°C) ont été déterminées dans la partie précédente.

Le paramètre **b** est relié au phénomène de diffusion de dopants et au temps de vieillissement par la relation : $b = \frac{mM}{16Dt} = \frac{K}{16Dt}$

Dans un premier temps, nous avons évalué la valeur de la diffusion pour une température de jonction de 550 K (277 K) à environ $4,5 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour le matériau GaAs [73]. Par la suite, nous avons déterminé la valeur du paramètre **K** proportionnel à la profondeur de pénétration des centres recombinants. Le tableau 21 présente les valeurs de **D** et de **K** après 600 heures de vieillissement **K**₆₀₀ et 1200 heures de vieillissement **K**₁₂₀₀.

D	$4,5 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
K ₆₀₀	$9,33 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1}$
K ₁₂₀₀	$3,11 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1}$

Tableau 21 – Valeurs expérimentales des paramètres de l'équation E III-16.

Le paramètre **K** est relié au paramètre **m** de la loi de donnant l'évolution du dopage dans la zone active :

$$N(x) = (N_0 - N_{a1}) \exp(-mx^2) + N_{a1} \quad \text{E III-20}$$

Le paramètre **M** est identifié comme une constante et n'évolue pas en fonction du temps de vieillissement **t** et de la température de mesure **T**. Le paramètre **K** diminue et induit donc une diminution du paramètre **m**. L'évolution du profil de dopage de la zone active est représentée dans la figure 98 en suivant la loi donnée par l'équation E III-20.

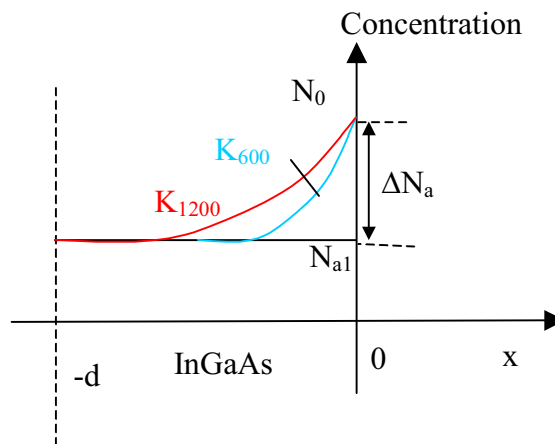


Figure 98 – Evolution du profil de dopage de la zone active

Le phénomène de diffusion de centres recombinants explique les mécanismes de dégradation. Le paramètre important dans ce domaine est la pente **p** de la courbe LogI(V) dans la zone II. En effet, la présence de centres recombinants non-radiatifs dans la zone active diminue l'efficacité interne de la DEL. Ce mécanisme de défaillance explique la chute de puissance optique de la DEL.

Pour confirmer cette démonstration, nous avons utilisé l'étude de P(I) en dessous du seuil de la DEL caractérisée par une courbe P(I) proportionnelle à **B/A**². Le terme **B** représente le coefficient de recombinaisons bimoléculaires alors que **A** représente le taux de recombinaisons non-radiatives (voir chapitre II). Ce paramètre est directement relié à la durée de vie des porteurs dans la zone considérée comme nous l'avons exposé dans la partie III.2.b.

Dans la figure 99, nous avons représenté l'évolution de la puissance optique pour des courants inférieurs au courant de seuil de la DEL. Les courbes correspondent à des fonctions polynômes du second degré. Nous avons évalué la diminution du paramètre β de 25 %. Cette chute est en relation avec la diminution du taux de recombinaisons radiatives de la DEL conduisant à une perte de puissance optique de 40 %.

Les travaux de **M. Fukuda**, traitant des composants à base de GaAs, identifient les mécanismes de défaillance associés par les signatures du rendement optique [19]. La figure 99 s'attache à représenter l'évolution du rendement optique $\eta_{tot}(I)$ des DELs considérées afin la comparer aux signatures mises en évidence par **M.Fukuda** [19]. La diminution de 25 % du rendement parallèlement à l'axe des ordonnées correspond à la diffusion de centres recombinants au sein de la zone active.

Cette partie s'est concentrée sur la localisation et la cause de la défaillance ainsi que sa modélisation. Le changement de pente du courant de recombinaison traduit la diffusion des centres recombinants dans la zone active au niveau de la jonction PN^+ . Une telle précision dans la localisation de la zone dégradée en considérant le composant, d'un point de vue système, est remarquable. La modélisation extraite de cette partie permet d'identifier la cause de la défaillance : le phénomène de diffusion de centres recombinant. Les mesures optiques affinent encore d'avantage l'analyse puisque nous montrons que les centres recombinants sont des centres non-radiatifs.

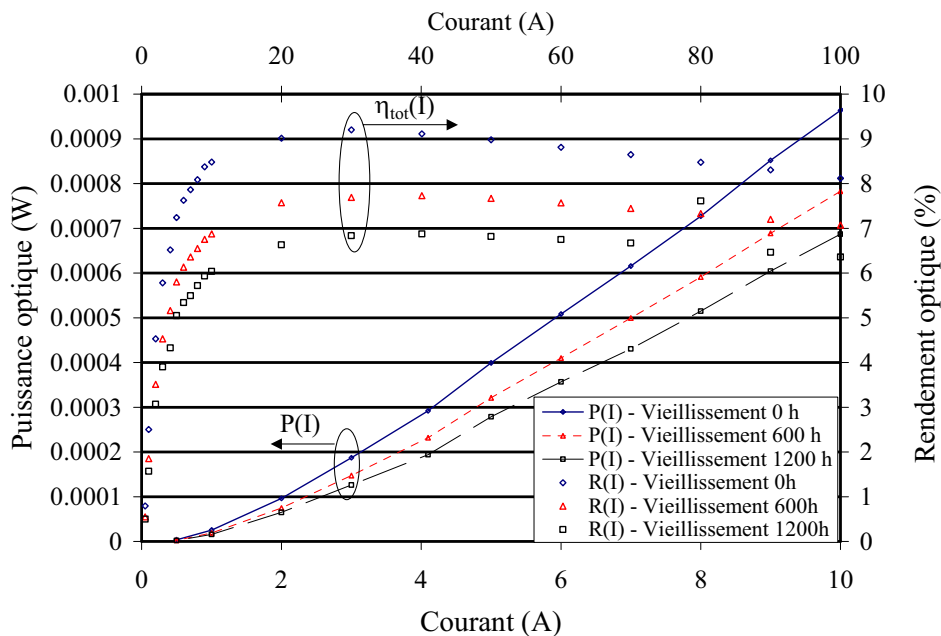


Figure 99 – Evolution $P(I)$ et $\eta_{tot}(I)$ en fonction du temps de vieillissement

L'augmentation du courant de saturation pour la DEL A3 s'explique par une augmentation du courant de saturation I_{hj} que l'on observe jusque dans la zone III. Rappelons que ce paramètre est effectif dans les zones II et III (voir chapitre II). Le phénomène physique est le même que dans la section précédente. L'augmentation de centres recombinant a pour effet d'augmenter le courant dans la jonction et de diminuer l'efficacité de la DEL ; Ce phénomène s'observant de manière précoce dans la zone II.

III.3.d / Hypothèses de variation de R_s

Les mécanismes de défaillance associés à la zone IV correspondent au paramètre R_s . Le comportement typique retenu est le suivant (voir figure 90). Une augmentation de la valeur de la résistance d'environ 30 % (600 heures de vieillissement). Par la suite une diminution en dessous de la valeur d'origine environ 5% après 1200 heures.

Cette partie permet de donner l'ensemble des hypothèses sur les mécanismes de défaillance associés à cette signature de défaillance. Afin d'éclaircir la discussion, nous allons situer de manière précise les zones ohmiques de la DELs.

Les zones ohmiques se situent au niveau des zones neutres de la DEL. Les zones concernées sont schématisées dans la figure 100.

On observe trois zones de contact différentes :

- le contact supérieur constitué de plusieurs couches métalliques caractérisées par le paramètre R_{scn} ,
- les zones neutres de la DEL, dopées $N(R_{sscn})$ et $P(R_{sscp})$,
- le contact inférieur constitué de couches métalliques et de colle (R_{scp}).

Nous allons, dans la prochaine section, aborder le problème de l'augmentation de R_s en énumérant les différentes causes possibles et en localisant les zones de dégradation associées.

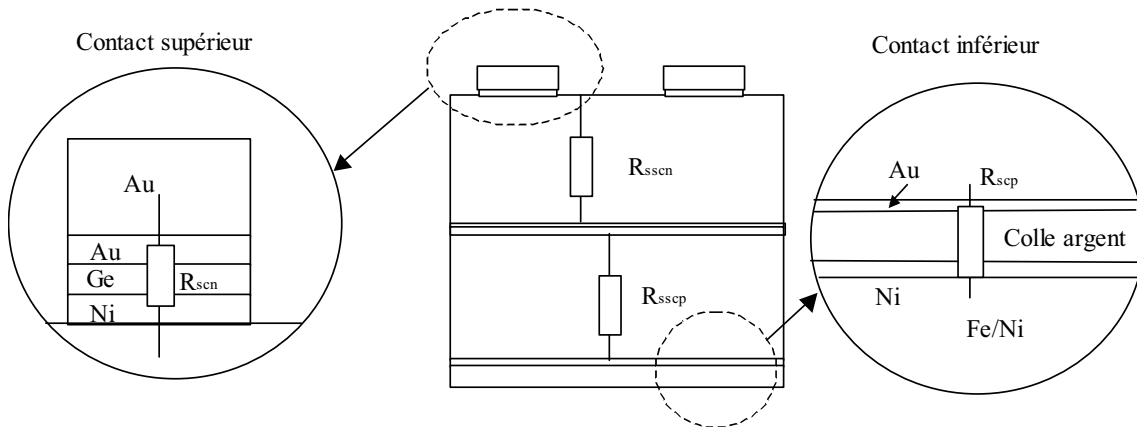


Figure 100 – Localisation des différentes zones ohmiques

- Phénomène physique traduisant l'augmentation de la valeur de R_s

Cette partie s'intéresse aux différents phénomènes physiques traduisant une augmentation de la résistance série R_s . Cette évolution peut s'expliquer par plusieurs phénomènes physiques :

- Création d'intermétalliques dans les couches de contact [19]

Les intermétalliques ne sont pris en compte que pour des couches constituées par plusieurs métaux.

La DEL comporte deux contacts : un supérieur constitué de Ni/Ge/Au et un inférieur constitué de Au/colle argent/Ni. Les intermétalliques possibles ne peuvent être effectifs qu'au niveau du contact supérieur. En effet, la colle chargée à l'argent ne satisfait pas aux mêmes phénomènes physiques que les superpositions de métaux différents. La figure 101 représente le schéma de bande de la DEL avec le contact supérieur. On observe que les barrières de potentiel introduit par les différentes couches métalliques Ni/Ge et Ge/Au sont de 1,04 eV et 0,97 eV. Ces dernières sont du même ordre de

grandeur que le potentiel du contact (1,07 eV).

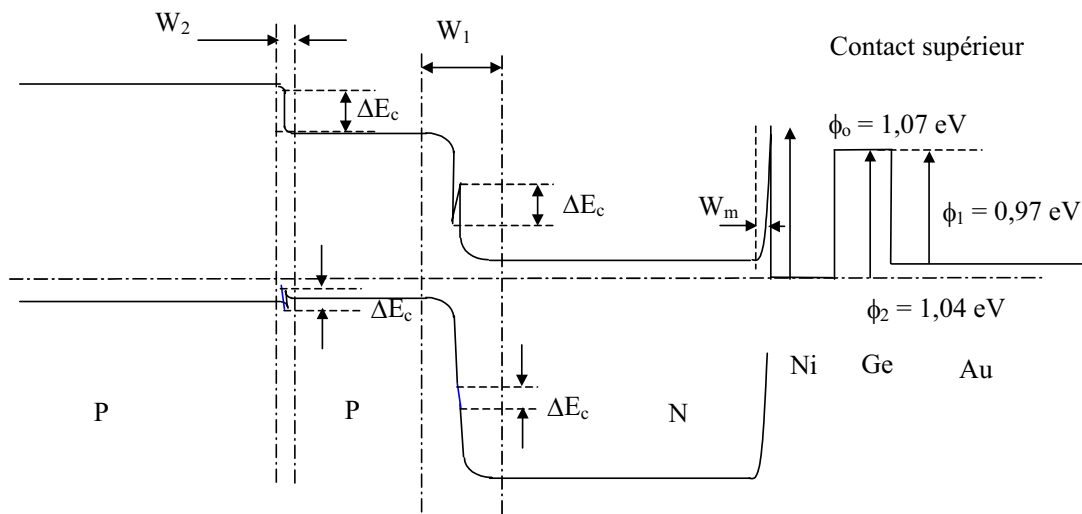


Figure 101 – Schéma de bande du contact ohmique supérieur

La variation de ϕ_m obéit à la loi des propriétés physiques de composé binaire Au/Ni et/ou Ge/Ni [73]. L'affinité électronique de l'or est de 5,1 eV, celle du germanium de 4,13 eV et celle du nickel de 5,15 eV. L'affinité électronique du mélange est susceptible d'augmenter en satisfaisant aux lois des composés binaires. La barrière de potentiel aura donc tendance à augmenter. La modification de cette barrière introduite par des intermétalliques peut être suffisamment positive (quelques meV) pour accroître la résistance du contact.

□ Dégradation de la colle

La colle située au niveau inférieur du dispositif est chargée à l'argent afin de réaliser un contact électrique avec un minimum de résistivités. Cet adhésif conducteur est haute température car il comporte des similitudes de constitution avec des adhésifs conducteurs caractérisés dans la littérature [74]. La température de jonction est d'environ 450 K (177 K) pour une température de boîtier de 300 K (+27°C). La puce ayant une épaisseur faible, on peut considérer que la température du joint de colle est voisine de la température de la jonction (voir annexe B.1).

La figure 90 montre que l'augmentation de la résistance est effective sur les 600 premières heures pour l'ensemble des DELs. En effet, elle atteint son maximum entre 600 et 800 heures de vieillissement. Une autre hypothèse probable peut être reliée à l'augmentation de la résistance série due à une modification des propriétés conductrices de l'adhésif sous l'effet du couple temps-température [75]. Dans de nombreux travaux, il a été montré que la résistance électrique de l'adhésif augmente en fonction de ce couple temps-température [74, 75, 76]. Nous observons le même comportement pour la résistance série des DELs qui comprend la résistance de l'adhésif. La résistance série des DELs est évaluée à environ 2,3 Ω (voir tableau 14) et donc l'augmentation de 30 % correspond à 690 m Ω . Typiquement l'augmentation pour des joints collés, dans des conditions de vieillissement proches, est d'environ 500 à 1000 m Ω [74].

□ Diffusion de l'argent dans les couches d'or

Les grains constitués d'argent situés dans la colle sont susceptibles de diffuser dans l'or. Il a été montré que ce processus engendrait une augmentation de la résistance thermique et électrique [19]. Le phénomène physique est analogue à celui que l'on observe pour les intermétalliques. Le mécanisme est cependant plus complexe car contrairement au contact supérieur, la surface de contact entre les couches d'or et les grains d'argent n'est pas uniforme.

- Phénomène physique traduisant la diminution de R_s

Cette partie s'intéresse aux différents phénomènes physiques traduisant une diminution de la résistance série R_s . Cette évolution peut s'expliquer par plusieurs phénomènes physiques :

- Diffusions métalliques dans le semiconducteur

Le phénomène de diffusion de dopants dans les semiconducteurs est fréquent pour le GaAs. Suivant le matériau utilisé pour fabriquer la puce, on peut déterminer les métaux diffusant dans ce dernier. Pour les GaAs, on sait que l'or diffuse par contre le nickel est une barrière de diffusion [47, 77]. La conséquence directe est une chute de la résistance électrique du contact. La barrière de potentiel est aussi haute mais beaucoup plus étroite comme le montre la figure 102. La conduction peut alors s'effectuer par effet Tunnel et ainsi diminuer la résistance apparente du contact électrique.

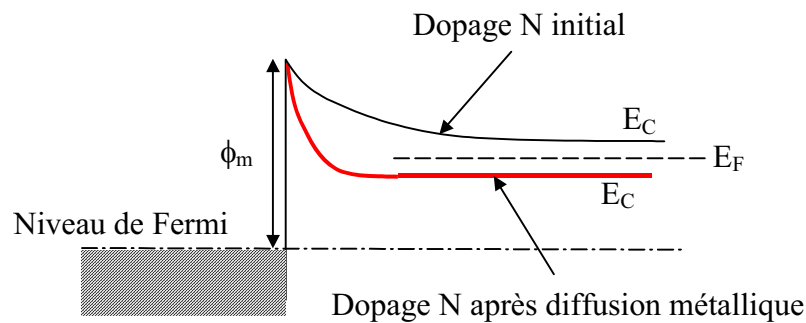


Figure 102 – Evolution du contact métal/semiconducteur en fonction du dopage

En considérant l'ensemble des conditions, on peut conclure que seul le contact inférieur est source de diffusion. L'or diffuse dans le semiconducteur sous l'effet de la température (358 K) et du courant (110 mA).

- Diffusions métalliques de l'or dans la colle

Ce phénomène physique s'explique par la réaction chimique entre la colle et le métal entourant cette dernière. Ce processus est fortement activé par la température. Le joint de colle a tendance à se dégrader et favorise la migration de l'or. La concentration d'or dans un même lieu peut induire la création de "pinhole"¹⁶ au sein de la colle qui perturbe la valeur de la résistance (diminution en générale).

L'ensemble des possibilités pour expliquer la variation de la résistance série est donc étendu. La prochaine section va permettre de discriminer les causes de la variation de la résistance série en utilisant une analyse MEB.

- Résultats expérimentaux par micro-sections et imagerie MEB

Afin de confirmer nos hypothèses sur la dégradation des contacts, nous avons effectué une campagne de micro-sections et des observations au microscope électronique à balayage (MEB).

Nous avons observé la partie du joint collé de la DEL A3 correspondant à une augmentation de R_s d'environ 40 %. La figure 103 représente l'image MEB de l'interface puce support Fe/Ni.

¹⁶ Pinhole : Migration de métal à travers une couche mince d'isolant

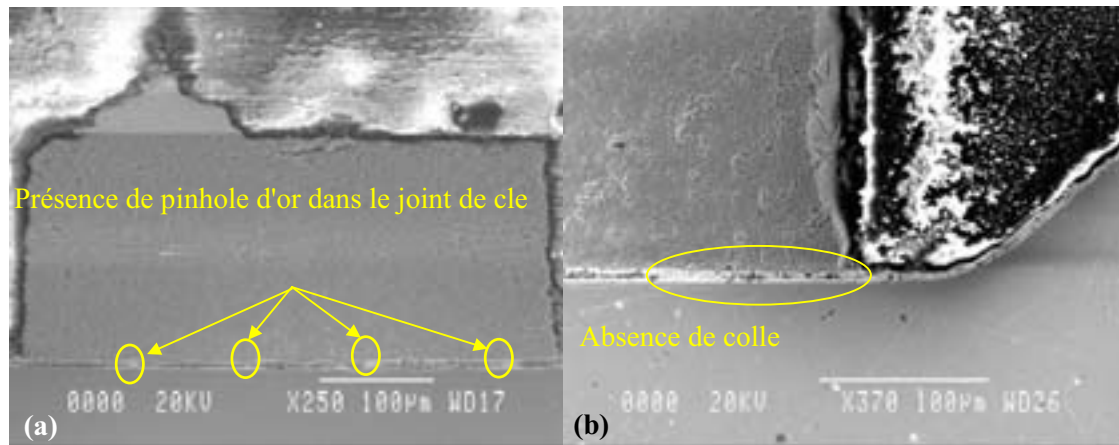


Figure 103 - Photographie MEB représentant le contact inférieur de la DEL A3

On observe deux phénomènes très importants :

- Absence de colle au sein du joint et présence de "pinholes" (figure 103a),

L'absence de colle montre que cette dernière a progressivement migré vers l'extérieur de l'interface diminuant ainsi la surface de contact entre la puce et le support. Il en résulte une augmentation de la résistance électrique :

$$R = \frac{\rho_{co} \times e_{co}}{S} \quad \text{E III-21}$$

où ρ_{co} représente la résistivité de la colle (en $\Omega.m$)
 e_{co} est l'épaisseur moyenne de la colle
 S est la surface de contact

Nous expliquons par ce phénomène l'augmentation de la résistance série qui est la somme de toutes les résistances de contact et de zones neutres.

- Présence et propagation latérale des "pinhole" (figure 103b).

La présence de "pinholes" traduit les conséquences de la diffusion de l'or dans la colle (figure 103a). Ce processus a tendance à diminuer la résistance électrique du joint. En effet, la résistivité de l'or ($\rho_{Au} = 2,2.10^{-6} \Omega cm^{-1}$) est très nettement inférieure à celle de la colle ($\rho_{co} = 0,01 \Omega cm^{-1}$). La propagation des "pinholes" d'or dans le plan du joint entraîne la diminution de la résistance série en dessous de sa valeur d'origine.

La figure 104 présente l'image MEB de la DEL A2. Le report de la puce à base de GaAs est réalisé à l'aide d'une brasure AuSn représentant un cas unique parmi les DELs considérées. Cette différence technologique peut expliquer la différence comportementale du paramètre R_s caractérisée par une diminution d'environ 30% après 1200 heures de vieillissement. La défaillance d'un joint de brasure soumise à un stockage thermique actif est généralement caractérisée par la diffusion métallique de l'étain exposée par **M. Fukuda [19]**. Les résistances électrique et thermique sont affectées et caractérisées par une augmentation de leur valeur rejetant donc cette hypothèse.

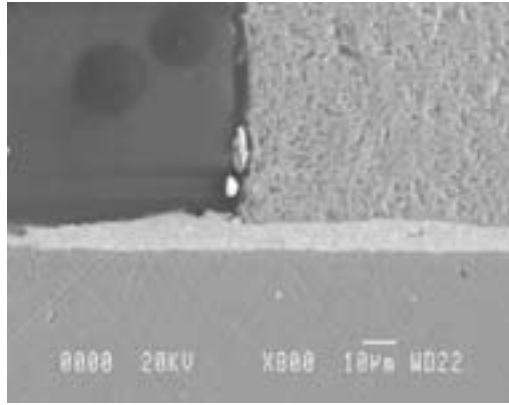


Figure 104 - Photographie MEB représentant le contact inférieur de la DEL A2

La forte présence d'or dans le joint de brasure implique une forte concentration d'or à l'interface puce/joint de brasure. Le phénomène de diffusion de l'or dans le GaAs peut être envisageable. Dans ce cas la dérive de la résistance du contact est caractérisée par une diminution de sa valeur. Dans la mesure où le phénomène physique de diffusion est fortement activé ($I = 110 \text{ mA}$, $T = 398 \text{ K}/+125^\circ\text{C}$), la diffusion de l'or peut atteindre les zones neutres, dont la résistance électrique diminue en fonction de la profondeur de diffusion. Cette hypothèse est la plus probable dans notre cas. Pour observer ce phénomène, il serait nécessaire d'utiliser des techniques de microanalyse lourdes et complexes comme le SIMS¹⁷ et TEM (voir chapitre I). D'une part, ces techniques ne correspondent pas au plan d'action que nous nous sommes fixé.

III.3.e / Synthèse des résultats

Cette partie a permis de préciser les mécanismes de défaillance des DELs 935 nm. Nous avons identifié trois types de mécanismes de dégradation induit par le stockage thermique actif :

- ❑ diffusion de centres recombinants dans la zone active,
- ❑ migration de la colle à l'extérieur du contact puce support,
- ❑ présence de "pinholes" d'or dans le joint de colle.

Nous venons de montrer que les mécanismes de dégradation exposés dans cette section sont activés par le courant d'alimentation des DELs lors du vieillissement et contribuent à une forte diminution de la puissance optique. Afin de confirmer la criticité du courant, nous avons mis au point une étude des paramètres exposés dans cette partie en fonction de ce dernier, à savoir P_{opt} , p et R_s . Nous pourrions déterminer avec exactitude la part de criticité réelle précise par le courant dans la dégradation des zones identifiées d'une part et déterminer la relation entre les signatures de défaillances et la perte de puissance optique d'autre part.

III.4 / Impact du courant sur la dérive des paramètres fonctionnels

Le paragraphe précédent a permis de déterminer les mécanismes de dégradation des DELs relatifs au vieillissement par stockage thermique actif ($+125^\circ\text{C}/110 \text{ mA}$). Ces mécanismes sont, à priori, activés par la contrainte environnementale critique : le courant d'alimentation (courant nominal $+10\%$). Afin de déterminer l'impact de cette contrainte environnementale sur la perte de puissance optique, nous avons effectué une campagne de vieillissements complémentaire prenant en compte des courants d'alimentation variable de 110 à 150 mA. Une étude préalable sur les DELs a permis d'évaluer la périodicité adéquate de reprise des mesures (voir partie III.1.b).

¹⁷ SIMS : Spectroscopie de Masse d'Ions Secondaires - Secondary Ion mass Spectroscopie

L'ensemble des résultats réunis permet d'argumenter notre discussion en vue d'atteindre deux objectifs principaux :

- confirmer la criticité du courant d'alimentation,
- observer les variations des paramètres électriques en fonction de la contrainte environnementale afin d'en déterminer l'impact sur la dégradation de la DEL.

Le travail préliminaire effectué sur cette phase n°3 de l'étude a permis d'observer que les mécanismes de dégradation étaient identiques à ceux observés précédemment. La différence réside seulement au niveau du temps pour lequel la chute de puissance optique franchie 20%.

Dans un souci de compléter l'étude, nous avons également regroupé les tests effectués dans les conditions de stockage passif et 40 composants ont été testés en stockage thermique à 398 K (+125°C) pour des courants de 0, 110, 125 et 150 mA. Le critère de défaillance est défini pour une diminution de 20 % de la puissance optique. Nous allons classer les différents composants par rapport à ce critère de défaillance. Nous avons relevé deux modes de dégradation sur l'ensemble des composants : graduel et rapide. Pour chacune des contraintes de courant, nous séparerons ces différents comportements : par des traits continus pour le mode défaillance graduel et discontinu pour le mode de défaillance rapide.

Les analyses de défaillance effectuées sur l'ensemble des composants utilisés pour cette partie ont révélé les mêmes signatures de défaillance que précédemment, à savoir :

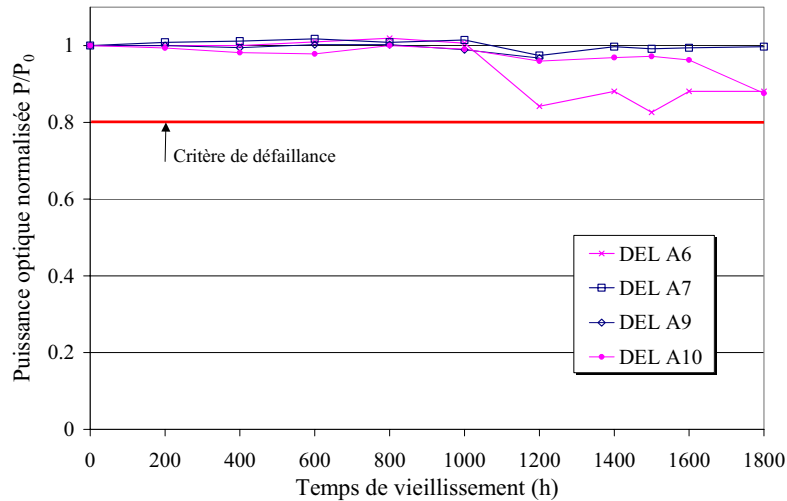
- ☞ la diminution de la pente du courant de recombinaison dans la zone II,
- ☞ les variations de la résistance série R_s .

III.4.a / Impact du courant sur la puissance optique

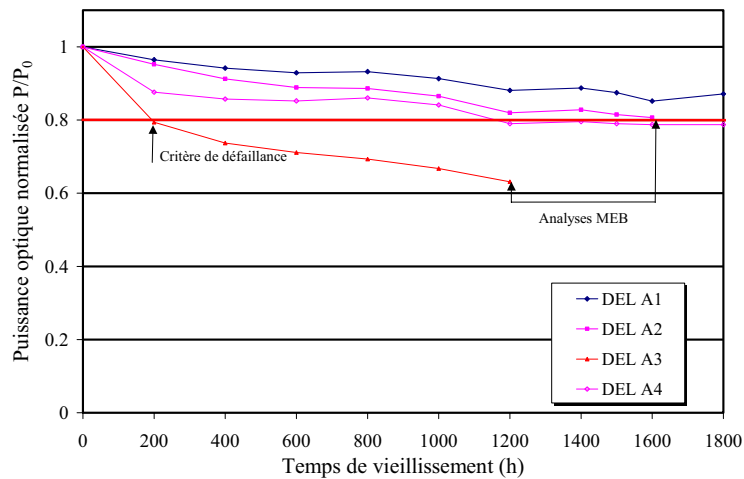
Cette section va permettre d'évaluer le comportement des DELs en fonction de la contrainte critique et en particulier le temps nécessaire pour observer une chute de puissance optique de plus de 20% dépendant de la contrainte en courant. L'intérêt est de déterminer deux paramètres de vieillissement étroitement liés : le temps pour lequel le critère de défaillance est atteint et le nombre de composants associés.

La figure 105 représente l'évolution de la puissance optique pour les DELs ayant subi un vieillissement dont la température est de 125°C pour des courants d'alimentation de 0 mA (figure 105a) et 110 mA (figure 105b).

Après 1800 heures de vieillissement, les DELs en stockage passif, n'ont pas atteint le critère de défaillance (figure 105a). On observe une perte de puissance optique d'environ 5 % sauf pour les DEL n°8 et 9 dont la perte de puissance optique est d'environ 15 %. En revanche, l'alimentation en courant (110 mA) montre que 10% des DELs atteignent le critère de défaillance après 200 heures et 30% après 1600 heures.



(a) Evolution de la puissance optique pour le stockage passif



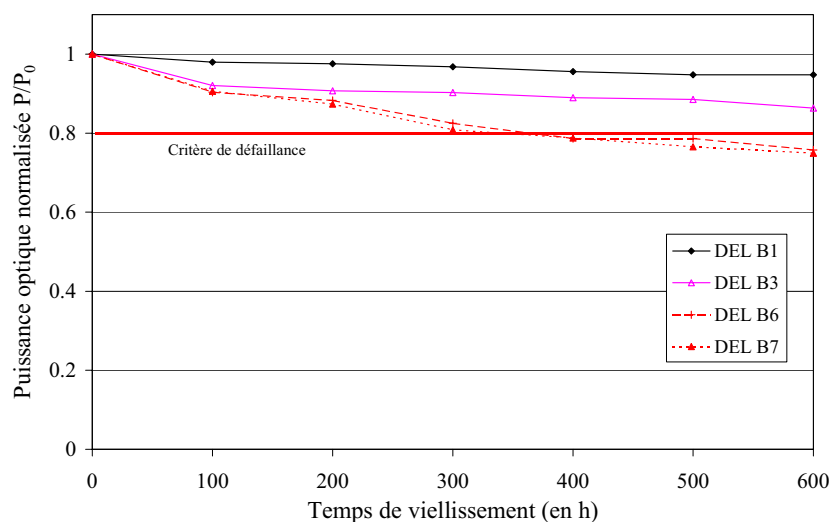
(b) Evolution de la puissance optique pour le stockage actif (110 mA)

Figure 105 – Mesures de puissance optique à 300 K (+27°C) en fonction du temps de vieillissement

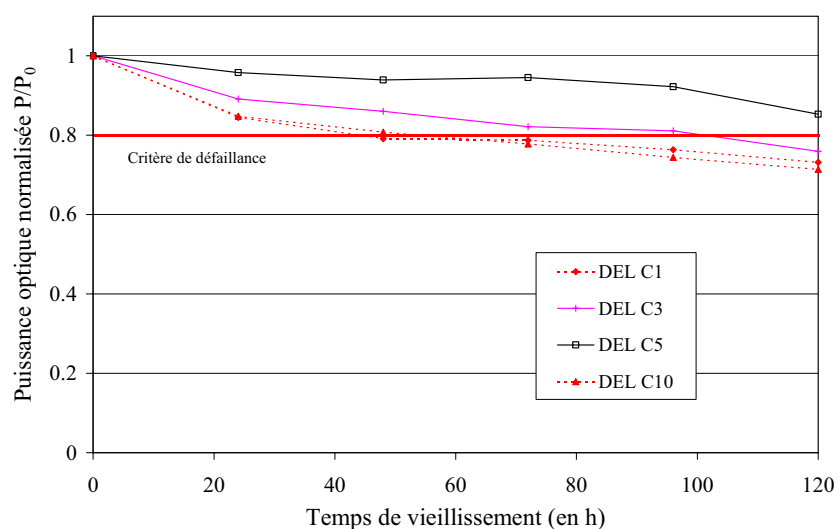
La figure 106 présente l'évolution de la puissance optique pour des conditions de vieillissement plus sévères : 125 mA (figure 106a) et 150 mA (figure 106b).

Pour la condition de courant de 125 mA, nous avons observé une dégradation classée comme catastrophique pour deux DELs caractérisée par une chute de puissance optique d'amplitude 70% après 100 heures de vieillissement. Les résultats associés ont été écartés car les modes et les signatures de défaillance ne correspondent pas à l'étude menée dans la partie III.3. Après 400 heures de vieillissement, 40% des DELs ont atteint le critère de défaillance.

Pour la condition de courant de 150 mA, on observe que 40% des DELs atteignent le critère de défaillance après 48 heures et 60% après 120 heures.



(a) Evolution de la puissance optique pour le stockage actif (125 mA)



(b) Evolution de la puissance optique pour le stockage actif (150 mA)

Figure 106 - Mesures de puissance optique à 300 K (+27°C) en fonction du temps de vieillissement

Le tableau 22 rassemble les diminutions relatives de la puissance optique des DELs après 100 heures de vieillissement. Pour les contraintes en courant I_a variant de 0 à 100 mA, une interpolation de la chute de puissance optique a été effectuée. De ce fait, il est possible de déterminer l'impact de la contrainte critique échelonnée sur la perte de puissance optique. Les résultats du tableau 22 renforcent la démonstration visant à montrer que le courant d'alimentation I_a est bien la contrainte critique.

	0 mA	110 mA	125 mA	150 mA
diminution de P_{opt} après 100 heures	$\Delta P_{opt} < 2 \%$	$4 \% < \Delta P_{opt} < 10 \%$	$4 \% < \Delta P_{opt} < 10 \%$	$10 \% < \Delta P_{opt} < 30 \%$

Tableau 22 – Impact des contraintes en courant sur la diminution de la puissance optique

Le tableau 23 rassemble les informations sur les quatre vieillissements : stockage thermique à +125°C pour des courants I_a de 0 mA, 110 mA, 125 mA et 150 mA. L'ensemble des résultats confirme que le courant est le facteur aggravant pour la perte de puissance optique.

Vieillessement	0 mA	110 mA	125 mA	150 mA	
48 heures	0	0	0	40	Taux de défaillance (%) ¹⁸
96 heures	0	0	0	60	
300 heures	0	10	40	×	
1200 heures	0	20	×	×	
1800 heures	0	30	×	×	

Tableau 23 – Impact des contraintes en courant sur le taux de défaillance

Les analyses de signature de défaillance ont été réalisées pour les vieillissements pour des courants I_a de 125 mA et 150 mA. Il ressort de cette étude que les signatures de défaillance sont communes à l'ensemble des vieillissements. Le taux de défaillance pour les contraintes en courant I_a de 125 et 150 mA est bien plus élevé que celui évalué pour la contrainte en courant I_a de 110 mA. Les vieillissements pour des courants de 125 mA et 150 mA correspondent bien à des tests accélérés. La figure 107 représente le taux de défaillance en fonction du temps de vieillissement pour les différentes valeurs de contrainte en courant.

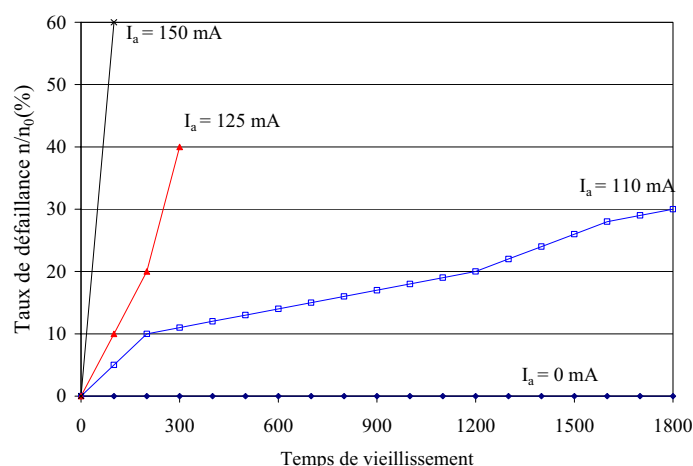


Figure 107 – Evolution de taux de défaillance pour différentes valeurs de contrainte en courant

III.4.b / Impact du courant sur la variation du paramètre p

Cette partie permet de déterminer l'impact du courant d'alimentation sur la variation du paramètre p défini comme étant la pente du courant de recombinaisons dans la zone II (voir chapitre II). Afin de simplifier l'étude, nous avons rassemblé les évolutions du paramètre p des différentes DELs, pour un temps de vieillissement de 100 heures permettant ainsi de les comparer pour chaque contrainte de courant. Le tableau 24 réunit l'ensemble des relevés pris sur l'ensemble des DELs étudiées.

¹⁸ Taux de défaillance : nombre de composant atteignant le critère de défaillance pour un vieillissement divisé par le nombre total de composant testé pour ce même vieillissement

	0 mA	110 mA	125 mA	150 mA
diminution de p après 100 heures	$\Delta p < 2,5 \%$	$4\% < \Delta p < 7\%$	$5\% < \Delta p < 9\%$	$8\% < \Delta p < 13\%$

Tableau 24 – Impact des contraintes en courant sur la dérive du paramètre électrique p

Comme nous l'avons remarqué dans la section III.3, le courant d'alimentation active la diminution de la valeur de **p**. Le phénomène de diffusion de centres recombinants est activé thermiquement. La température de la jonction augmentant avec le courant d'alimentation, il existe donc une relation entre le courant d'alimentation et la diffusion de centres recombinants.

Nous en déduisons que le courant est un facteur aggravant pour le paramètre **p**. Le courant active la diffusion de centres recombinants dans la zone active. La diffusion des dopants dans cette zone diminue la durée de vie des porteurs augmentant le taux de recombinaisons non-radiatives et se traduit par une perte de puissance optique [70]. Le paramètre **p** peut être mis en relation avec la perte de puissance optique comme l'indique la figure 108. Dans le cas des composants considérés, le critère de défaillance appliqué pour la puissance optique peut donc être transposé pour le paramètre électrique **p** et est égal à 4,5%.

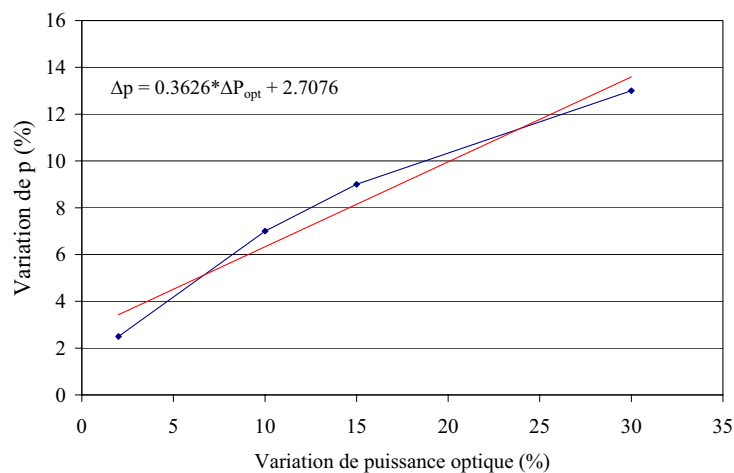


Figure 108 – Relation entre Δp et ΔP_{opt} pour un temps de vieillissement de 100 heures

III.4.c / Impact du courant sur la variation de R_s

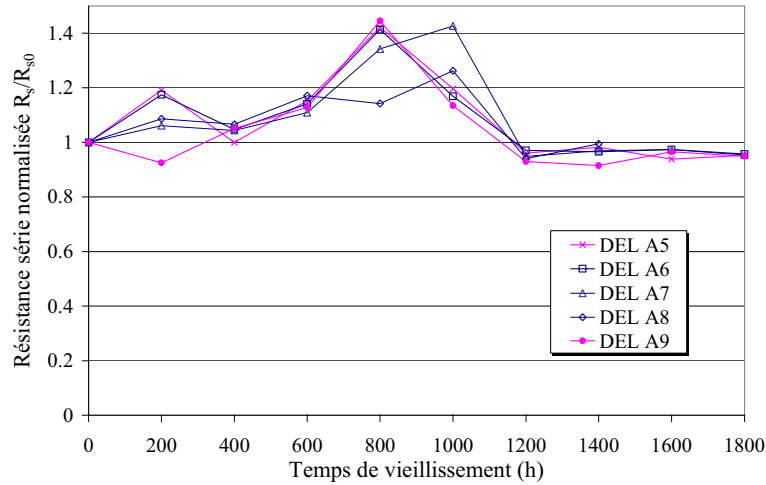
Cette dernière partie traite de la variation de la résistance série en fonction du courant d'alimentation. Nous allons présenter, dans un premier temps, l'ensemble des résultats en fonction des contraintes de courant. Nous allons établir l'existence ou non d'une relation entre la perte de puissance optique et la variation de R_s .

- Evolution du paramètre R_s en fonction du courant d'alimentation

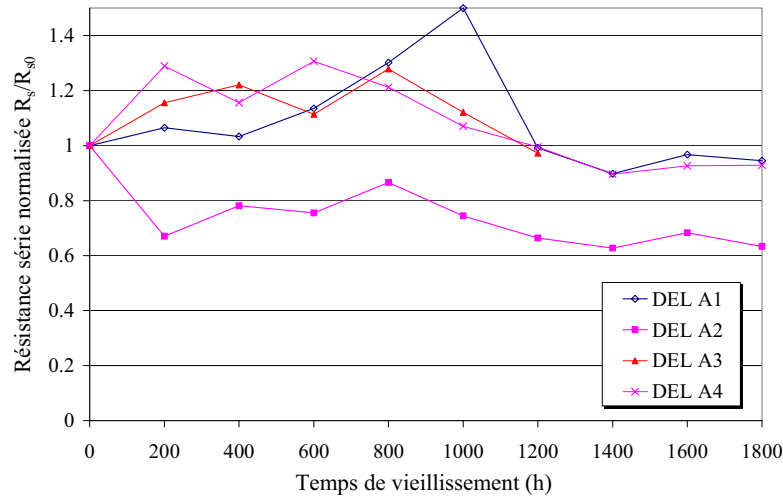
La figure 109 présente les variations de la résistance série en stockage passif (figure 109a) et en stockage actif sous 110 mA (figure 109b). On observe un double comportement de la résistance série :

- ☞ une augmentation de R_s jusqu'à 800 à 1000 heures de vieillissement,
- ☞ une diminution de R_s à partir de 1000 à 1200 heures de vieillissement jusqu'à 5% de la valeur initiale R_{s0} .

Par la suite, la résistance série des DELs diminue en dessous de sa valeur d'origine d'environ 5%.



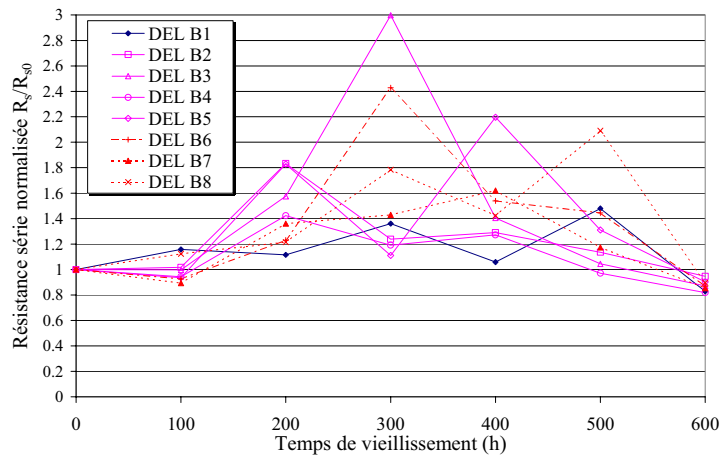
(a) Evolution de R_s pour le stockage passif



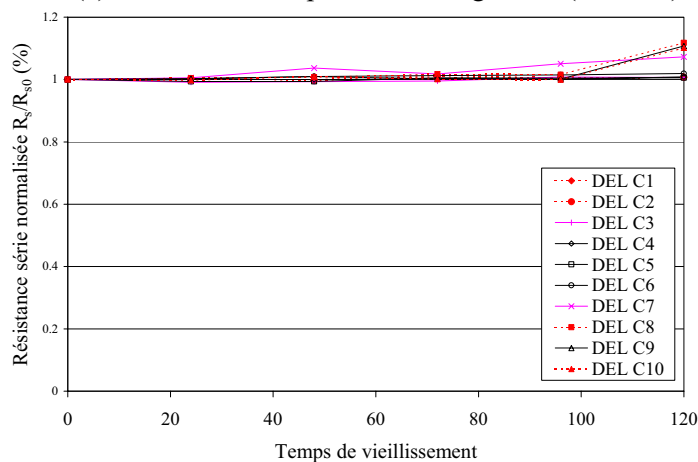
(b) Evolution de R_s pour le stockage actif (110 mA)

Figure 109 – Représentation de la résistance série en fonction du courant à 300 K (+27°C)

La figure 110 présente l'évolution de la résistance série des DELs dont la contrainte en courant est de 125 mA et 150 mA. Dans la figure 110a, on observe une forte augmentation de la résistance série d'environ 150 % pour environ 300 heures de vieillissement alors que dans la figure 110b, on remarque quasiment aucune variation de la valeur de la résistance série. La diminution de la résistance série atteint cette fois 15 % en moyenne (figure 110a).



(a) Evolution de R_s pour le stockage actif (125 mA)



(b) Evolution de R_s pour le stockage actif (150 mA)

Figure 110 - Représentation de la résistance série en fonction du courant à 300 K (+27°C)

Nous allons, à présent, traduire l'impact de l'augmentation du courant d'alimentation sur l'évolution du paramètre R_s .

- Impact des contraintes sur les variations de R_s ,

Nous allons débuter cette section en démontrant que la chute de puissance optique est décorrélée de la variation de la résistance série. En effet, pour la contrainte de courant à 150 mA, on observe une chute de puissance optique d'environ 40% (figure 106b) alors que la résistance n'évolue quasiment pas. Dans le cas du stockage passif, la puissance optique évolue très peu (figure 105a) alors que l'augmentation de la résistance série est d'environ 40%. Nous pouvons conclure que la diminution de la puissance optique des DELs n'est pas corrélée à une variation de résistance série et donc :

- La chute de puissance optique est reliée à l'augmentation du courant,
- La variation de R_s est liée à une activation en température.

Evaluons, à présent, l'impact des contraintes en courant sur le paramètre R_s . Le courant d'alimentation crée une augmentation de la température au sein de la zone active (voir annexe B.1). Le rendement du système étant évalué à 5%, les 95 % restant sont transformés en énergie calorifique induit par :

- ☞ L'effet Joule au sein de la DEL exprimé par la relation : $E = R_s I^2 t = m C_p \Delta T$ avec m la masse des parties ohmiques de la DEL et C_p la capacité calorifique du matériau GaAs.
- ☞ Le phénomène de recombinaisons non-radiatives donnant naissance à des phonons conséquence de la vibration du réseau cristallin du matériau GaAs constituant la DEL.

Ceci se traduit par l'augmentation de la température de la jonction induisant un fort gradient thermique à l'interface puce/boîtier dû à la résistance thermique de l'adhésif. Le gradient de température s'appliquant au joint de colle est généralement une cause de défaillance de ce dernier. La propagation des défauts dépend de deux paramètres : le gradient thermique et le temps de vieillissement. Des études, menées au Laboratoire IXL, ont permis de mettre en relation la propagation des défauts au sein du joint collé avec le gradient thermique d'une part et le temps de vieillissement d'autre part. Il en résulte donc une corrélation entre le vieillissement de la colle, le courant injecté et le temps de vieillissement.

La dégradation de la colle se traduit par une augmentation de la résistance du joint lors de l'application des contraintes de courant de 0 mA, 110 mA et 125 mA. Dans le cas de la contrainte de courant à 150 mA, le temps de vieillissement est trop court pour observer une dérive de la résistance série. Nous pouvons conclure que le couple temps- température active donc la dégradation de l'adhésif conducteur. Nous n'avons pas poursuivi les vieillissements pour $I = 150$ mA puisque le critère de défaillance sur la puissance optique était largement atteint.

La chute de la résistance série en dessous de sa valeur d'origine indique une diffusion de l'or dans la colle (voir section III.3.d). On observe que cette chute est la plus remarquable pour la contrainte de courant de 125 mA. En effet, on évalue à environ 15 % de chute de la résistance série dans ce cas contre 5% dans les autres cas (0 mA et 110 mA). Le courant active la diffusion de l'or dans la colle qui forme ainsi des pinholes. En ce qui concerne le vieillissement à 150 mA, la faible évolution de la résistance série ne permet pas de conclure dans ce cas.

III.5 / Synthèse des résultats

L'ensemble des résultats apportés dans les sections précédentes a permis de préciser les liens existant entre contraintes environnementales et mécanismes de dégradations. Il ressort plusieurs points qu'il est important de souligner :

- ❑ Les mécanismes de dégradation sont de deux types : dégradation de la zone active et dégradation de l'interface puce support Fe/Ni. Le mécanisme à relier avec la chute de puissance optique est la dégradation de la zone active.
- ❑ Les facteurs d'activation des mécanismes de dégradation sont de deux types : le courant pour les mécanismes de diffusion de centres recombinants et la température pour la dégradation du contact inférieur.
- ❑ Le facteur critique pour les DELs correspond au courant d'alimentation. Le mécanisme de diffusion des dopants N^+ affecte fortement la zone active. Il est à l'origine de la baisse de puissance optique.

Nous avons établi une relation entre la perte de puissance optique et la diffusion de dopant dans la zone active. La relation physique expliquant ce phénomène est développé dans la partie III.3. Ce type de défaillance a été largement évoqué dans la littérature pour des puces nues. L'intérêt de ce

travail est de montrer que l'on peut identifier les mécanismes de défaillance au sein de la puce située dans un module. Cet aspect est en adéquation avec les exigences d'un équipementier. De plus, l'indicateur de défaillance représenté par l'évolution du paramètre p est simple à évaluer.

L'étude complète montre que les DELs ne sont pas optimisées. Tout d'abord l'ensemble des DELs est prévu pour une puissance optique de 4,8 mW. L'analyse optique de l'ensemble des échantillons (75 au total) montre que la puissance moyenne d'émission est d'environ 10 mW. La chute de puissance optique pour des conditions de 398 K (110 mA) conduit à une chute de puissance optique d'environ 40% pour 1800 heures de fonction. Du fait que la puissance d'émission est d'environ 10 mW, les composants restent néanmoins opérationnels.

La dérive de puissance optique est relativement rapide 20% pour 1200 heures de vieillissement dans des conditions proches des spécifications extrêmes du constructeur. Elle est essentiellement prononcée dans les premières heures de vieillissement. Cela indique que la technologie utilisée n'est pas parfaitement robuste pour la contrainte environnementale de 398 K (+125°C)-110 mA.

En particulier, les analyses technologiques effectuées au cours des différentes conditions de vieillissement ont permis de souligner la faiblesse technologique du matériau de report (adhésif), relativement peu adapté aux profils de mission fournis par le constructeur. La solution plus adéquate serait d'utiliser une brasure haute température, AuSn par exemple, avec une barrière de Nickel stoppant la diffusion de l'or dans le composant.

IV / TÊTES OPTIQUES FABRY-PÉROT EMETTANT A 1310 nm

Les têtes optiques Fabry-Pérot 1310 nm sont des systèmes prévus pour une émission à travers une fibre optique pour des applications de télécommunication. La capacité d'adaptation du banc électro-optique a permis d'effectuer les mesures électriques et optiques à des températures comprises entre 233 K (-40°C) et 363 K (+90°C). Nous avons choisi d'étudier ce système pour deux raisons importantes :

- ❑ les applications utilisant des têtes optiques pour les télécommunications représentent notre centre d'intérêt majeur,
- ❑ le système est le plus simple des modules optoélectroniques contenant une diode laser.

Pour cette partie du travail, nous avons mis en avant les qualités du banc pour la détection des signatures de défaillance. En effet, les mesures électro-optiques très fines permettent d'observer une évolution faible des courbes $I(V)$, $P(I)$ et $L(E)$ reliée à des défaillances de faibles amplitudes. En les corrélant aux signatures de défaillances bien connues sur diodes laser, nous pourrions alors déterminer les mécanismes de défaillance au sein de ces dernières situées dans les modules étudiés.

Pour détailler l'étude engagée des têtes optiques, le déroulement de la campagne de vieillissement est exposé dans la prochaine partie.

IV.1 / Déroulement de la campagne de vieillissement

Cette partie permet de déterminer le déroulement de la campagne de vieillissement sur les têtes optiques Fabry-Pérot InGaAsP/InP 1310 nm. Notre étude consiste à identifier les mécanismes de dégradation provenant de la puce et de les décorréler des défaillances de type assemblage.

Cette partie s'oriente suivant deux axes :

- ❑ déterminer les différents profils de mission,
- ❑ en déduire le déroulement de la campagne de vieillissement.

Pour l'étude envisagée, 15 têtes optiques ont été utilisées et dédiées à certaines utilisations qui seront développées dans les prochaines sections. Nous allons débiter par la description des profils de mission.

IV.1.a / Profils de mission

Les profils de missions sont définis par le constructeur et par les caractéristiques des têtes optiques décrites dans le tableau 25.

Paramètres fournis par le fabricant	Valeurs à 293 K/+20°C)
P_{opt} : Puissance optique (@ I _{th} + 20 mA)	0,3 à 4 mW
T_{utile} : Température d'utilisation	233 K (-40°C) à 358 K (+85°C)
I_{th} : courant de seuil	10 mA
λ_{pic} : longueur d'onde d'émission	1310 nm
Δλ : largeur spectrale (@ I _{th} +20 mA)	3 nm

Tableau 25 – Liste des paramètres constructeurs

Les applications possibles sont les transferts de données par fibre optique pour des applications de télécommunication. Les têtes optiques fonctionnent avec un courant modulé permettant un débit de 640 Mbits/s. Les standards de qualification réglementés par la norme IEC 68-2-14 nous ont conduit à considérer uniquement des vieillissements par cycles thermiques que nous caractériserons dans la suite.

Le faible nombre d'échantillons (15 au total), nous a conduit à considérer la contrainte environnementale susceptible d'activer les dégradations au niveau de la puce et au niveau de l'assemblage. Pour cela, une large recherche bibliographique relative à des têtes optiques de télécommunications montre que les cycles thermiques sont les contraintes extérieures les plus pertinentes et les plus utilisées [19, 36].

Notre souci est de déterminer les températures minimales et maximales des cycles thermiques afin d'obtenir un facteur d'accélération de vieillissement optimum [19]. Ce facteur d'accélération doit être suffisamment ajusté pour observer des défaillances des composants après une durée de vieillissement réduite (moins de 500 cycles thermiques) mais pas trop élevé pour ne pas induire de défaillances catastrophiques compte tenu du caractère multiprocédés de ces technologies. De nombreuses études de fiabilité sur les têtes et systèmes optiques ont montré que, pour des conditions de vieillissement par cycles thermiques 233 K/358 K (-40°C/+85°C), les durées de vie pouvaient atteindre 10000 heures avec un facteur d'accélération d'environ 20 et nécessitent des centaines de composants [78, 79]. Ce travail n'étant pas notre objectif, nous avons donc choisi d'augmenter les contraintes en température par rapport aux températures préconisées par le fabricant afin d'effectuer des vieillissements ayant un facteur d'accélération de 100. La température maximale a été fixée à 373 K (+100°C) et la température minimale à 218 K (-55°C). Après examen des résultats de vieillissement, il apparaît, après moins de 500 cycles thermiques, que la majeure partie des têtes optiques ayant subi ces conditions de vieillissement ne s'est pas dégradée de manière catastrophique mais selon des modes de défaillance déjà identifiés par **M. Fukuda** [19].

IV.1.b / Déroulement de la campagne de vieillissement

Dans son approche, cette campagne est similaire à celle menée pour l'identification des signatures de défaillance des DELs 935 nm. Elle se compose de deux phases différentes que nous présentons dans l'ordre chronologique. Une phase préliminaire a été nécessaire pour déterminer le point de départ de l'étude.

- Phase n°0 – étude préliminaire (15 têtes optiques)

Cette phase comporte deux points essentiels différents :

- *Analyses technologiques*

Afin de déterminer les matériaux utilisés pour l'assemblage de la tête optique, nous avons effectué des analyses de microsections par MEB et par EDX. Nous avons utilisé 2 échantillons afin d'obtenir deux plans de coupe complémentaires que nous détaillerons dans la prochaine section.

- *Analyses électro-optiques - modélisation*

La deuxième partie de cette phase consiste à déterminer les paramètres électro-optiques de la tête optique dans les conditions initiales, c'est à dire sans vieillissement. Nous avons effectué le relevé des paramètres sur l'ensemble des têtes optiques (13 composants dédiés à la mesure électro-optique). Cette deuxième partie se traduit par l'extraction du modèle que nous traiterons dans la prochaine partie. Nous avons établi les températures extrêmes pour les mesures électro-optiques de 233 K (-40°C) et 363 K (+90°C) pour les courbes I(V) et 260K (-13°C) à 363 K (+90°C) pour les spectres optiques. Les mesures optiques en dessous de 260 K (-13°C) n'ont pas été satisfaisantes et ont été supprimées. A contrario, pour les températures préconisées, la dispersion des mesures est inférieure à l'erreur de mesure définie dans le chapitre II.

- Phase n°1 – identification et analyse des signatures de défaillance (12 pièces)

La phase n°1 s'intéresse à l'identification et l'analyse des signatures de défaillance. Nous classerons ces signatures en deux parties :

- Signatures de type électrique et optique
- Signatures optiques

Nous utiliserons le modèle électrique équivalent afin de déterminer le(s) paramètre(s) qui ont évolué(s). Nous pourrions alors identifier les zones dégradées relatives à la diode laser.

- Phase n°2 – mise en évidence de l'intérêt des mesures électriques en inverse (6 pièces)

Cette dernière phase est utile car une des analyses électro-optiques de la phase précédente a montré une incohérence entre les mesures électriques et optiques. Le fait d'effectuer des mesures électriques inverses permet de préciser les signatures de défaillances à très bas niveau de courant. En effet, la plage de tension pour laquelle on observe un courant très bas niveau est beaucoup plus importante qu'avec une mesure classique.

Nous avons ajouté les 6 têtes optiques dédiées à cette mesure aux résultats présentés dans la phase n°1. Cela a permis de rassembler l'ensemble des signatures de défaillance observées pour les conditions fixées au préalable. De ce fait, nous pourrions souligner l'importance des mesures électriques inverses pour l'analyse des signatures de défaillances comportant de faibles dérives des paramètres mesurés.

- Synthèse de l'étude des têtes optiques

Cette section permet de réunir les principales phases du déroulement de la campagne de vieillissement afin de permettre une meilleure lecture des résultats exposés dans les prochaines parties.

Phase de l'étude	Nombre de composant utilisé	Description rapide
n°0	15	2 pièces pour les analyses technologiques 1 pièce de référence pour les mesures électro-optiques 12 pièces pour les mesures électro-optiques initiales. Objectif : établir le modèle de la tête optique.
n°1	12	12 pièces en vieillissement par cycles thermiques 233 K/ 373 K (-40°C/+100°C). Objectifs : Identifications et analyses signatures de défaillances pour des cycles thermiques 218 K/ 373 K (-55°C/+100°C).
n°2	6	6 pièces en vieillissement par cycles thermiques 233 K/ 373 K (-40°C/+100°C). Objectifs : Identifications et analyses signatures de défaillances pour des cycles thermiques 218K/373K (-55°C/+100°C) avec la méthode de mesures complémentaires I(V) en inverse.

Tableau 26 – Déroulement de l'étude des vieillissements des têtes optiques 1310 nm

IV.2 / Caractérisation initiale de la tête optique

L'analyse de défaillance des têtes optiques requiert une caractérisation afin d'extraire un modèle électrique et une structure générique. Pour cela nous avons effectué des analyses par MEB / EDX et analyses électro-optiques. Notre objectif est de donner une représentation de la tête optique dans son ensemble pour des applications adaptées aux équipementiers. L'analyse technologique permettra essentiellement de déterminer l'environnement proche de la diode laser et l'alignement optique de l'ensemble. L'analyse électro-optique permettra de modéliser la diode laser au sein du module et d'évaluer son interaction avec l'assemblage et/ou l'encapsulation

IV.2.a / Evaluation technologique

Les figures 111 et 112 présentent deux coupes de la tête optique suivant deux plans perpendiculaires. Ces dernières sont centrées sur la diode laser et représentent l'alignement optique de la tête. Pour l'environnement proche de la diode laser, nous observerons essentiellement les contacts supérieurs et inférieurs. Afin de guider l'analyse chimique de l'ensemble, nous avons utilisé les travaux de **A.R. Mickelson, G.R. Dohle et M.S. Cohen [80, 81, 82]** et, pour l'environnement proche de la diode laser, les travaux de **Q. Tan et M. Itoh [83, 84]**.

- Alignement optique

La tête optique que nous décrivons est constituée d'une diode laser, d'une lentille de collimation, d'une lentille de focalisation et d'une fibre optique. La figure 112 et la figure 113 représentent cet ensemble. Nous allons décrire la constitution de cette partie de la tête optique en donnant les différents matériaux utilisés.

La diode laser multipuits quantiques à double hétérostructure (InP/InGaAsP) à cavité Fabry-Pérot (360 μm \times 360 μm \times 150 μm) est brasée sur une embase AlN à l'aide d'une brasure Au(80%)-Sn(20%). Le support de l'ensemble diode laser est constitué de Fe/Ni (Invar). Le contrôle de la puissance optique de sortie de la diode laser est réalisé au moyen d'une photodiode de contrôle. Elle est constituée à base d'InP et brasée sur un support en Invar par une brasure Au(80%)-Sn(20%).

L'ensemble diode laser et photodiode repose sur une embase en Invar recouvert d'une couche mince d'or encapsulé à l'aide d'un capot de même constitution que l'embase. Ce capot est hermétiquement fermé par la lentille de collimation (SiO_2), elle-même brasée par un joint en Ti-Pb. Cet ensemble est brasé sur l'embase avec un eutectique Ni-Au. L'ensemble est maintenu à l'aide de tir laser Nd : YAG à 120° dans un corps cylindrique (Invar) constituant le centre de la tête optique. La lentille sphérique (SiO_2) est maintenue dans le guide central (Invar) à l'aide d'une colle de type époxy que l'on ne peut déterminer par une analyse EDX. L'ensemble est maintenu par tir laser Nd : YAG entre le corps central et la partie fibre optique. Cette dernière partie est constituée de trois pièces : un guide férule (Invar) soudé YAG à l'extrémité du guide central, à l'intérieur, une férule en Zirconium contenant elle-même la fibre optique.

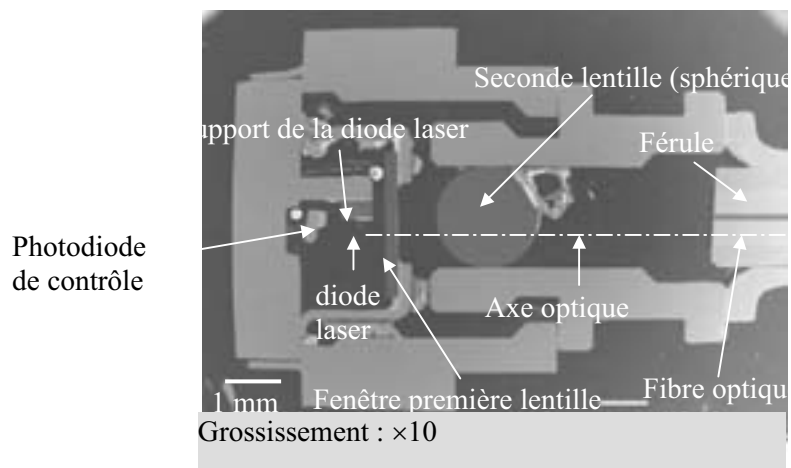


Figure 111 - Coupe suivant l'axe optique de la tête optique centrée sur la diode laser

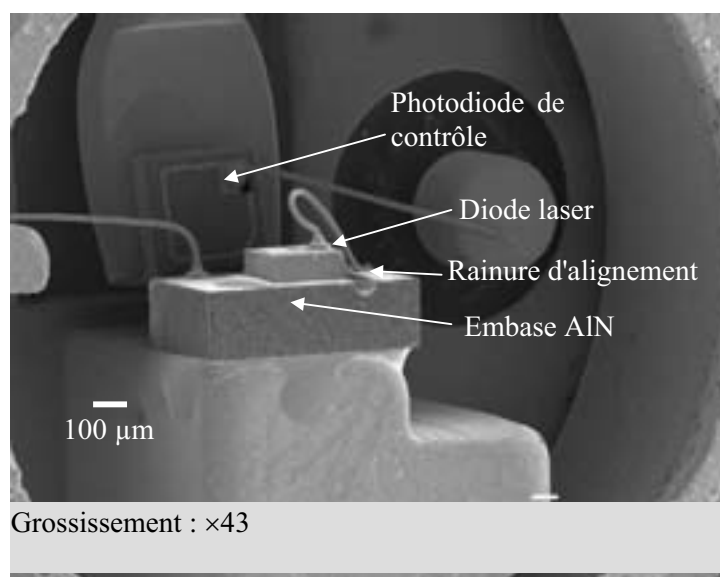


Figure 112 – Coupe perpendiculaire à l'axe de la tête optique centrée sur la diode laser

- Environnement proche de la diode laser

Compte tenu de la très forte intégration de ce composant, la résolution offerte par les analyses MEB limite l'étude de la diode laser au niveau des contacts. La figure 113 présente la structure générique de la diode laser avec une image MEB représentant la vue extérieure de la zone active. La

diode laser utilisée est à hétérostructure enterrée avec un confinement latéral réalisé à l'aide d'une double gravure en rainure (DCBH).

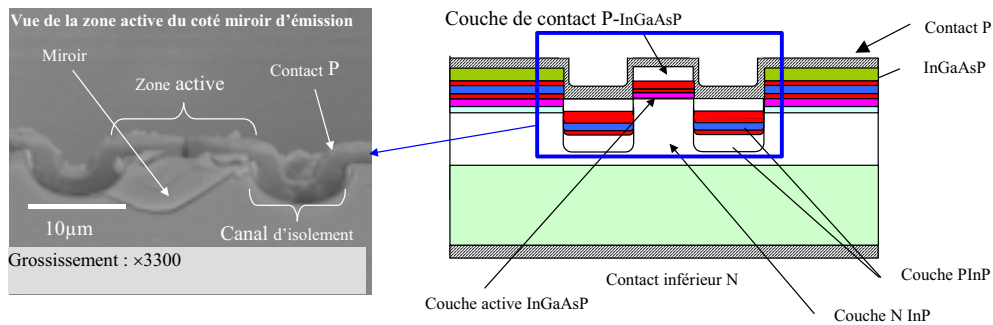


Figure 113 - Structure de la diode laser DCBH avec les contacts supérieurs et inférieurs

La structure schématique de ce type de structure est donnée d'après **M. Fukuda [19]**. Le contact inférieur est effectué avec une couche mince Au/Ge/Ni (5 µm). Le contact supérieur est réalisé par des couches métalliques superposées Ti/Pt/Au (1µm). Nous allons, à présent, caractériser la tête optique au moyen d'analyses électro-optiques.

IV.2.b / Caractérisation électro-optique et modélisation électrique de la tête optique

Les analyses électro-optiques effectuées sur la tête optique sont réalisées sans modifier l'intégrité de cette dernière. L'alimentation de la diode laser s'effectue sur les broches prévues à cet effet à l'aide d'un connecteur adapté. La photodiode n'est pas alimentée pendant les mesures. La lecture optique s'effectue à partir du connecteur FC avec un adaptateur pour le montage sur le monochromateur et la sphère intégration. Les mesures sont effectuées pour des températures allant de 233 K à 363 K (-40°C à +90°C).

- **Caractéristiques électriques – modèle associé**

Cette section permet de présenter les caractéristiques électriques d'une tête optique ainsi que ses courbes dérivées : $\eta(I)$ et $\eta(V)$ (voir chapitre II). L'ensemble des courbes nous permet d'extraire les paramètres électriques utiles pour construire le modèle de la tête optique.

La figure 114 représente les caractéristiques courant-tension d'une tête optique. Nous avons tracé ces courbes en échelle linéaire $I(V)$ et semi-logarithmique $\text{Log}I(V)$ pour les températures de mesure de 260, 300 et 363 K (-13°C, +27°C et +90°C). La courbe $I(V)$ permet d'évaluer la résistance série R_s ainsi qu'une valeur approchée de la tension de seuil V_{th} . La courbe $\text{Log}I(V)$ permet d'extraire le courant de recombinaison I_r , le courant de saturation I_s et le facteur d'idéalité η avec une précision acceptable.

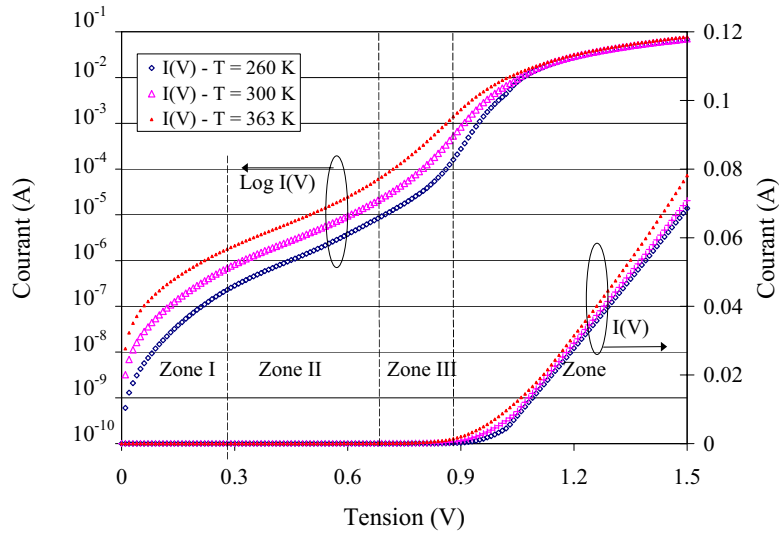


Figure 114 – Courbes $\text{Log}I(V)$ et $I(V)$ en fonction de la température

En effectuant l'extraction des paramètres de chaque zone conformément au chapitre II, nous avons observé que la pente p de la zone II était d'environ 10 pour $T = 300 \text{ K}$ ($+27^\circ\text{C}$). Typiquement, cette valeur est de 20. On ne peut donc pas considérer que la zone II correspond aux mécanismes de recombinaison. En effet, les recombinaisons de porteur dans la zone active sont caractérisées par l'équation :

$$I = I_r \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad \text{E IV-1}$$

Avec I_r le courant de saturation associé aux recombinaisons totales dans la zone active de la diode laser. Pour une température 300 K ($+27^\circ\text{C}$), la mesure de la pente p de la courbe $\text{Log} I(V)$, égale à 20, démontre que ce phénomène est généralement associé aux recombinaisons de porteurs dans la zone active. Lorsque la valeur de la pente p de la courbe $\text{Log}I(V)$ est de 10, le phénomène associé correspond aux fuites latérales de courant de la diode laser [85]. Nous considérerons alors la zone I et II comme étant une zone équivalente, appelée zone I', traduisant les courants de fuite de la diode laser. La première partie de cette zone correspondant à la zone I est une zone purement ohmique caractérisée par R_{sh1} . Le reste de la zone I' correspond à la partie non-linéaire de R_{sh} (R_{sh2}).

L'analyse des courbes $\text{Log}I(V)$ et $I(V)$ suscite de nombreuses interrogations :

- La résistance de fuite est fortement non-linéaire. Le comportement de cette dernière peut être représenté par un polynôme. Cependant, l'amplitude du courant caractérisant ce phénomène est supérieur à $0,1 \mu\text{A}$. Cette dernière est trop élevée pour supposer que la conduction soit externe à la structure. Il est donc probable que cette conduction soit interne et donc relié à un mécanisme de jonction PN.
- Le courant de seuil est difficile à obtenir de manière précise et elle nécessite d'utiliser les courbes dérivatives.

La figure 115 donne la représentation les courbes $\eta(I)$ à différentes températures. Ces courbes présentent une discontinuité au point d'abscisse correspondant au courant de seuil. Le deuxième paramètre accessible est le facteur d'idéalité. Ces courbes permettent de confirmer les valeurs des paramètres η et I_{th} de la tête optique. La variation de ces paramètres en fonction de la température

montre la dépendance du fonctionnement de la diode laser. Pour I_{th} la variation est de $0,15 \text{ mA.K}^{-1}$ et pour η la variation est de $2,2.10^{-3} \text{ K}^{-1}$ en faisant l'hypothèse que les variations sont linéaires. Cette dernière est vérifiée car les mesures sont effectuées tous les 20 K.

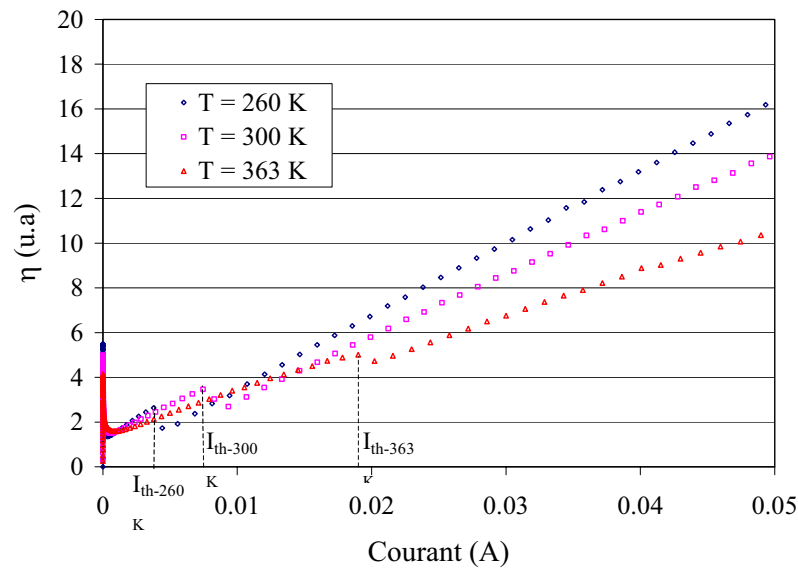


Figure 115 - Courbes $\eta(I)$ en fonction de la température

La figure 116 montre le tracé des courbes $\eta(V)$. De la même manière que précédemment, il apparaît une discontinuité de dérivées pour une abscisse correspondant à la tension de seuil. La dépendance de ce dernier paramètre en fonction de la température est de 10^{-4} V.K^{-1} .

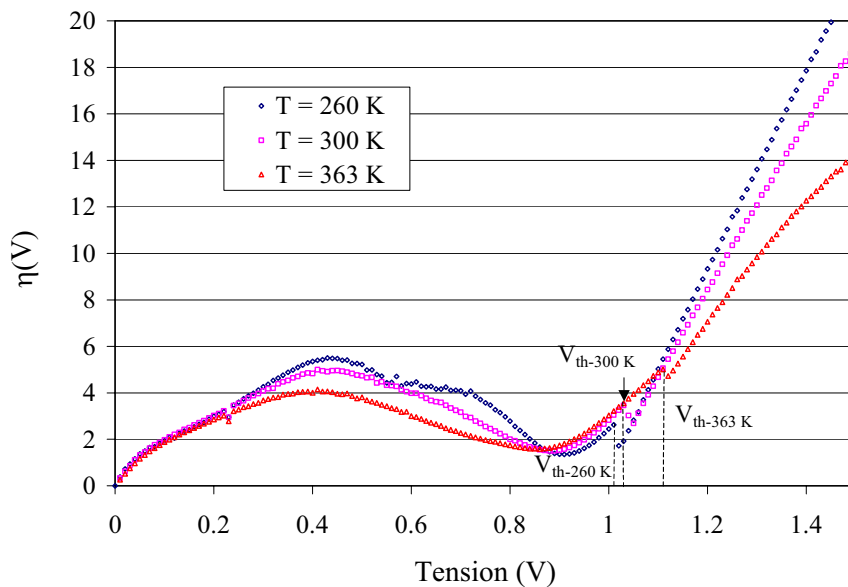


Figure 116 - Courbes $\eta(V)$ en fonction de la température

L'ensemble des tracés donnés jusqu'ici permet de déterminer les principaux paramètres électriques que nous avons déjà évoqués au cours du chapitre II afin de construire le modèle électrique équivalent de la tête optique considérée.

Le tableau 27 rassemble les différents paramètres électriques relatifs à la tête optique 1310 nm. La figure 117 présente le modèle électrique équivalent de l'ensemble en accord avec le chapitre II. Une diode laser à double hétérostructure enterrée est généralement modélisée par une diode homojonction D_{ho} relative aux conductions parasites des reprises d'épithaxie latérales à la zone active, une diode hétérojonction D_{hj} relative à la zone active et une diode Zener caractérisant l'effet laser. Ce modèle est en accord avec les résultats des travaux de **M. Vanzi** [54, 59, 62, 63].

Paramètres	Valeurs typiques
R_{sh1} : résistance de fuite ($0 < V < 0,08V$)	$1,83.10^6 \Omega$
R_{sh} : résistance de fuite ($V > 0,08V$)	NL
$I_r = I_{gr} + I_{hj}$: courant de saturation de recombinaison	-
I_s : courant de saturation	$3,64.10^{-12} A$
η : facteur d'idéalité	1,8
R_s : résistance série	7,1 Ω
V_{th} : tension de seuil	1,03 V
I_{th} : courant de seuil	8,1 mA

Tableau 27 – Valeur typique des paramètres électriques des têtes optiques 1310 nm

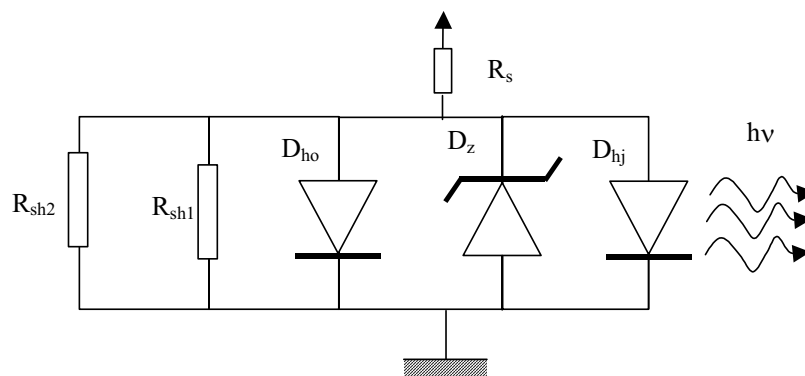


Figure 117 – Modèle électrique équivalent de la tête optique 1310 nm

La suite de l'exposé consiste à déterminer les paramètres de chacune des deux diodes hétérojonction D_{hj} et homojonction D_{ho} . Pour cela, nous allons modéliser les courbes $I(V)$ de chaque diode pour obtenir des courants I_{Dho} et I_{Dhj} de manière empirique en se basant sur les équations de chacune des diodes. Par la suite, nous sommerons les deux contributions de courant pour former le courant théorique $I_{modèle}$. Nous comparerons le courant $I_{modèle}$ avec le courant mesuré dans la diode laser pour les conditions suivantes :

- ☞ température de mesure $T = 300 K (+27^\circ C)$,
- ☞ temps de vieillissement $t = 0$ heure.

Nous avons établi que le comportement $I(V)$ du paramètre R_{sh2} non-linéaire était polynomial. Nous émettons l'hypothèse que cette caractéristique $I(V)$ est représenté par une diode tunnel en

polarisation inverse dont l'expression du courant est :

$$I = A_{TUN} S V (V_{dd} - V)^2 \quad [51] \quad E \text{ IV-2}$$

où
$$V_{dd} = \frac{\Delta E_c + \Delta E_v}{q}$$

$$A_{TUN} = \frac{(2m_e)^3}{h^6 kT} (m_e m_h)^{3/2} \exp\left(-\frac{4\sqrt{m_e}}{3\hbar q E} E_g^{3/2}\right)$$

S : surface de la jonction considérée

Nous avons effectué l'étude en deux parties :

- étude du modèle sans la prise en compte de l'effet tunnel (modèle N°1)

La figure 118 représente la courbe Log I(V) d'une DEL, de la diode D_{ho} , de la diode D_{hj} , de la résistance de fuite R_{sh1} et la somme des contributions de courant du modèle formant la caractéristique Log I(V) théorique.

La modélisation est très satisfaisante dans les zones III et IV de la caractéristique mais est très différente dans la zone I'. Nous avons ajouté la contribution de la diode tunnel en déterminant les valeurs des paramètres A_{TUN} et V_{dd} .

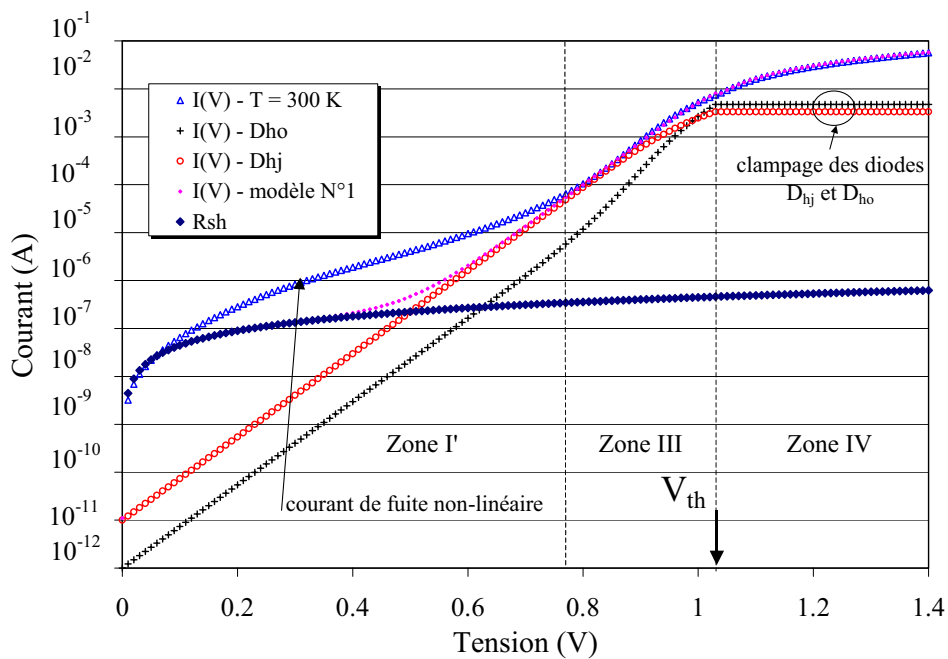


Figure 118 - Courbes I(V) simulées et expérimentales de la tête optique 1310 nm

- Modélisation complète de la tête optique (modèle N°2)

La figure 119 représente la comparaison de la caractéristique Log I(V) expérimentale avec le courant $I_{modèle}$ tenant compte de la contribution simulée de la diode tunnel. Le résultat est nettement plus satisfaisant même si certains points de la courbe ne coïncident pas. Le courant de la diode tunnel est un courant de fuite qui est initié dans les zones latérales de la diode laser. Ces zones correspondent

à des homojonctions fortement dopées afin de réduire les dislocations autour des puits quantiques et d'augmenter la luminescence dans ces derniers [86, 87, 88].

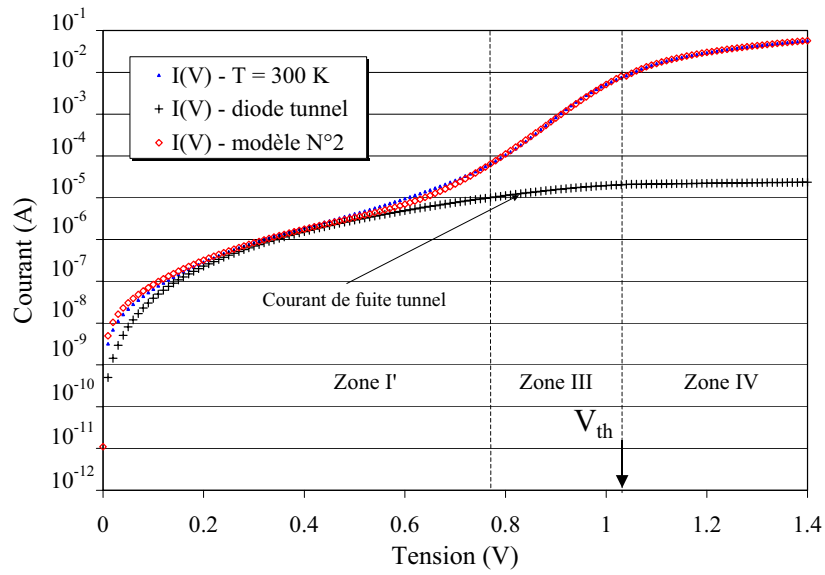


Figure 119 - Courbes I(V) théoriques et expérimentales de la tête optique 1310 nm

La figure 120 propose le modèle complet de la tête optique valable uniquement pour des mesures I(V) en direct et la technologie considérée.

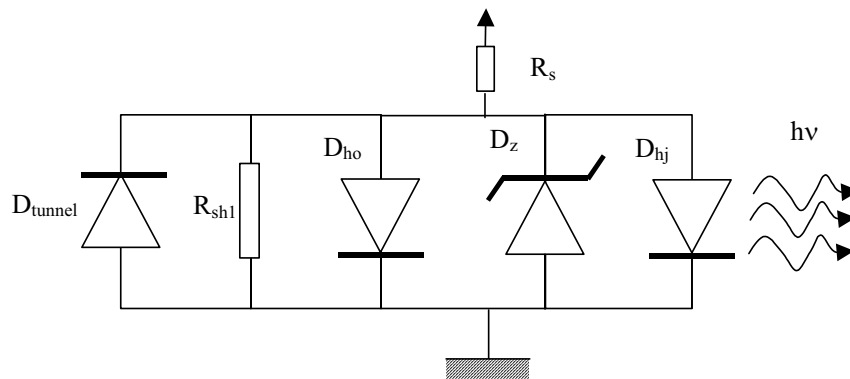


Figure 120 – Modèle électrique complet de la tête optique (modèle N°2)

Nous avons rassemblé les valeurs des paramètres des différents éléments du modèle de la figure 120 dans le tableau 28.

	laser	D _{ho}	D _{hi}	D _{tunnel}
R _{sh1} : résistance de fuite	1,83.10 ⁶ Ω			
A _{TUN} S : constante tunnel	-	-	-	2.10 ⁻⁵ A.V ⁻³
V _{dd} : potentiel tunnel	-	-	-	-0,04 V
I _r : courant de saturation de recombinaison	-	I _{gr} = 1.10 ⁻¹² A	I _{hj} = 1.10 ⁻¹¹ A	-
I _s : courant de saturation	3,64.10 ⁻¹² A	4.10 ⁻²⁰ A	1.10 ⁻¹¹ A	-
η : facteur d'idéalité	1,8	1	2	-
R _s : résistance série	7,1 Ω	-	-	-
I _{th} : courant de seuil	8.1 mA	4.74 mA	3,32 mA	-
V _{th} : tension de seuil	1,03V	0,99V	0,99V	-

Tableau 28 – Valeurs des paramètres électriques de chaque élément du modèle extraites expérimentalement

Nous avons mis en évidence le modèle électrique de la tête optique. Afin de compléter les analyses, les caractéristiques optiques ont été effectuées.

- Caractéristiques optiques

Cette section décrit les grandeurs optiques que sont L(E) et P(I) présentées dans le chapitre II. Nous allons débiter l'étude par le spectre optique L(E).

La figure 121 représente le spectre optique d'une tête optique mesuré à 300 K (+27°C) pour un courant d'alimentation de 100 mA.

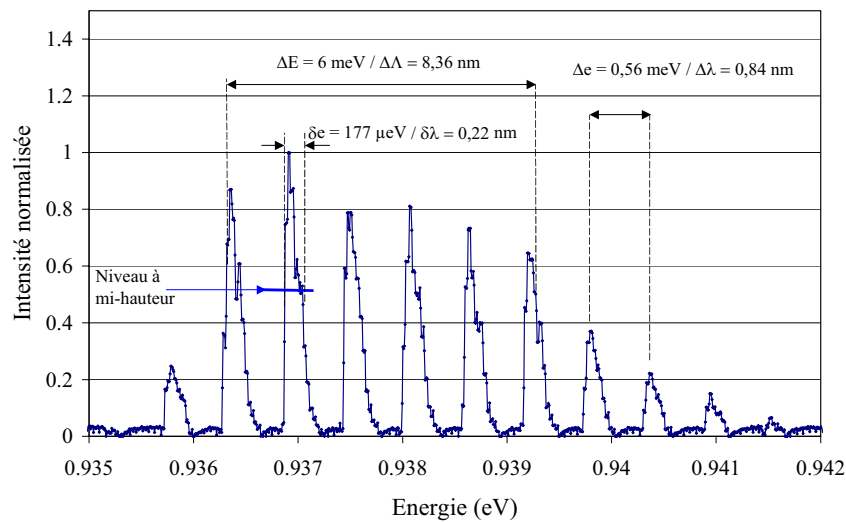


Figure 121 – Spectre optique d'une tête optique mesurée à 300 K (+27°C)/100mA

On observe, dans un premier temps, que le spectre optique n'est pas centré sur 1310 nm (0,948 eV) comme indiqué par le fabricant mais à 1322 nm (0,937 eV). Nous verrons que le phénomène de "tracking" explique cette différence ainsi que le niveau d'injection de courant.

Nous allons décrire, à présent, le spectre optique d'émission de la tête optique en accord avec le chapitre II. On rappelle que la largeur spectrale entre mode ΔE donne une information sur la longueur de la cavité laser, son expression est rappelée dans l'équation E IV-3 :

$$L = \frac{c}{2n_{op}(v_{q+1} - v_q)} \quad \text{E IV-3}$$

Le calcul permet de déduire la longueur de la cavité d'environ 360 μm confirmée par les images MEB de la diode laser en vue de dessus.

La zone active étant constituée d'une double hétérostructure, l'énergie minimum du spectre correspond quasiment à la bande interdite du matériau de faible gap évaluée à 0,935 eV. Le gap du matériau InGaAsP peut varier de 0,75 eV à 1,35 eV lorsqu'il est déposé sur InP [89]. Ceci confirme la nature de la zone active constituée par InGaAsP/InP [90, 91, 92]. L'enveloppe du spectre optique est l'image de la zone active constituée par double hétérostructure et des puits quantiques.

La figure 122 représente le spectre optique avec la forme d'émission spectrale de puits quantiques couplés (trait discontinu) en considérant les travaux développés par A.D.Sarmiento [55] et le chapitre II. On observe trois niveaux de discontinuité de l'enveloppe du spectre permettant de conclure que les puits quantiques de la zone active ont une largeur donnant naissance à trois niveaux d'énergies discrets $E_1 = 0,936$ eV, $E_2 = 0,937$ eV et $E_3 = 0,938$ eV. Les énergies observées entre 0,935 eV et 0,936 eV correspondent à l'agitation thermique induite par la température de la zone active.

Nous avons donc mis en évidence la présence de puits quantiques couplés au sein de la zone active. Nous allons poursuivre par l'étude de la puissance optique.

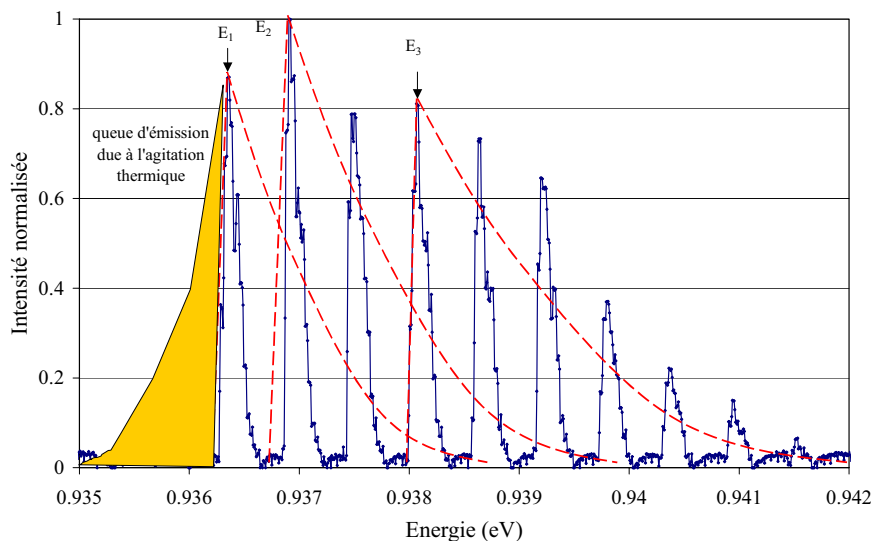


Figure 122 – Spectre optique de la tête optique 1310 nm avec l'enveloppe mesurée à 300 K (+27°C)

La caractéristique $P(I)$ représenté par la figure 123 ne comporte que la partie linéaire dont l'équation est donnée par : $P = \Re(I - I_{th})$. En effet, l'assemblage d'une tête optique induit une perte optique par couplage ne permettant pas d'observer la puissance optique en dessous du courant de seuil. Cet aspect est un point faible de la technique d'analyse développée au Laboratoire IXL . La caractéristique $P(I)$ pour un courant inférieur à I_{th} traduit le phénomène d'émission spontanée. Cette condition d'émission de lumière est corrélée aux faibles niveaux d'injection de courant dans la cavité.

Les analyses de signatures de défaillance électriques observées pour les faibles niveaux d'injection de courant ne peuvent être corrélées à la dérive de la puissance optique pour des courants comparables, c'est à dire inférieurs au courant de seuil laser.

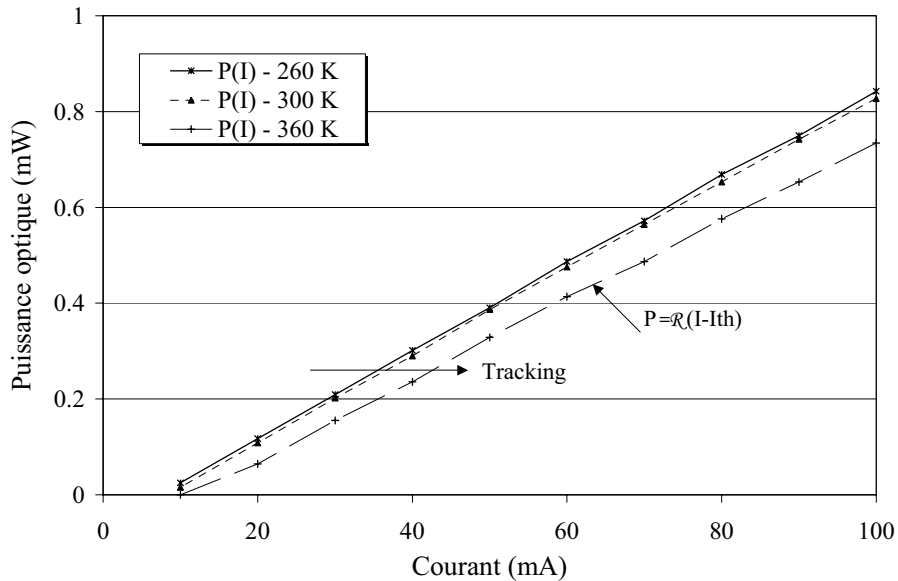


Figure 123 – Caractéristique P(I) en fonction de la température

On évalue R à $10,7 \mu\text{W/A}$ et $I_{th} = 7,85 \text{ mA}$. Cette dernière grandeur est en accord avec la valeur déterminée par la courbe $\eta(I)$.

Les mesures P(I) et L(E) sont effectuées en fonction de la température. On observe un phénomène de dérive de spectre optique et de puissance optique en fonction de la température. Ce phénomène est plus connu sous l'intitulé de "tracking".

La figure 124 présente l'effet de "tracking" sur l'énergie centrale du spectre et la puissance optique [93]. On observe une diminution de $0,2 \text{ meV/K}$ pour l'énergie centrale et $1 \mu\text{W/K}$ pour la puissance optique lorsque la température croît. Les mesures effectuées par le système de mesure ont un décalage de température de 2 K au maximum par rapport à la température absolue du système. Afin de réaliser des mesures reproductibles, la température du composant est relevée pour chaque mesure (voir chapitre II). L'erreur maximale occasionnée par deux mesures de spectre optique, pour une même température, est de $\pm 10^{-2} \text{ nm}$. Elle a été validée au travers de 20 mesures effectuées sur une tête optique de référence. Ce décalage correspond alors à un déplacement de l'enveloppe du spectre inférieur à 10^{-5} eV et une variation de puissance optique de $0,3 \mu\text{W}$.

Cependant, il a été montré par B. B. Elenkrig que la variation de la résistance série R_s entraînait une dérive de la température d'équilibre de la diode laser [61]. Dans la mesure où la température de la jonction varie, les caractéristiques optiques dérivent suivant les courbes exposées dans la figure 124. Il faudra donc être attentif au paramètre électrique R_s . Une dérive de spectre optique de 10^{-4} eV sans variation de la résistance série R_s peut être considéré comme une défaillance de la zone active et non comme une évolution de la température de mesure de la diode laser.

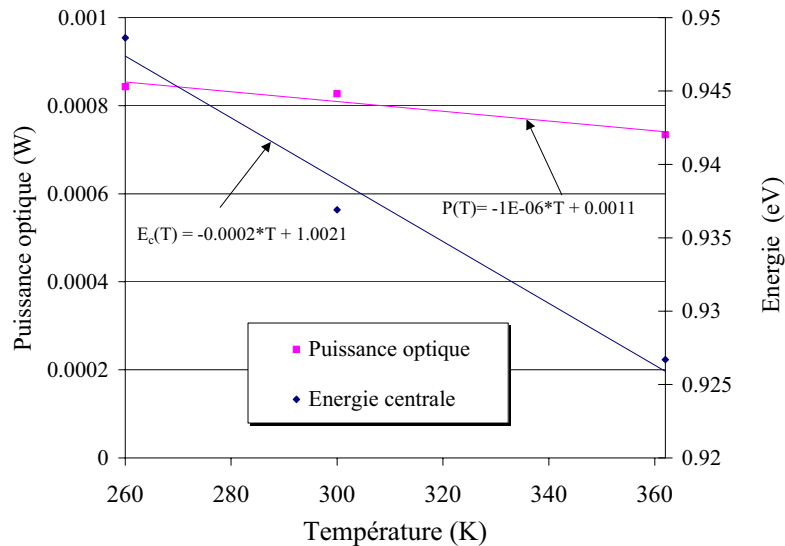


Figure 124 – Variation de l'énergie centrale du spectre optique et de la puissance optique en fonction de la température (effet de "tracking")

Le tableau 29 rassemble les valeurs typiques des paramètres optiques relevées à partir des courbes expérimentales $L(E)$ et $P(I)$.

Paramètres	Valeurs typiques
\mathfrak{R} : facteur de luminescence $I > I_{th}$	10,7 μ W/A
E_{pic} / λ_{pic} : longueur d'onde centrale	1322 nm / 0,939 eV
$\Delta E / \Delta \lambda$: largeur spectrale à mi-hauteur	5,95 meV / 8,36 nm
$\Delta e / \Delta \lambda$: espacement de modes de la cavité	0,84 nm / 0,56 meV
$\delta e / \delta \lambda$: largeur d'un mode	0,177 meV / 0,22 nm

Tableau 29 – Valeurs typiques des paramètres optiques des têtes optiques étudiées à 300 K (+27°C)

Nous avons énuméré l'ensemble des paramètres permettant de suivre l'évolution des caractéristiques électriques et optiques de chaque tête optique en fonction du vieillissement. Nous pouvons, à présent, débiter l'étude portant sur l'identification et l'analyse des mécanismes de dégradations.

IV.3 / Identification et analyses des signatures de défaillance

Cette partie permet de classer les évolutions des têtes optiques Fabry-Pérot 1310 nm. Pour cela nous avons utilisé un critère de défaillance définissant une perte de puissance optique de 10 % par rapport à la mesure effectuée en initial [94]. Après 300 cycles thermiques, nous avons noté 40% de pièces défaillantes pour un total de 12 composants. Les résultats des vieillissements ont révélé deux types de signature de défaillance :

- Une signature de défaillance de type électro-optique, observée sur 25% des composants, caractérisées par une chute de puissance optique couplée à une augmentation du courant de seuil I_{th} .
- Une signature caractérisée uniquement par une chute de la puissance optique concernant 15 % du total des composants.

La présentation des résultats débutera par l'analyse de la diminution de la puissance optique et

de l'évolution de la caractéristique électrique. Pour renforcer nos interprétations, nous utiliserons également la dérive du spectre optique lorsqu'elle a lieu.

IV.3.a / Signature de défaillance électro-optique

Ce premier type de signature de défaillance, caractérisé par l'augmentation du courant de seuil et la chute de la puissance optique, peut être divisé en trois. La discrimination de ces trois signatures de défaillance s'effectue en considérant l'évolution de paramètres électriques supplémentaires :

- ☞ le courant de saturation de recombinaisons I_r pour les très faibles niveaux d'injection de courant,
- ☞ le courant de saturation I_s , pour les faibles niveaux d'injection
- ☞ la résistance série R_s , pour les injections de courant après le seuil laser.

• Signature α

La figure 125 montre la perte de puissance optique évaluée à 40 % corrélée à une chute de 33 % du paramètre \mathfrak{R} . Le mode de dégradation peut être classée comme rapide car la chute de puissance optique est de 40 % après 300 cycles. Cette chute de puissance optique peut être induite par :

- ☞ une perte de couplage optique caractérisant une défaillance d'alignement sans aucune dérive de la caractéristique électrique,
- ☞ une dégradation de la diode laser affectant les caractéristiques optiques et électriques.

Pour discriminer les deux causes possibles de défaillance, nous avons analysé les caractéristiques électriques de la tête optique.

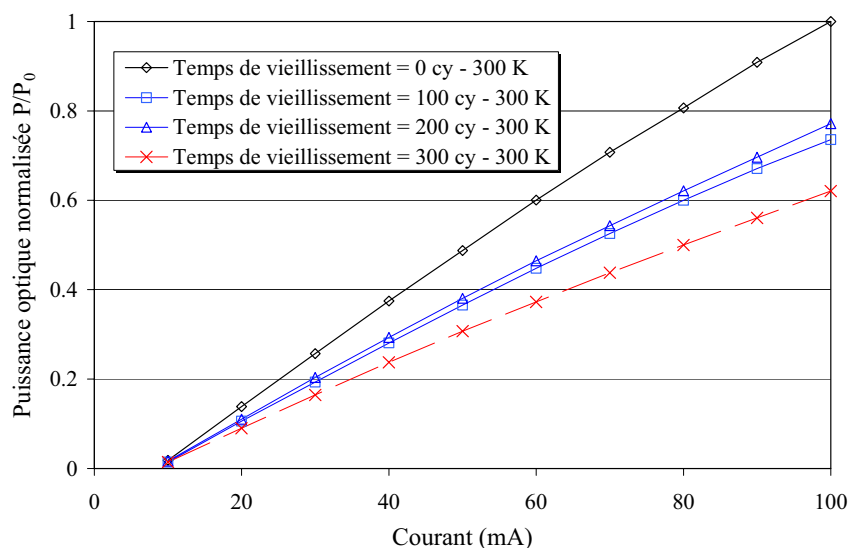


Figure 125 – Courbes $P(I)$ mesurées à 300 K (+27°C) avant et après vieillissement

La figure 126 représente les courbes $\text{Log } I(V)$ caractérisées par l'absence de variation mais la courbe $\eta(I)$ permet d'obtenir des informations complémentaires. En effet, le courant de seuil augmente de 10 % et le facteur d'idéalité décroît de 8 %. Les faibles valeurs de dérives du courant de seuil et du facteur d'idéalité montrent que le banc d'analyse électro-optique est adapté à l'analyse de signatures précoces de défaillance. En effet, l'amplitude de la dérive des paramètres I_{th} et η est généralement de 50 % pour I_{th} et 20% pour η [19, 59]. Une telle dérive est généralement couplée à une chute de 100 %

de la puissance optique correspondant à la fin de vie du composant.

L'origine de l'augmentation du courant de seuil peut être reliée à :

- la modification du transport électrique dans la zone active,
- la diminution de la résistance de fuite,
- l'évolution des caractéristiques optiques de la cavité.

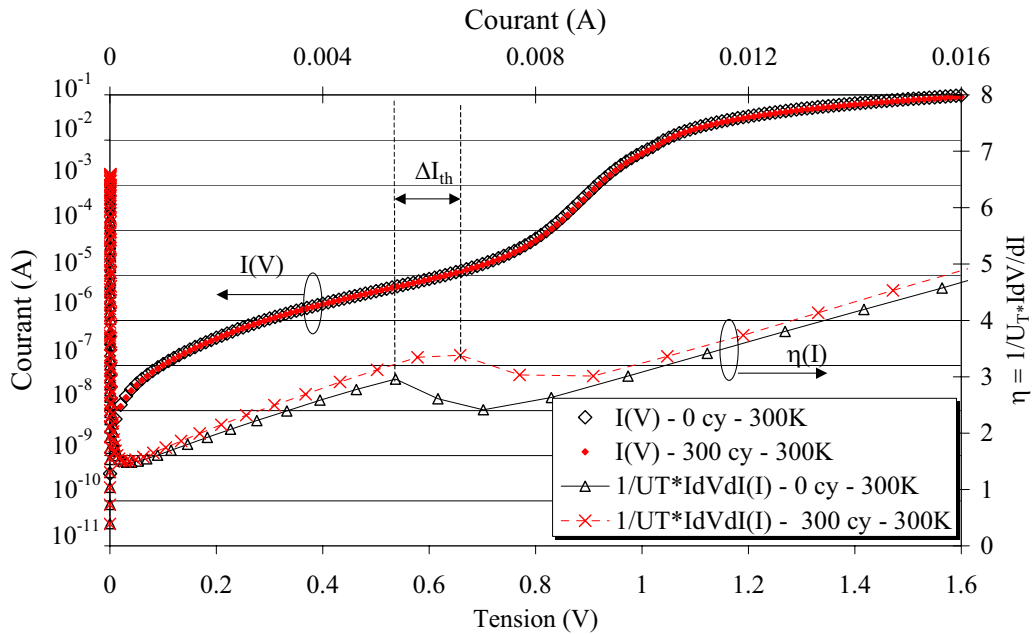


Figure 126 - Courbes représentatives de I(V) et $\eta(I)$ mesurées à 300 K (+27°C) avant et après vieillissement

Cependant, les caractéristiques I(V) mesurées à 300 K (+27°C) peuvent ne pas révéler une signature de défaillance masquée par l'agitation thermique. Pour cela, nous avons utilisé les résultats des mesures I(V) à basse température (233 K/-40°C) mais aucune évolution n'est observable. Nous avons donc conclu que le transport électrique dans la diode laser n'est pas affecté. Afin de confirmer notre analyse, nous avons observé l'évolution du spectre optique. La figure 127 met uniquement en évidence la chute de l'intensité lumineuse.

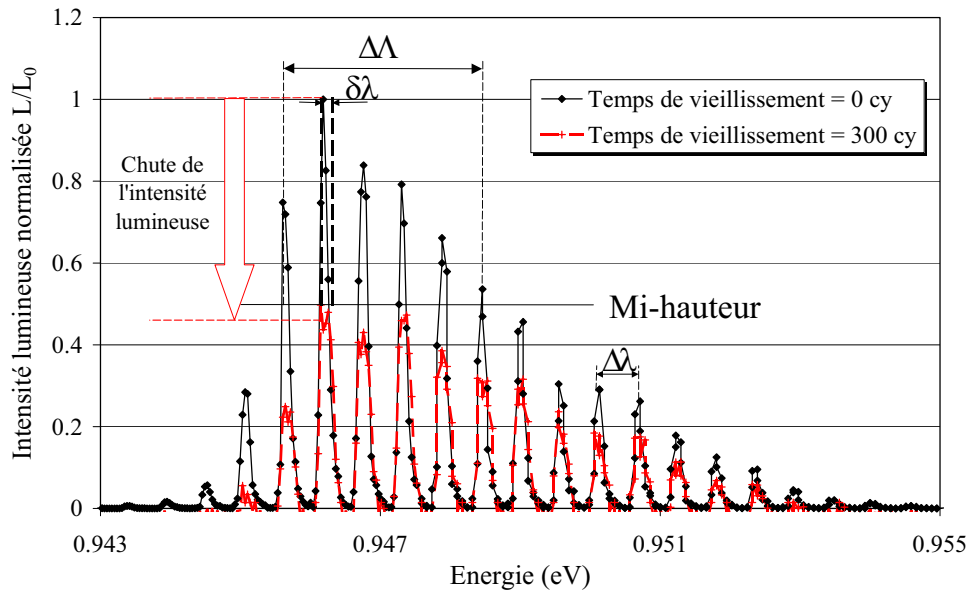


Figure 127 - Spectre optique mesuré à 300 K (+27°C) pour I = 100 mA avant et après vieillissement

L'ensemble des résultats indique une perte optique sans modification de la structure de la zone active et de la conduction de courant. En effet, les phénomènes de transport électrique dans la diode laser sont inchangés car la courbe LogI (V) n'est pas modifiée. Aucune fuite de courant et aucune augmentation de courant de recombinaison ne sont également pas observées.

Afin d'expliquer l'ensemble des phénomènes observés par les résultats électro-optiques, nous avons fait l'hypothèse que la cavité laser était le siège de dégradations caractérisées par une augmentation des pertes optiques. Nous introduisons alors les relations, évoquées au chapitre II, liant le courant de seuil I_{th} , le gain de seuil laser γ_{th} et les pertes optiques α_p et α_m . Ces relations sont exprimées dans l'équation E IV-4 :

$$I_{th} = \frac{qVn_{transp}}{\alpha_0\eta_i t_{rad}} [\gamma_{th} - \alpha_0]$$

$$\gamma_{th} = \frac{1}{\Gamma} \left(\alpha_p + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_{m1}R_{m2}} \right) = \frac{1}{\Gamma} (\alpha_p + \alpha_m)$$

E IV-4

- γ_{th} : gain seuil
- Γ : pertes électromagnétiques
- α_p : pertes optiques dans la cavité
- α_m : pertes optiques dues aux miroirs
- R_{m1}, R_{m2} : coefficient de réflexion des miroirs
- L : longueur de la cavité
- η_i : rendement interne
- t_{rad} : durée de vie radiative
- n_{transp} : nombre de porteurs induit par le phénomène de transport
- V : volume de la cavité
- I_{th} : courant de seuil
- α_0 : gain de transparence

Les pertes optiques sont de deux natures différentes : les pertes optiques de la cavité et les pertes optiques dues aux miroirs. L'augmentation des pertes optiques de la cavité α_p sont généralement caractérisées par la diminution de l'indice de réfraction du volume de la cavité [95]. L'augmentation des pertes optiques dues aux miroirs est essentiellement induite par une dégradation de l'interface semiconducteur/miroirs [96]. Nous avons évoqué au chapitre I que ce dernier type d'augmentation de pertes optiques est principal causé par l'oxydation de l'interface semiconducteur/miroirs. Le mode de

défaillance rapide caractérisant cette signature est en corrélation avec les travaux de **M. Fukuda** menés sur des structures à double hétérostructure enterrée InGaAsP/InP "puces nue"[19].

- Signature β
 - Analyses et identification du mécanisme de dégradation

La figure 128 indique que la chute de puissance optique est de 65 % et la diminution de \mathfrak{R} et d'environ 60 %. La diminution rapide de la puissance optique (40%) après un nombre court de cycles thermiques (100 cycles) justifie de classer ce mode de dégradation comme catastrophique.

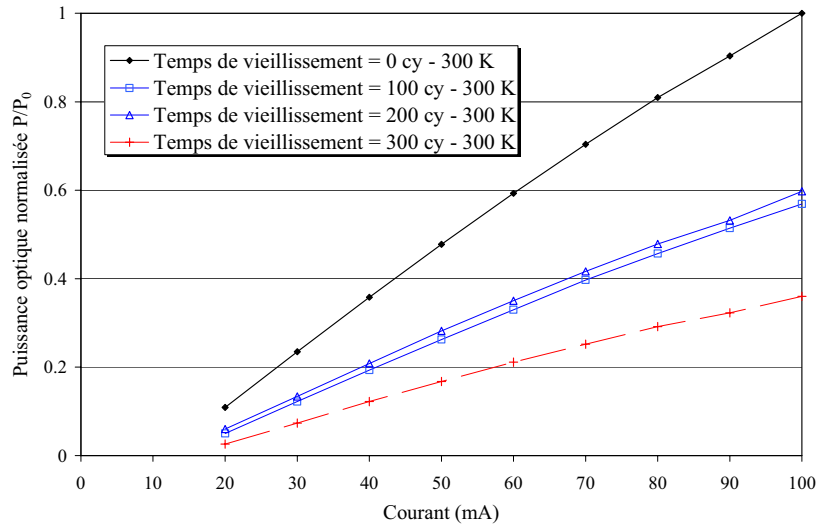


Figure 128 - Courbes P(I) mesurées à 300 K (+27°C) avant et après vieillissement

La signature de défaillance β est caractéristique d'une augmentation de courant de saturation situé dans la zone III. La figure 129 montre l'augmentation du courant de saturation I_s d'environ une décade. La courbe $\eta(I)$ indique une augmentation de 7 % du courant de seuil et une chute de 6 % du facteur d'idéalité.

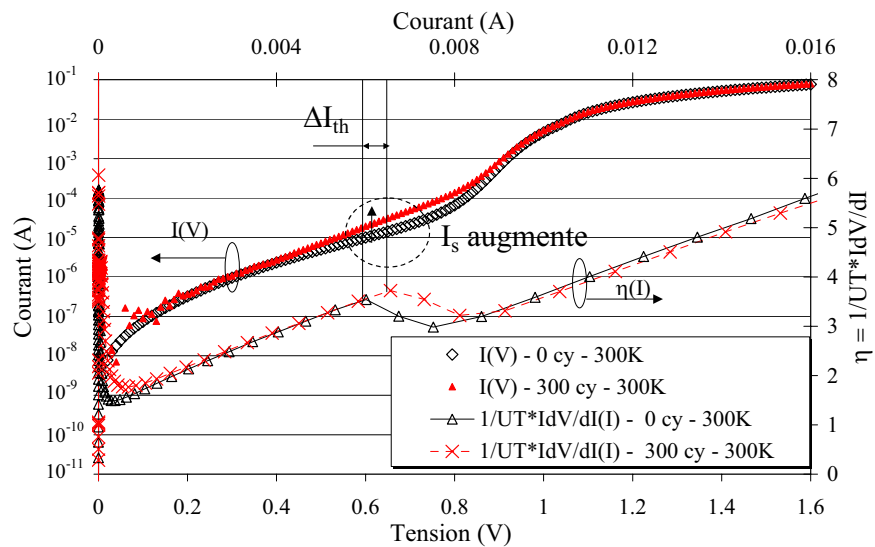


Figure 129 - Courbes représentatives de I(V) et $\eta(I)$ mesuré à 300 K (+27°C) avant et après vieillissement

La figure 130 représente l'évolution des courbes Log I(V) pour les températures de mesures de 260 K (-13°C) et de 363 K (+90°C).

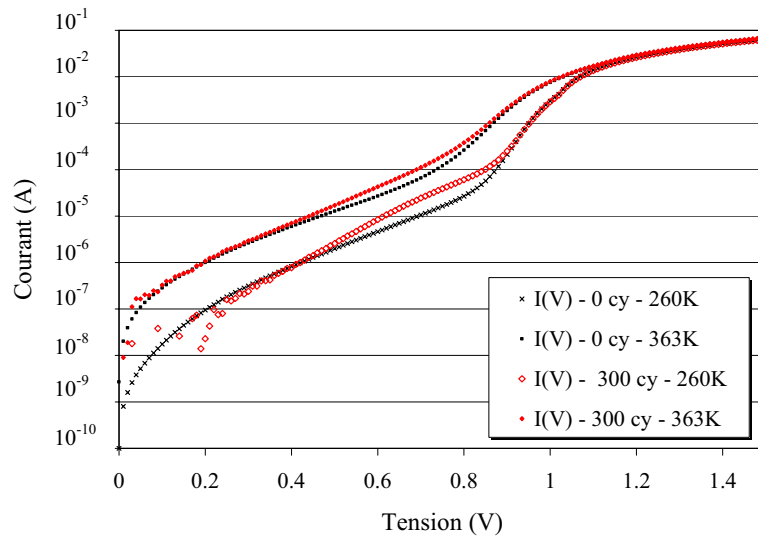


Figure 130 - Courbes I(V) et $\eta(I)$ en fonction du temps de vieillissement pour des températures de 233 K (-40°C) et 363 K (+90°C)

On observe que le phénomène physique de dégradation est activé par la température. A basse température (260 K/-13°C), la différence entre le courant pour 0 cycle et 300 cycles est évaluée à un peut plus d'une décade alors qu'à 363 K (+90°C) l'augmentation est inférieure à une décade. L'augmentation du courant dans cette zone a été identifiée dans des structures InGaAsP/InP "puce nue" [59, 97, 98]. Le mode de défaillance étant catastrophique, l'observation de la dérive après 100 cycles de vieillissement et mesurée à 233 K (-40 °C) n'apporte pas d'information supplémentaire.

L'augmentation du courant de recombinaison est caractéristique d'une défaillance de la zone active ou bien des zones latérale. Afin de déterminer quel type de défaillance est présente dans notre cas, nous avons effectué une simulation en utilisant le modèle équivalent de la tête optique.

□ Modélisation de l'augmentation du courant de seuil

Dans un premier temps, nous allons rappeler le schéma électrique équivalent de la tête optique (figure 131). L'augmentation du courant peut provenir de plusieurs éléments du modèle, à savoir : la diode homojonction D_{ho} et hétérojonction D_{hj} [78, 53, 99].

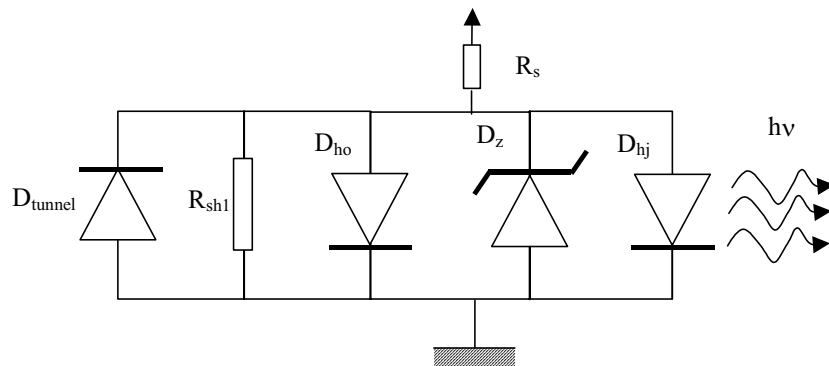


Figure 131 - Circuit équivalent de la tête optique

L'ensemble des simulations effectuées a convergé vers une solution indiquant une augmentation du courant de saturation ($I_s = 10I_{s0}$) et du courant de recombinaison ($I_r = 50I_{r0}$) de la diode D_{hj} . Cette considération modélise correctement l'augmentation du courant dans la diode laser après 300 cycles de vieillissement.

La figure 132 représente les courbes $I(V)$ et $\eta(I)$ pour les conditions suivantes : mesure en initiale, simulation de l'augmentation du courant dans la diode D_{hj} et mesure après 300 cycles de vieillissement. On note une bonne correspondance entre la courbe expérimentale après 300 cycles de vieillissement et la courbe simulée.

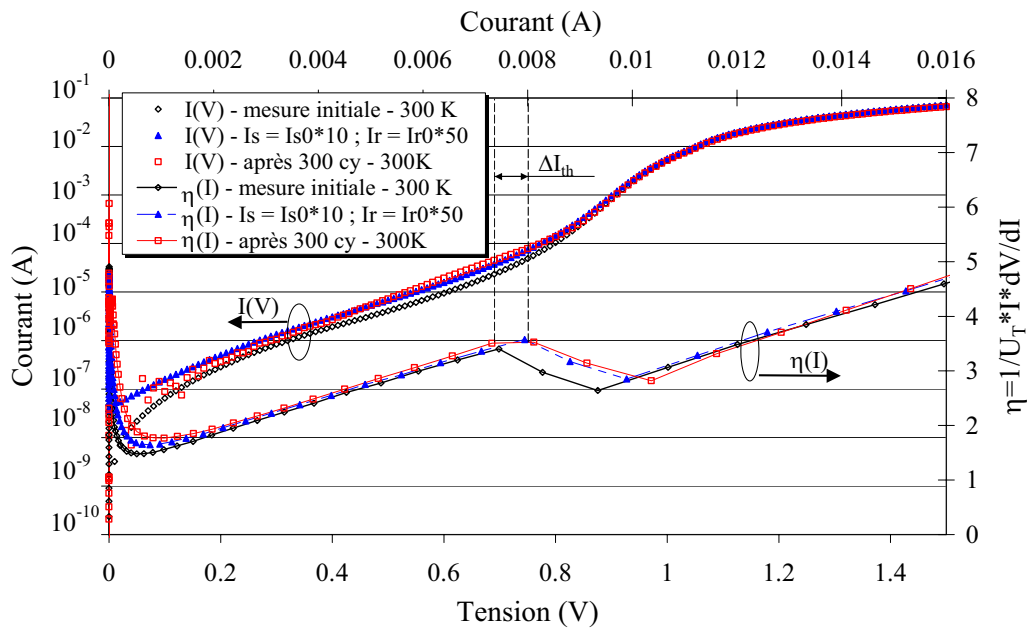


Figure 132 - Simulations d'une augmentation des courants bas niveau. Impact sur les courbes $I(V)$ et $\eta(I)$

Nous pouvons conclure que la zone active de la diode laser est affectée. Cependant, pour apporter une confirmation, nous avons observé l'évolution du spectre optique présenté dans la figure 133. Nous constatons un élargissement des raies laser d'environ 50% et un décalage du spectre de 0,1 meV pour une mesure à 300 K (+27°C). Le paramètre R_s n'ayant pas évolué, le décalage du spectre optique est réellement relié à une dégradation de la zone active. Nous avons évoqué dans le chapitre II que la forme du spectre optique était reliée à la géométrie de la zone active. Dans notre cas, cette géométrie a changé et il est possible que des dislocations inter-faciales localisées au niveau des puits quantiques soient à l'origine de la défaillance [70, 100, 101].

Nous pouvons donc confirmer que la zone active est affectée et plus particulièrement les puits quantiques aux niveaux des interfaces extérieures. Nous allons, à présent, développer la troisième signature de défaillance.

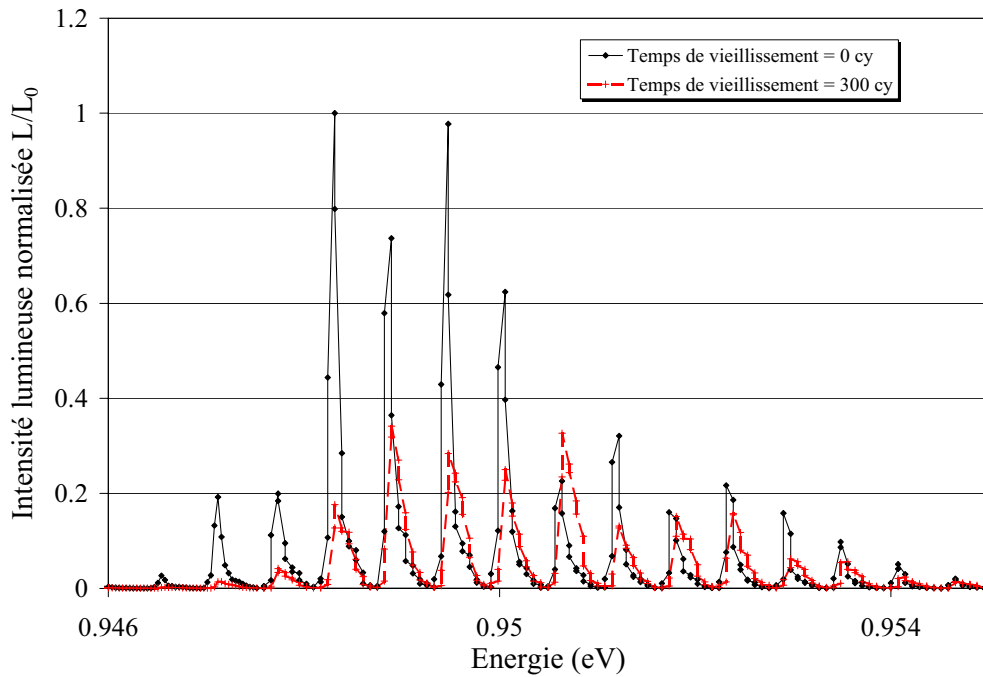


Figure 133 - Spectre optique mesuré à 300 K (+27°C) pour I = 100 mA avant et après vieillissement

- Signature γ

La dernière signature de défaillance est caractéristique des très faibles niveaux d'injection de courant. La chute de puissance optique d'environ 15 % couplée à une diminution de 10 % de l'efficacité optique est plus faible que dans les autres cas. Le mode de dégradation est graduel car après 100 cycles thermiques le module laser voit sa puissance optique chuter de moins de 10 %. La dégradation est donc proche du critère de défaillance (figure 134). La dérive des paramètres électro-optiques est d'autant plus difficile à observer. Mais c'est dans ce cas que nous constaterons l'efficacité des mesures électro-optiques développées au Laboratoire.

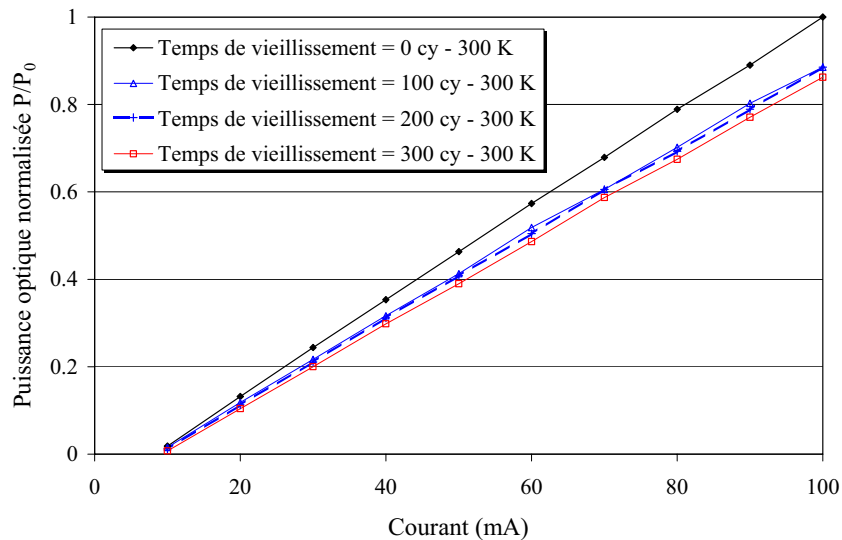


Figure 134 - Courbes P(I) mesurées à 300 K (+27°C) avant et après vieillissement

La précision des mesures effectuées au Laboratoire permet de détecter une augmentation du courant de fuite d'une demi-décade et du courant de seuil d'environ 5% (figure 135). On note dans le même temps une diminution du facteur d'idéalité d'environ 4 %.

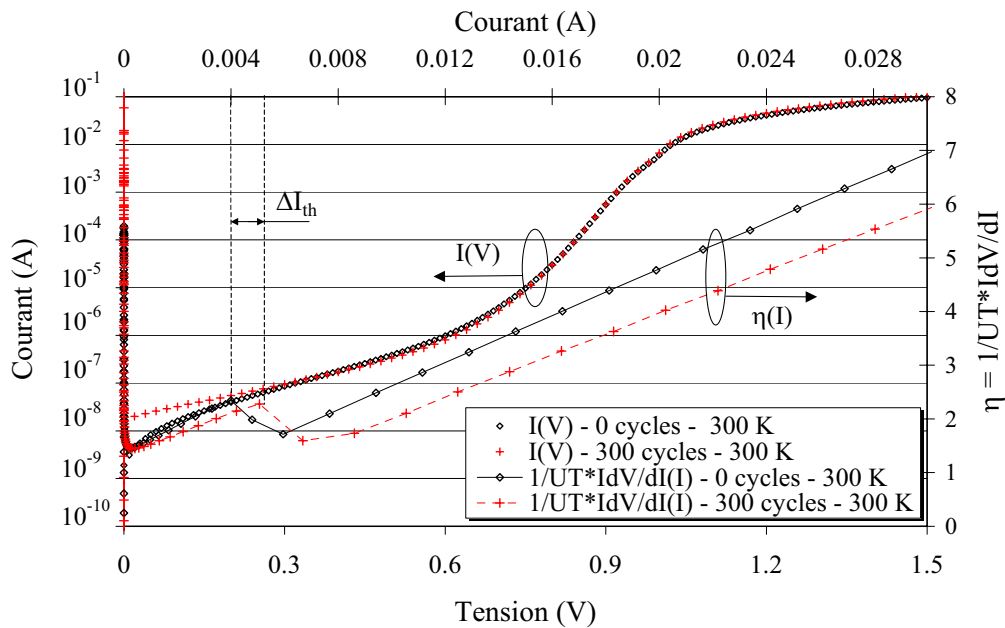


Figure 135 - Courbes représentatives de $I(V)$ et $\eta(I)$ mesuré à 300 K (+27°C) avant et après vieillissement

Pour évaluer l'efficacité des mesures $I(V)$ à basse température, nous avons observé les dérivées de ces dernières après 100 cycles de vieillissement pour une température de mesure de 233 K. La figure 136 représente ces mesures et montre bien une augmentation du courant à très faible niveau d'injection. Cependant, les mesures présentées dans la figure 135 étant suffisamment significatives, nous modéliserons la défaillance à partir de ces courbes. Les mesures à basse température permettent de révéler les signatures de défaillance précocement.

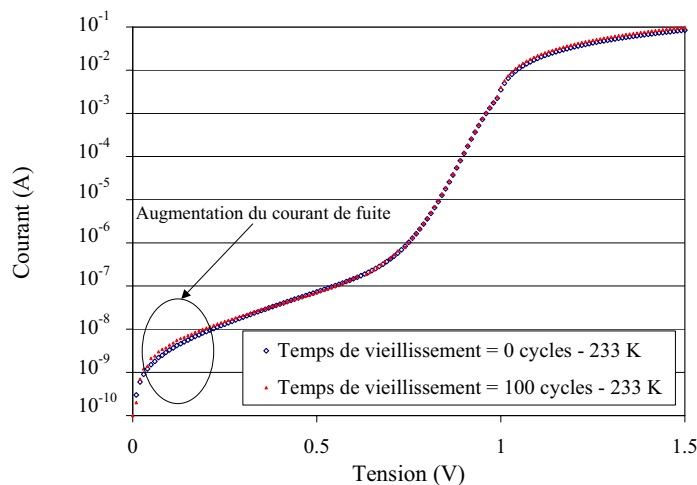


Figure 136 – Courbes $I(V)$ mesurées à 233 K (-40°C) avant et après vieillissement

A la vue des résultats, il est probable que les éléments relatifs à une conduction latérale soient affectés comme le montre **M. Vanzi** sur des structures enterrées InGaAsP/InP "puce nue" [52, 102]. Dans la prochaine section, nous allons modéliser la diminution de la résistance de fuite.

- Modélisation de l'augmentation du courant de fuite

On observe que le courant augmente essentiellement dans la première partie de la zone I' (voir la définition dans la partie IV.2.b). On peut donc supposer que seule la résistance de fuite R_{sh1} est altérée. La figure 137 représente la courbe $\text{Log}I(V)$ expérimentale après 300 cycles thermiques et les courbes simulées considérant une diminution de la valeur de R_{sh1} entre $1\text{ G}\Omega$ à $1\text{ k}\Omega$. Pour simplifier la simulation, on utilise la courbe expérimentale mesurée initialement à laquelle on ajoute la contribution de courant induite par une résistance de fuite R_{sh1} .

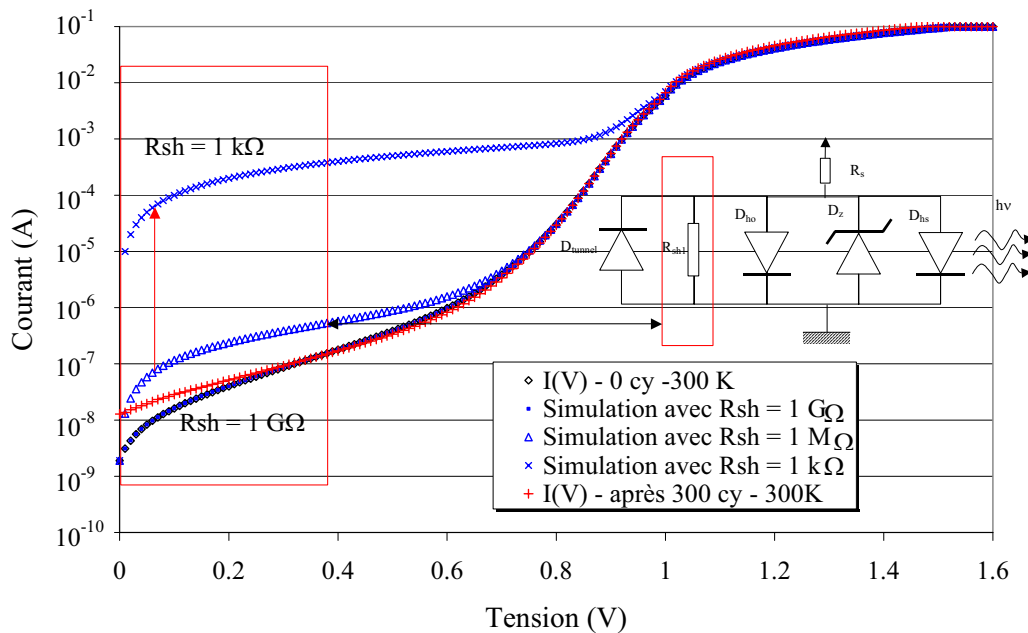


Figure 137 - Modélisation de la résistance de fuite

Le résultat obtenu avec la modélisation n'est pas entièrement satisfaisant, le comportement électrique observé après 300 cycles (figure 137) est assez différent du comportement de la courbe prenant en compte une résistance de fuite. La résistance de fuite R_{sh1} n'est donc pas affectée. Pour améliorer la qualité de l'interprétation de la signature de défaillance, on utilise la représentation du spectre optique.

La figure 138 montre un élargissement des modes de 4 % et un décalage de l'enveloppe du spectre de 0,06 meV vers les faibles énergie. De plus, la dérive de R_s étant nulle, le décalage en longueur d'onde du spectre ne peut pas provenir d'un échauffement de la diode laser.

On confirme que la conduction de la résistance de fuite n'est pas affectée. Le décalage en longueur d'onde du spectre ne peut être du qu'à une dégradation de la zone active. Cependant, il a été montré dans la littérature que la défaillance de la zone active est généralement corrélée à une forte diminution de la puissance optique. Afin de confirmer nos hypothèses, il est nécessaire d'approfondir cette étude. Pour cela, nous avons réalisé des mesures électriques sur 6 têtes optiques en polarisation inverse (voir Annexe A). Nous présenterons ces résultats dans la prochaine partie. Pour finir l'étude de la phase n°1, nous allons observer les signatures purement optiques.

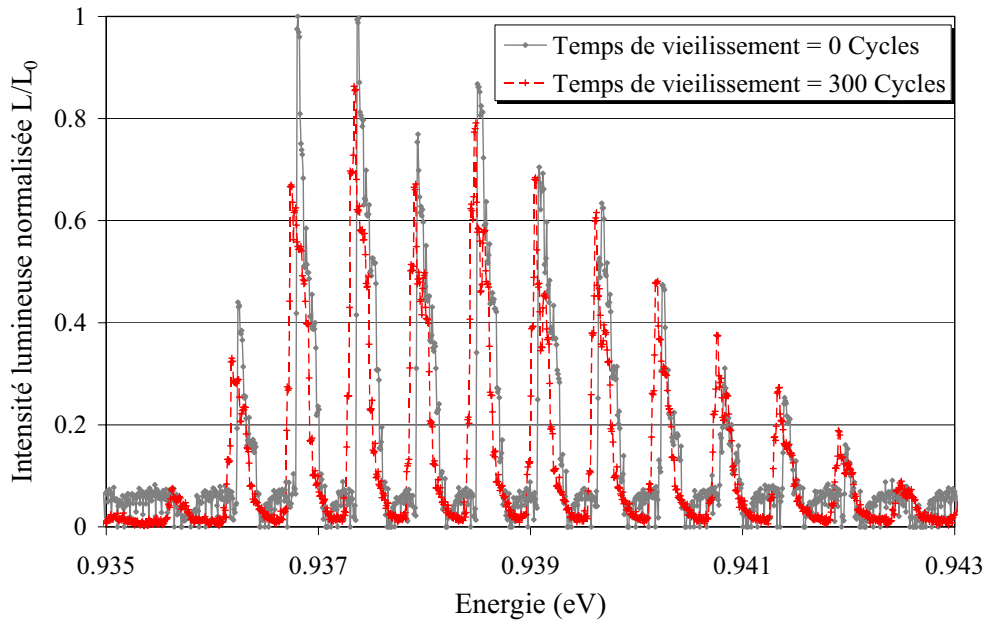


Figure 138 - Spectre optique mesuré à 300 K (+27°C) pour I = 100 mA avant et après vieillissement

IV.3.b / Signature de défaillance optique

Pour les têtes optiques étudiées, la perte de puissance optique est évaluée à 15 % (figure 139). Cette évolution est comparable à la précédente.

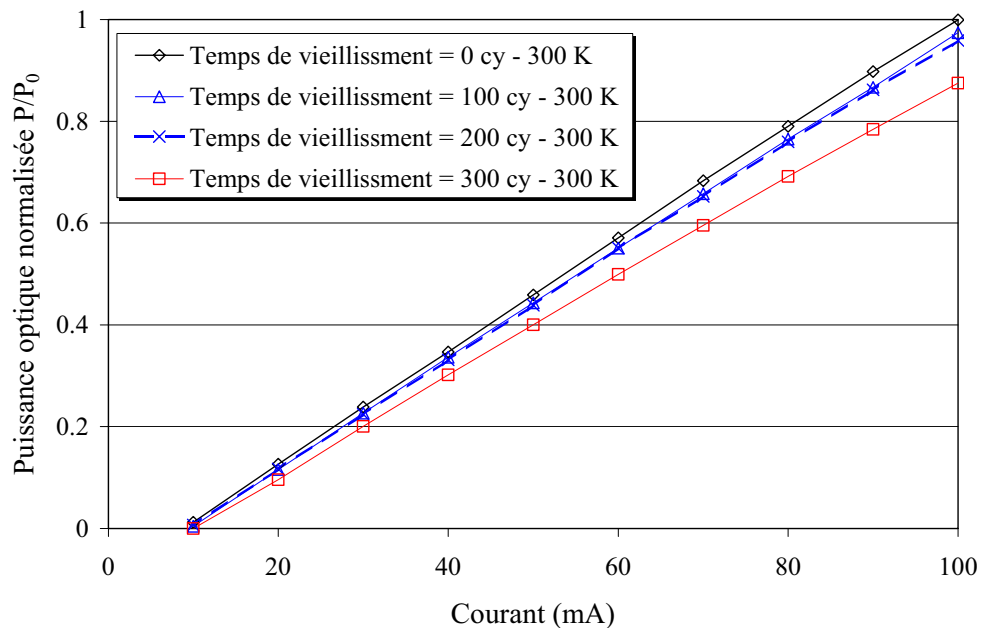


Figure 139 – Courbes P(I) mesurées à 300 K (+27°C) avant et après vieillissement

La figure 140 présente les courbes Log I(V) et les courbes $\eta(I)$. On constate seulement une chute de 30 % de la résistance série. Les autres paramètres électriques n'ont pas évolué. Le décalage de la courbe $\eta(I)$ est du à une variation de la résistance série. L'ensemble de ces observations indique

que la zone active de la diode laser n'a pas été affectée.

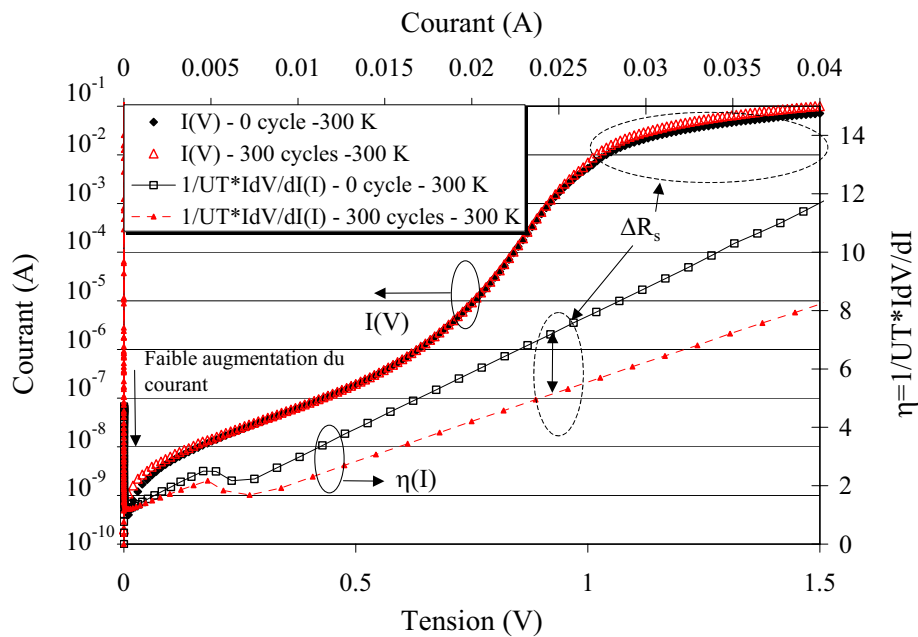


Figure 140 - Courbes représentatives de $I(V)$ et $\eta(I)$ mesuré à 300 K (+27°C) avant et après vieillissement

Il est nécessaire de préciser deux points importants :

- La dérive de la résistance série : lorsque la résistance série R_s diminue, pour un courant de mesure fixé, l'échauffement de la diode laser augmente. Cette augmentation de température induit une chute de puissance optique corrélée à une dérive du spectre optique. La figure 141 montre un décalage du spectre d'environ 0,014 meV correspondant à une dérive de température de 0,07 K. La dérive de puissance optique est donc inférieure à $1\mu\text{W}$. On peut donc conclure que la chute de 15% de la puissance optique correspondant à $95\mu\text{W}$ est indépendante de la variation de la résistance série.
- La chute de la puissance optique est rattachée à un désalignement optique : dans une tête optique, la partie assemblage prend une dimension importante dans la stabilité et la fiabilité du système. Le point le plus critique se situe au niveau du couplage entre la diode laser et la fibre optique du à une tolérance en angle de $2 \cdot 10^{-2}^\circ$ et de $1,4\mu\text{m}$ en déplacement dans le plan perpendiculaire à l'axe optique [3]. Afin d'éviter les réflexions parasites et les problèmes de retour de flux lumineux dans la diode laser, on utilise des systèmes plus complexes comprenant entre autres un isolateur [36, 103]. De plus, l'augmentation du débit nécessite une amélioration du design des éléments électriques de la tête [104]. Globalement, la complexité des têtes optiques est telle qu'il est difficile de déterminer la zone dégradée.

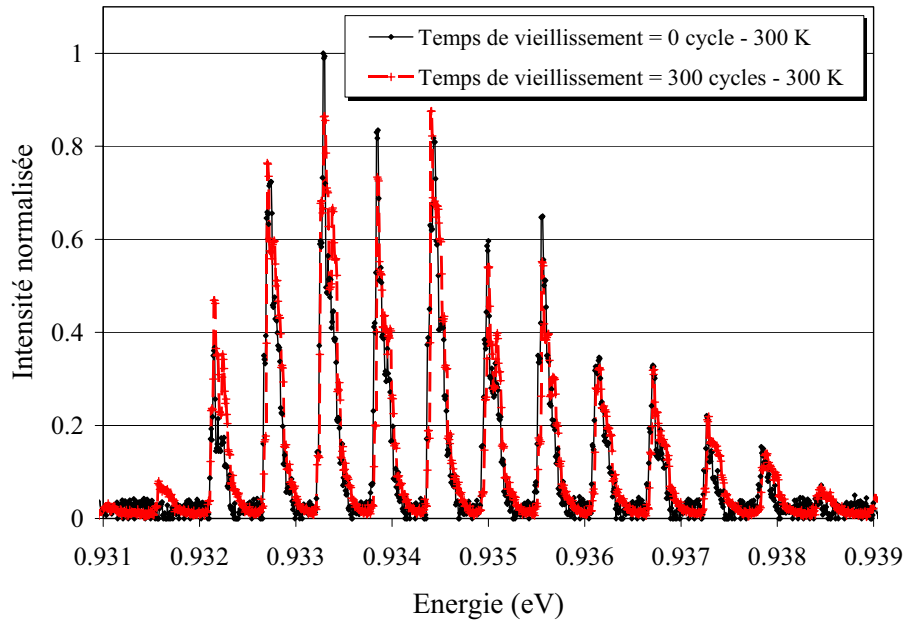


Figure 141 - Spectre optique mesuré à 300 K (+27°C) pour I = 100 mA avant et après vieillissement

On peut donc conclure que la tête optique s'est dégradée par un désalignement entre la fibre optique et la diode laser. Cependant, les mesures effectuées ne permettent pas de déterminer l'origine de la défaillance.

Dans la mesure où l'on veut déterminer les zones critiques de l'assemblage de la tête optique, il est nécessaire de procéder à une étude thermomécanique nécessitant de connaître parfaitement les étapes de fabrications du système. Cette réalisation n'est pas possible pour les têtes optiques Fabry-Pérot 1310 nm car nous n'avons pas de collaboration avec le constructeur de ces têtes optiques.

Ce travail mené en collaboration avec un fabricant Européen de systèmes optoélectroniques, fera l'objet du chapitre IV.

IV.3.c Synthèse des résultats

Cette première série d'analyses électrique et optique a donc montré deux points importants :

- Les performances du banc adaptées pour mettre en évidence les signatures de défaillance du composant situé dans sont environnement final. Il est spécialement montré l'intérêt que peuvent avoir les mesures optiques sur la discrimination des mécanismes de défaillances à partir des signatures électro-optiques observées.
- Le système est, cependant, limité sur les mesures électriques pour les très faibles courants ($<10^{-9}$ A) lorsque le niveau de défaillance du système est extrêmement faible.

Nous avons déterminé, de manière fiable, les mécanismes de défaillance de deux signatures sur quatre. En effet, pour la signature α , nous avons montré que la cavité optique était affectée, pour la signature β , une dégradation de la zone active a été démontrée. Pour les deux autres signatures, il reste des indéterminations qu'il est nécessaire de lever.

Afin de franchir les limites des mesures électriques pour des très faibles niveaux de défaillance, il est nécessaire d'élargir la plage des mesures électriques en passant de 0 V/+2 V à -3V / +2V.

IV.4 / Mesures électriques inverses pour l'analyse de défaillance

Les mesures électriques en polarisation inverse ont été effectuées afin d'augmenter la plage d'observation des très faibles courants. Nous avons considéré des mesures allant de -3 V à 0 V en plus des mesures $I(V)$ en tension directe classiques. Nous n'avons pas modélisé les phénomènes inverses car ils nécessitent une étude très complexe. Cependant, nous avons rappelé quelques informations de base sur les phénomènes de conduction électrique inverse dans les jonctions PN (voir annexe A.1).

Ces mesures ont été utilisées sur six têtes optiques. Deux types de signatures de défaillance différentes ont été déterminés : des dégradations électro-optiques et optique. Nous allons les développer dans les prochaines sections.

IV.4.a / Signatures de défaillance électro-optique

La figure 142 caractérise l'augmentation du courant à faible niveau d'injection de courant comme cela a été observé dans la partie IV.3. Les mesures $I(V)$ inverses apportent un complément sur cette signature de défaillance par le nouveau paramètre ϕ . Ce dernier caractérise le décalage du minimum de courant et est évalué à $-0,14\text{ V}$ pour la tête optique considéré et après 300 cycles de vieillissement. La prochaine étape est de déterminer le mécanisme de dégradation caractérisé par cette signature de défaillance puis de localiser le défaut au sein de la diode laser.

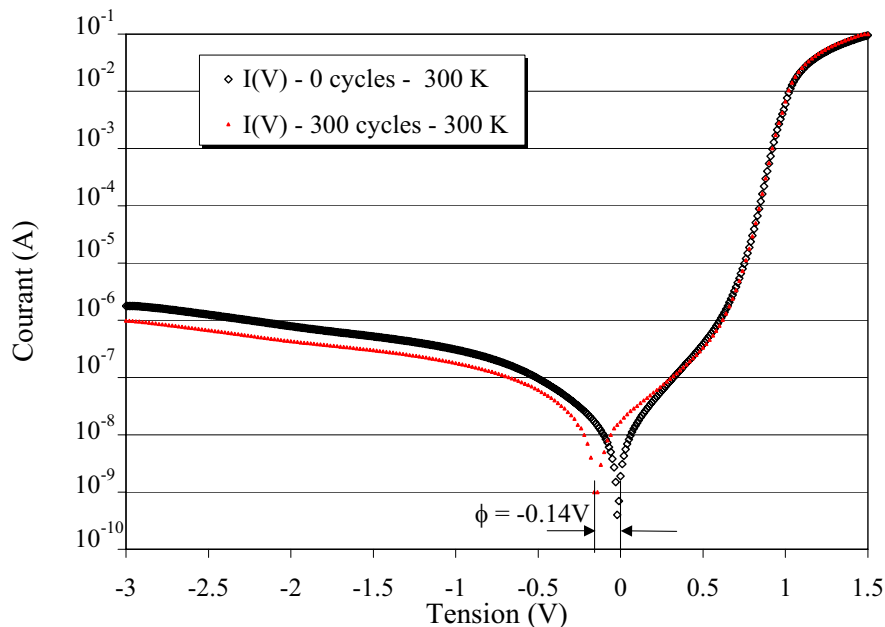


Figure 142 - Courbes représentatives de $I(V)$ mesuré à 300 K ($+27^\circ\text{C}$) avant et après vieillissement

Le décalage en tension de $-0,14\text{ V}$ que nous observons est le siège d'un mécanisme physique de piégeage de charge au sein de la structure de la diode laser. Le piégeage de charge s'effectue lorsque l'on passe de -3 V à 0 V et s'effectue uniquement sur les jonctions de la structure de la diode laser. La figure 143 rappelle la structure de la diode laser et le modèle électrique associé.

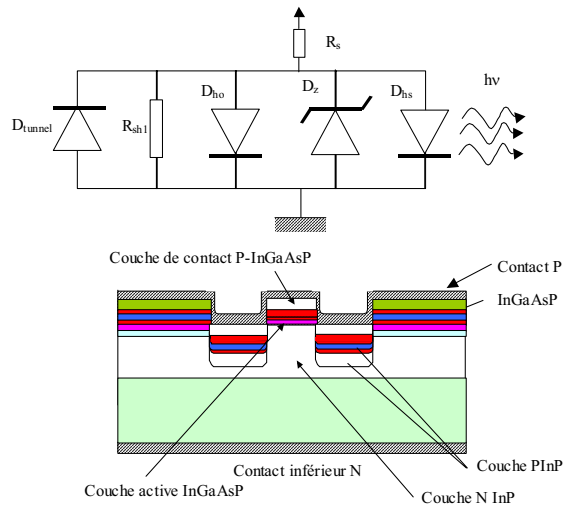


Figure 143 – Schéma du modèle et de la structure de la diode laser

On observe deux zones de jonction :

- ☞ la zone active,

Sur la plage de tension de $-3V$ à $0V$, la zone de déplétion diminue jusqu'à atteindre la largeur pour l'équilibre thermodynamique W_{eq} . La zone de déplétion de largeur la plus importante est située au niveau de la zone active car son dopage est le plus faible [51]. Le piégeage des charges s'effectue dans la zone comprise entre la zone de déplétion pour $-3 V$ et W_{eq} (figure 144).

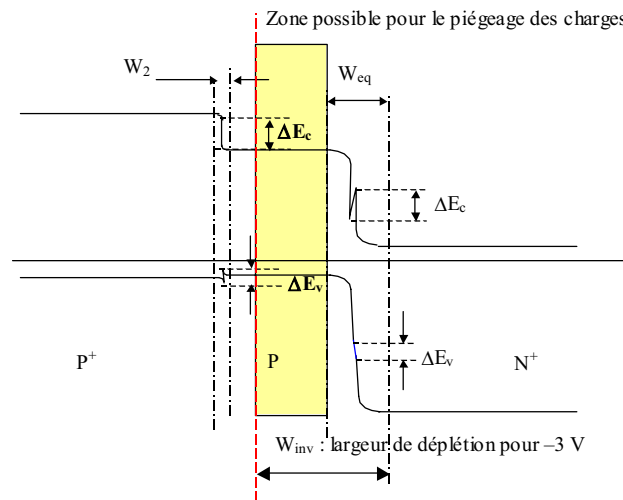


Figure 144 – Schéma de bande de la double hétérostructure de la diode laser

On localise donc le piégeage des charges au niveau de la zone active de la diode laser. Ce phénomène ne peut survenir que par une modification de la structure de bande de cette zone. On peut alors relier ce piégeage de charges avec le décalage de l'enveloppe du spectre vers les faibles énergie.

- ☞ les zones latérales

De la même manière, les jonctions situées au niveau des zones latérales peuvent piéger des charges. Ce phénomène modifie donc la caractéristique de la diode tunnel D_{tunnel} . Il est alors possible d'observer le décalage du minimum de courant ϕ . La modélisation, difficilement réalisable car elle ne prend en compte qu'une représentation $I(V)$ positive, est donnée dans la figure 145. On note l'évolution

du paramètre V_{DD} de 0,04V à 0,06V et le paramètre A_{TUN} passe de $2.10^{-5} \text{ A.V}^{-3}$ à $1,5.10^{-4} \text{ A.V}^{-3}$ obtenues de manière empirique. Au final, la modification des paramètres électriques de la diode tunnel est à relier à une modification de l'intégrité des zones latérales.

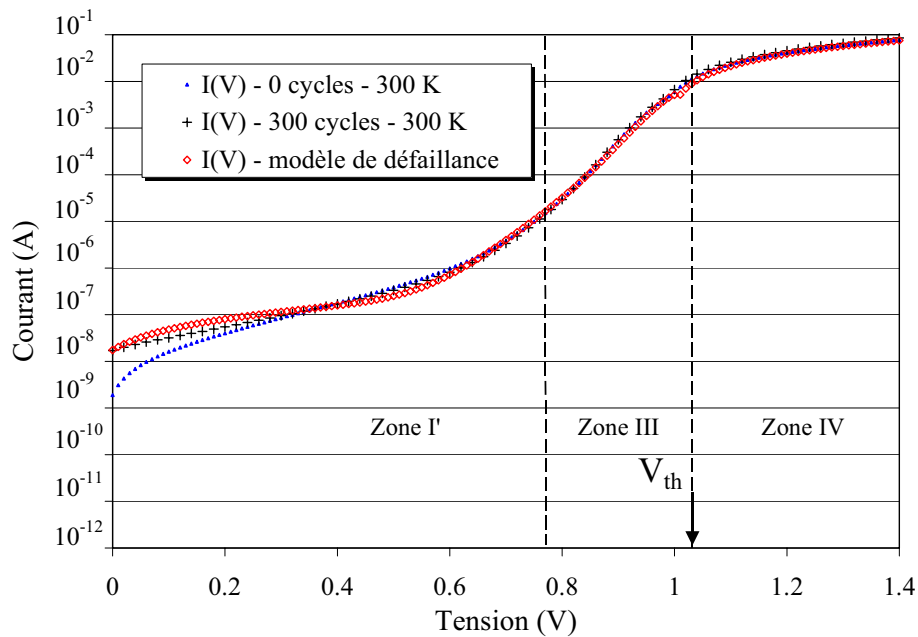


Figure 145 – Simulation de l'augmentation du courant de fuite dans la diode tunnel

La discrimination des hypothèses de défaillance s'opère en utilisant l'évolution de la caractéristique $L(E)$. Le décalage de 0,1 meV du spectre optique correspond, à priori, à une dégradation de la zone active.

Afin de confirmer les résultats avancés, nous avons poursuivi les vieillissements jusqu'à 600 cycles thermiques. La perte de puissance optique est évaluée à 5% et on observe un décalage quasiment nul du spectre optique. De plus, le décalage du minimum de courant ϕ est égal à zéro. Ce point permet de dire que la zone active n'a pas été affectée car la dégradation d'une zone active est en générale irréversible [19, 21]. On peut donc s'orienter vers une instabilité de la conduction de courant des zones latérales de la diode laser. Cette dernière induit une amplitude maximale de variation de la puissance optique de $\Delta P_{opt}=15\%$, du décalage en longueur d'onde de $\Delta\lambda=0,1 \text{ meV}$ et du décalage du minimum de courant $\phi=0,14 \text{ V}$. Ces évolutions de paramètres sont critiques car elles franchissent le critère de défaillance $\Delta P_{opt}=10\%$. La stabilité de la technologie des diodes lasers n'est donc pas maîtrisée.

Nous allons compléter l'étude en analysant l'évolution de la caractéristique $I(V)$ de $-3V$ à $+2 V$, et en particulier du minimum de la courbe en $V=0$, pour une défaillance de type désalignement.

IV.4.b / Signatures de défaillance optique

La figure 146 représente les courbes $I(V)$ et $\eta(I)$ pour des mesures entre $-3V$ et $+2 V$ à 300 K ($+27^\circ\text{C}$) avant et après vieillissement. On confirme que l'évolution des paramètres électrique est inexistante exceptée pour la résistance série. Ce paramètre n'est, à priori, pas corrélé à la défaillance de la zone active mais aux contacts (voir partie IV.3). Seul un désalignement optique peut expliquer la perte de puissance optique. Les outils développés ne permettent pas de continuer l'étude en déterminant la zone de l'assemblage défaillante. Une étude par simulation thermomécanique est susceptible de répondre à ces exigences cependant la connaissance des étapes de fabrication est

nécessaire pour mener l'étude correctement. Le prochain chapitre montre un exemple d'étude que nous avons envisagé mais qui est représentatif d'une autre tête optique provenant du fabricant.

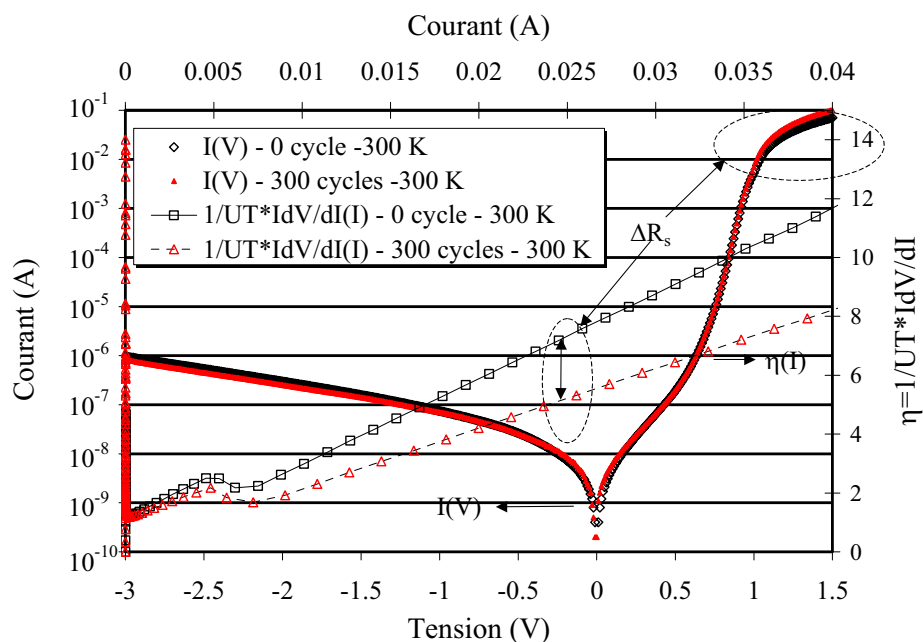


Figure 146 - Courbes représentatives de $I(V)$ et $\eta(I)$ mesuré à 300 K (+27°C) avant et après vieillissement

IV.5 / Synthèse des résultats

L'ensemble des résultats apportés dans les sections précédentes a permis de déterminer un certain nombre de signatures caractéristiques de défaillance de diode laser 1310 nm. Nous avons pu, en particulier, déterminer quelles parties de la tête optique étaient affectées : l'alignement optique ou la diode laser. Trois types de signatures de défaillance ont été distingués :

- dégradation optique de la cavité de la diode laser,
- défaillance de la zone active par la présence de défauts,
- désalignement du système optique.

Ces signatures de défaillance ont déjà été identifiées dans les travaux de **M. Vanzi [59]** et **M. Fukuda [19]** sur des technologies de diodes laser "puce nue". Cependant, les analyses complémentaires en polarisation inverse et sous très faibles niveaux d'injection de courant, couplées à une mesure à basse température, ont permis une meilleure discrimination des mécanismes de défaillance d'une tête optique.

Nous avons mis au point une méthode d'extraction de paramètre permettant de caractériser, sans préparation, la tête optique pour une tension comprise entre 0 et 2 V. Cette dernière est bien adaptée pour des utilisations industrielles car elle est rapide et peu coûteuse.

L'intérêt de cette étude est donc triple :

- On peut caractériser une tête optique et suivre son évolution lorsqu'elle est soumise à des contraintes environnementales définies par l'équipementier. En considérant les résultats, le nombre d'échantillons et les profils de mission, il est possible de déterminer l'adéquation de la tête optique avec l'utilisation demandée. Dans le cas de dégradations graduelles ou rapides, il est possible de suivre l'évolution des paramètres de la tête optique.

- En considérant une étude plus détaillée en collaboration avec un fabricant, il est aussi possible de caractériser et d'optimiser, pour un profil de mission, une tête optique. Nous pourrions, dans un premier temps, déterminer quel élément est le plus critique entre la diode laser et l'alignement du système. Des outils de simulation physique peuvent être ajoutés pour mieux localiser les zones dégradées de la diode laser et valider les hypothèses de mécanismes de défaillance. Dans ce cas nous travaillerons sur la structure exacte de la diode laser. En ce qui concerne la partie assemblage, le chapitre IV développe plus largement cet aspect.
- L'expérience acquise sur de nombreuses têtes optiques permet d'envisager des études sur des systèmes plus complexes ou des composants nouveaux tels que les SOA¹⁹ ou les DBR²⁰.

V / CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en lumière les aspects expérimentaux de notre travail focalisé essentiellement sur la détermination de signatures précoces de défaillance. Les limites du banc d'analyses électro-optiques, l'intérêt de l'étude et le potentiel de notre méthode de travail ont été mis en évidence.

Ces limites sont caractérisées par :

- Une difficulté de mesurer la puissance optique en dessous du seuil de la diode laser.
- La difficulté pour la localisation d'une zone critique de type assemblage lors d'une perte de couplage optique.

En revanche, l'intérêt de cette étude s'est porté sur :

- L'extraction des paramètres fonctionnels initiaux d'un composant optoélectronique émissif situé au sein d'un assemblage pouvant être complexe. La base de données expérimentale, ainsi créée, a permis une évaluation de la dispersion technologique de chaque système optoélectroniques étudié
- L'analyse des profils de mission a contribué à définir les vieillissements appliqués aux systèmes considérés. L'évolution des paramètres électro-optique, pendant le vieillissement, a donc été correctement évaluée puisque la sensibilité paramétrique était définie. Cette dernière est de 0,1 meV pour le décalage du spectre optique, moins de 1% de variation du courant de seuil et du facteur d'idéalité et moins de 1% de dérive de la puissance optique et du courant.

Le potentiel de notre système réside dans :

- La détermination du type de contrainte de vieillissement le plus critique pour un système optoélectronique.
- La localisation des zones dégradées au sein du composant : contact, zone active et zone latérale.
- La relation entre la sensibilité des zones du composant et la contrainte critique de vieillissement.

Le point essentiel de cette étude réside dans la détermination du modèle électrique statique équivalent permettant de simplifier l'analyse de défaillance des systèmes étudiés. Une extraction de signatures précoces de défaillance après une durée limitée de vieillissements accélérés, à faible facteur d'accélération (moins de 100 heures et moins de 200 cycles thermiques) sous des contraintes proches du profil de mission a été effectuée. Ces signatures ont pour but d'initier des mécanismes de dégradation relatifs aux technologies étudiées démontrant l'obtention de signatures de défaillance

¹⁹ SOA – Amplificateur optique sur semiconducteur – Semiconductor Optical Amplifier

²⁰ DBR – Diode laser accordable en longueur d'onde – Distributed Bragg Reflector laser diode

comparables aux technologies "puces nues" à partir de caractérisation du composant dans son environnement final, de quantifier l'ordre de grandeur des conséquences de la dégradation et d'évaluer la fiabilité de la technologie. Cet ensemble de considérations nous a permis d'aboutir, à la demande d'équipementiers, à un plan d'actions à mener pour déterminer et localiser une défaillance au sein d'un système optoélectronique émissif (figure 147). Ce diagramme général permet de poser les bases d'une méthodologie de diagnostic de défaillances à partir de la connaissance d'un nombre limité de paramètres (5) relativement faciles à extraire des mesures électro-optiques.

La perte de puissance optique, sans modification des caractéristiques optiques du composant, traduit une perte de couplage optique par désalignement. Ce point peut être évalué par une analyse électro-optique mais une méthodologie d'étude par simulations thermomécaniques permet de déterminer l'origine du problème. Ce dernier point sera plus particulièrement développé dans le prochain chapitre.

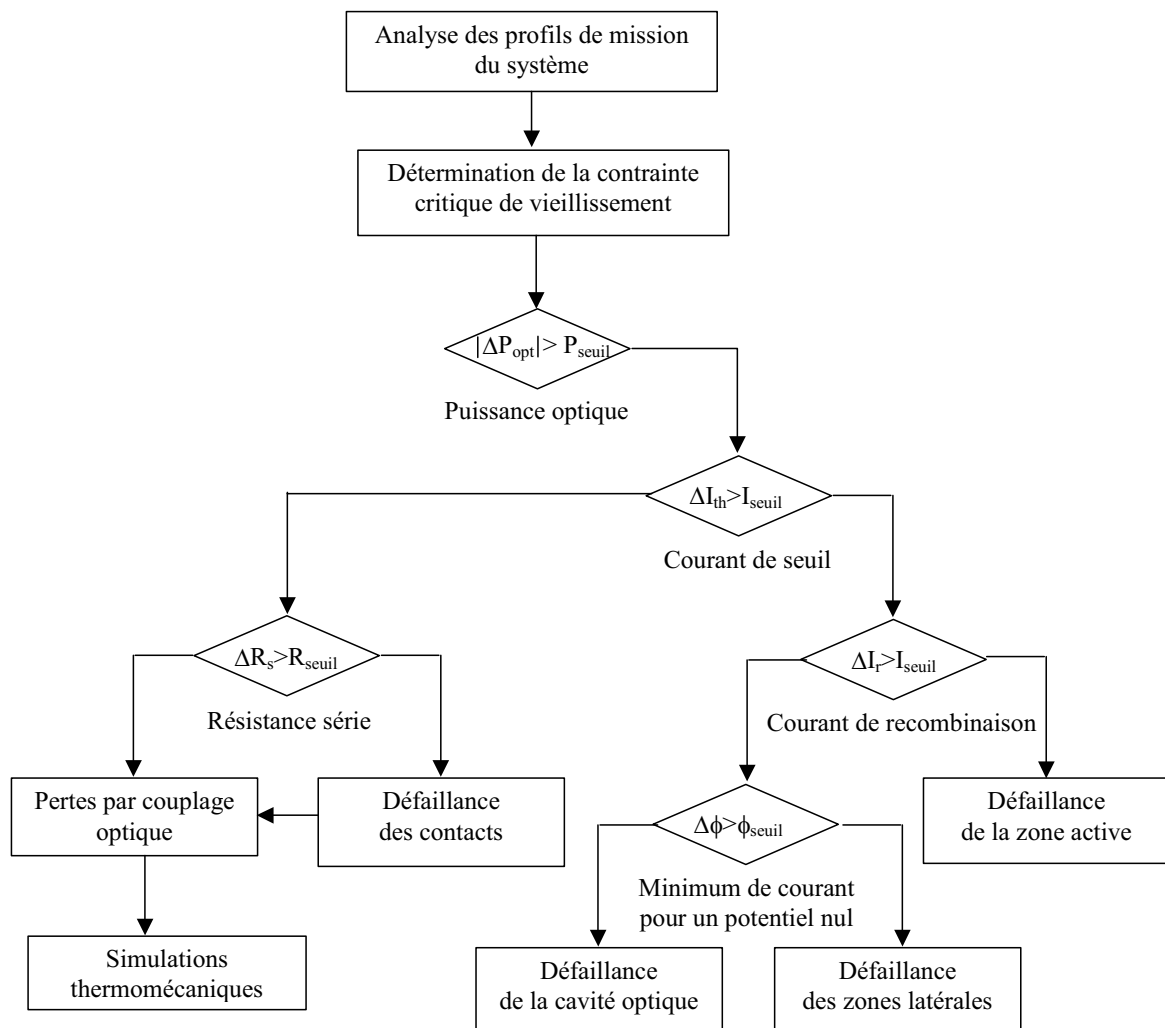


Figure 147 – Diagramme du diagnostic de défaillance électro-optique d'un système optoélectronique

Chapitre IV - Etude thermomécanique d'une tête optique – Evaluation des zones critiques

I / INTRODUCTION

Les composants optoélectroniques pour les télécommunications se distinguent des autres composants par la nécessité de coupler la puce émettrice ou réceptrice de lumière à une fibre optique monomode dont le cœur est inférieur à 10 μm de diamètre. En conséquence, le couplage d'une telle fibre avec le faisceau issu d'une diode laser requiert une précision d'alignement sub-micronique de la puce et de la fibre [105].

Les travaux exposés au cours des chapitres II et III se sont concentrés sur la justification et le développement des caractérisations électro-optiques statiques de systèmes optoélectroniques émissifs IR. L'intérêt majeur a été de mettre en lumière des signatures, images de défaillance après un nombre réduit de tests accélérés, pouvant affecter la puce émettrice mais aussi l'assemblage (dérive de la puissance optique au cours du temps). Une méthodologie d'extraction de signatures de défaillance précoces et de diagnostic de défauts, exposée au chapitre III, a été mise en œuvre avec succès pour des diodes électroluminescentes 935 nm et des têtes optiques Fabry-Pérot 1310 nm. Cependant, nous avons montré qu'elle ne permet pas de conclure sur l'origine de cette instabilité optique lorsqu'elle n'est pas en relation directe avec la puce.

De par les multiples mécanismes de dégradation pouvant expliquer cette défaillance, soit liée au processus de fabrication, soit d'origine thermomécanique, les techniques de microanalyse généralement adaptées au composant, présentent des limites en terme de détection et de localisation d'un défaut d'alignement optique dans un système optoélectronique complet.

La démonstration de la fiabilité par l'intermédiaire d'une extraction de la durée de vie du système, ne résultant uniquement que d'une estimation, doit donc être renouvelée en profondeur à partir de modélisations physiques des défaillances. Cette nouvelle approche se base sur une complémentarité entre les études expérimentales et les simulations physiques et fonctionnelles, devenues des étapes indispensables pour la prévision de la fiabilité. Pour des technologies en développement, l'intérêt fondamental de ces modélisations est de permettre d'évaluer, a priori, la criticité thermomécanique d'une configuration, les conséquences de défauts technologiques ainsi que les fluctuations des processus de fabrication et de proposer des solutions technologiques correctives pour augmenter la robustesse de ces technologies. Des tests expérimentaux doivent également être menés en parallèle afin de valider les résultats de simulation et de cibler les niveaux de contraintes à apporter permettant de réduire le nombre de tests de fiabilité. Les standards de qualification pour les modules émetteurs optoélectroniques dédiés aux applications de télécommunication sont des cycles thermiques dimensionnés en nombre de cycles (500) et en amplitude ($-40^{\circ}\text{C}/+85^{\circ}\text{C}$) par la norme Telcordia GR-468 CORE.

Ce dernier chapitre s'attache donc à décrire une méthodologie d'évaluation globale de la criticité thermomécanique d'une tête optique complète d'émission centrée sur 1550 nm, menée en étroite collaboration avec le fabricant, et d'identification du facteur susceptible d'être à l'origine d'une dérive de puissance optique après 500 cycles thermiques ($-40^{\circ}\text{C}/+85^{\circ}\text{C}$).

A l'aide de simulations non-linéaires par éléments finis utilisant le code ANSYS, une évaluation des zones sensibles de la structure et une cartographie spatiale tridimensionnelle des contraintes thermomécaniques associées à des déplacements maximums vont permettre de déterminer les parties

critiques de la structure en fonction des contraintes liées aux différentes étapes de fabrication et aux chargements en température lors de cycles thermiques. Une méthodologie permettant de déterminer le lieu des points critiques de la tête optique sera construite en tenant compte de :

- ❑ l'alignement entre la puce et la fibre optique, point sensible pour les têtes optiques,
- ❑ la complexité de l'assemblage réalisant cet alignement rendant difficile la détermination des zones critiques.

Les objectifs de ce chapitre se résument en trois points :

- ❑ déterminer les zones critiques de l'assemblage responsable d'une instabilité du couplage optique et/ou une dérive de puissance optique,
- ❑ effectuer une simulation sur des sous-ensembles reliés aux zones critiques définies et de les valider par des tests expérimentaux spécifiques,
- ❑ améliorer le système après les conclusions apportées sur la criticité du lieu géométrique concerné.

A l'issue de l'étude, nous pourrons alors poser les bases d'une méthodologie permettant d'évaluer les degrés de criticité réels entre le composant et le système d'alignement optique. En parallèle, une proposition d'un plan de validation expérimentale tenant compte des étapes de fabrication et isolant les zones critiques prédéfinies sera exposée pour :

- ❑ valider les simulations afin de les corriger si nécessaire,
- ❑ évaluer la criticité réelle des différents sous-ensembles,
- ❑ proposer des solutions technologiques correctives à apporter aux différents sous-ensembles pour augmenter la robustesse de la tête optique soumise à des cycles thermiques 233 K/358K (-40°C/+85°C).

Le but final est de mettre en œuvre un "macromodèle" générique développé sous ANSYS, en accord avec le fabricant, dont les paramètres d'entrée peuvent être, pour la technologie étudiée, relativement faciles à configurer.

II / PRESENTATION DE LA TETE OPTIQUE

Cette partie s'attache à décrire la tête optique dans son ensemble, puis développe les différents sous-ensembles constituant cette dernière en donnant une évaluation technologique des différents éléments. Elle s'architecture autour de trois sous-parties :

- ❑ Une analyse technologique de l'ensemble de la tête optique : cette section permettra de détailler la géométrie de la structure et de présenter la méthodologie utilisée pour identifier les zones critiques.
- ❑ Une mise en évidence des zones critiques : ce deuxième volet s'attache à décrire l'ensemble des zones critiques qui feront l'objet d'une étude par simulation.
- ❑ Un plan d'étude : ce dernier point décrira de manière générale la méthodologie d'analyse des simulations et des tests d'expertises associés.

II.1 / Analyse technologique de l'ensemble de la tête optique

La structure générale d'une tête optique émissive a déjà été présentée dans le chapitre I. Rappelons que cette dernière est constituée d'une diode laser, d'une lentille de collimation, d'un isolateur, d'une lentille de focalisation et d'une fibre optique. La figure 148 représente l'association des différents éléments énumérés ci-dessus et souligne la présence d'un nombre important d'interfaces et de pièces élémentaires. L'assemblage de la tête optique nécessite un grand nombre d'opérations

technologiques précises et délicates.

Compte tenu de la géométrie de l'ensemble et des phases d'assemblage, nous avons séparé la tête optique en trois sous-ensembles principaux :

1. Palette laser/porte lentille1 (n°1)
2. Connecteur fibre optique nommé "pigtail" (n°2)
3. Boîtier/thermorégulateur (module thermoélectrique (Peltier)) (n°3)

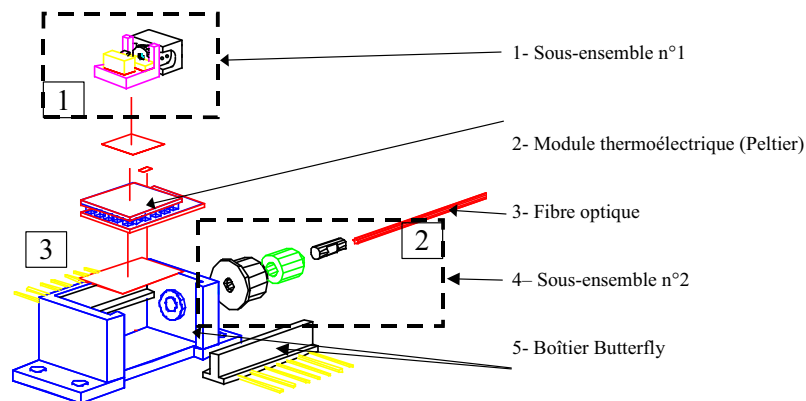


Figure 148 – Vue d'ensemble de la tête optique

Le boîtier, de type Butterfly, permet l'alignement entre la fibre optique et la diode laser de manière indirecte à travers un couple de lentille et un isolateur. Ce type de boîtier est spécialement adapté pour assurer une herméticité totale à l'intérieur de l'enceinte définie par les parois du boîtier (sous-ensemble n°3) [106]. Ce point important permet de palier aux faiblesses de la diode laser qui réside essentiellement dans l'oxydation des miroirs externes de la cavité optique. Si la disposition volumique du boîtier se prête bien à la qualité exceptionnel de l'herméticité, la réalisation de ce dernier au moyen de brasure haute température et scellement céramique est incontournable afin de maintenir cette qualité durant la totalité du fonctionnement de la tête optique [107]. De plus, l'agencement de type Butterfly permet une meilleure disposition de la partie connexion avec la fibre optique (pigtail). Une fois encore, l'assemblage du bloc central (sous-ensemble n°3) et de la partie connecteur optique (sous-ensemble n°2) est réalisé par soudure Nd : YAG afin d'assurer une herméticité totale pour protéger le cœur de la fibre optique dont la sensibilité à l'humidité est très élevée [6].

Les matériaux constituant la tête optique possèdent des caractéristiques physico-chimiques très différents. Les paramètres physiques, en particulier le coefficient de dilatation thermique (CTE), sont eux aussi différents. L'association des différents éléments et leur différence de comportement en fonction de la température peut induire la présence de zones critiques.

II.2 / Identification des zones critiques

Cette section pose les bases d'une méthodologie nécessaire pour déterminer les zones critiques, identifiées au sein de chaque sous-ensemble, en s'appuyant sur trois critères distincts :

- Distance par rapport à l'axe optique,
- Amplitude du gradient de CTE entre deux matériaux,
- Niveau des efforts extérieurs permanent induisant une déformation permanente ou des efforts extérieurs dynamiques créant une accumulation de contraintes pouvant se relaxer dans le temps.

II.2.a / Définition des sous-ensembles proches de l'axe optique

Nous avons identifié deux sous-ensembles proches de l'axe optique : la palette laser/porte-lentille¹ et la partie connecteur fibre optique. Ces deux éléments contiennent, en effet, les systèmes permettant d'aligner le faisceau laser.

Le sous-ensemble n°1 contient la diode laser et la lentille n°1 alors que le sous-ensemble n°2 contient la fibre optique. Les trois éléments cités forment la chaîne élémentaire de l'alignement optique. Les sous-ensembles attachés sont donc bien *proches de l'axe optique* et il est indispensable de connaître les propriétés thermomécaniques des différents matériaux afin d'identifier les interfaces critiques. Nous pourrions, en particulier, localiser ces dernières au sein des sous-ensembles définis dans cette section.

II.2.b / Analyses des propriétés thermomécaniques des matériaux constituant la tête optique

Il a été démontré dans de nombreux travaux que la différence des CTE de plusieurs matériaux constituant un système pouvait être à l'origine d'instabilité thermomécanique d'assemblage [108]. L'analyse de l'assemblage passe donc par une comparaison des différents CTE.

Le tableau 30 présente les CTE des différents matériaux constituant la tête optique. Nous avons reporté le numéro correspondant au matériau enregistré sous le logiciel ANSYS, le numéro des pièces élémentaires en accord avec la figure 148 et la figure 149, le nom du matériau et la valeur moyenne du CTE.

n°ANSYS	Numéro de pièce	NOM du matériau	CTE (ppm/°C)
1	1, 2, 6,8a, 9 et 10	Kovar	5,86
2	12 et 14 (figure 149)	Alpha	26
3	11	AlN	4,4
4	13	Al ₂ O ₃	6,7
5	Puce laser	InP (puce)	4,48
6	Brasure puce	Au _{0,8} Sn _{0,20}	6,1
2(f)	8b	Zirconium	7
3f	7	Silice	0,56
4(f)	Colle fibre /férule	EPOTEK ²¹	13,7
7	4a	AIO	7,7
8	4b	Bi ₂ Te ₃	-
9	3 et 5	Epsilon	25

Tableau 30 – Liste des matériaux utilisés pour la tête optique LMI avec leur CTE

Ce tableau montre que les différences de CTE les plus prononcées se trouvent au niveau des interfaces :

²¹ Cet élément a fait l'objet de caractérisations mécaniques réalisées par le Laboratoire de Ressources Collage de l'Université Bordeaux 1. A savoir : des essais de traction sur éprouvettes de dimensions normées, réalisation d'une cinétique de réticulation, un contrôle de l'efficacité des couples temps/température et l'analyse mécanique dynamique.

- ☞ Kovar/brasure - $\Delta\text{CTE} = 19 \text{ ppm/K}$
- ☞ Colle/Kovar - $\Delta\text{CTE} = 8 \text{ ppm/K}$ et Zirconium/colle $\Delta\text{CTE} = 6 \text{ ppm/K}$.

Ces éléments sont susceptibles de passer dans le domaine plastique des courbes contrainte-déformation sous l'effet de la différence de CTE induit par un chargement en température VRT (233 K/358 K – 20 K/ min). Cette caractéristique nous conduit donc à considérer ces interfaces comme des zones critiques potentielles [48].

Nous pouvons, à présent, localiser ces interfaces au sein des sous-ensembles n°1 et 2 :

- ☞ Sous-ensemble n°1 : les interfaces du sous-ensemble considéré comportent des brasures Epsilon pour : les interfaces Palette laser/Peltier, Alpha pour les interfaces palette laser/embase diode laser et embase diode de monitoring et Au₈₀Sn₂₀ pour la brasure de la diode laser et de la diode de monitoring.
- ☞ Sous ensemble n°2 : l'interface entre la fêrule et la fibre optique est réalisée à l'aide de la colle EPOTEK.

La condition complémentaire, permettant de considérer une zone comme critique, porte sur la nature des efforts extérieurs.

II.2.c / Visualisation des points d'appui

L'assemblage du système est réalisé à l'aide de trois types de procédés de fabrication différents qui sont le soudage laser Nd : YAG, le brasage et le collage, et subit, une fois réalisé, la contrainte liée aux standards de qualification (cycles VRT $-40^{\circ}\text{C}/+85^{\circ}\text{C}$). Les différentes forces extérieures appliquées sur les sous-ensembles considérés sont parfaitement définies et sont de deux types différents :

- Forces extérieures dynamiques : elles sont issues des contraintes appliquées à un sous-ensemble lors d'une étape de fabrication.
- Forces extérieures permanentes : elles sont la cause de propriétés particulières de matériaux (magnétisme...) ou de contraintes environnementales définies par le profil de mission de la tête optique.

Nous allons donner les différents points d'appuis pour les sous-ensembles dont nous avons fait l'étude, c'est à dire le sous-ensemble palette laser/porte-lentille1 (n°1) et le sous-ensemble fibre optique (n°2).

II.2.d / Localisation des zones critiques

- *Etude du bloc palette laser / porte-lentille1 (sous-ensemble n°1)*

Le sous-ensemble n°1, défini par l'ensemble palette laser/porte-lentille1, comporte les deux types de contraintes extérieures :

- Deux forces dynamiques : L'association de la palette laser et du porte-lentille1 s'effectue par des tirs laser Nd : YAG. Cette étape de fabrication comporte deux contraintes extérieures essentielles. La première est la force de pression permettant de maintenir les deux pièces en contact pendant les tirs. La deuxième est l'énergie calorifique apportée par les tirs laser Nd : YAG.
- Deux forces permanentes : Le sous-ensemble n°1 est soumis à deux forces extérieures permanentes que sont le poids \vec{P} et la force magnétique \vec{F}_m induite par la polarisation de l'isolateur situé dans le porte-lentille1.
- Une contrainte environnementale : Les cycles thermiques 233 K/358 K ($-40^{\circ}\text{C}/+85^{\circ}\text{C}$) mettent en évidence la différence de CTE entre le Kovar, l'alumine et la brasure Epsilon. Nous ferons

donc une étude particulière de l'ensemble palette laser / Peltier.

La figure 149 présente le sous-ensemble sélectionné avec les différentes forces extérieures appliquées et les zones critiques (zones grisées).

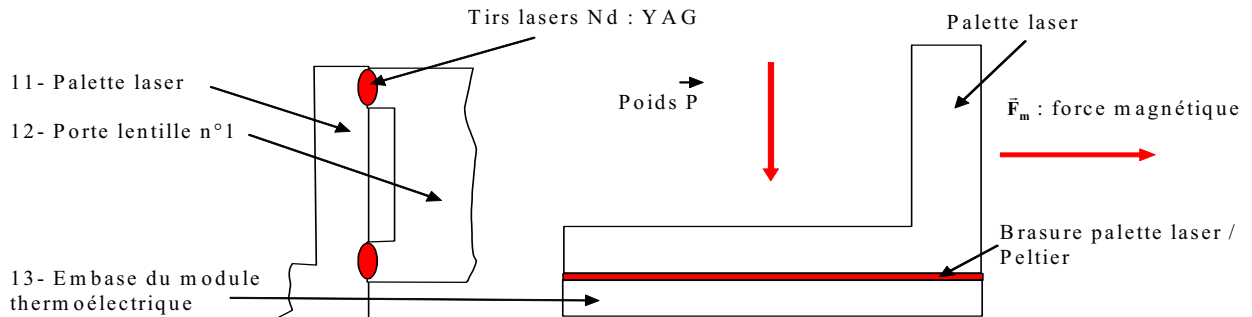


Figure 149 - Points d'appui et zones critiques sur le sous-ensemble n°1

Nous observons que ce sous-ensemble comporte deux zones critiques :

- Les soudures laser Nd : YAG : Les soudures laser Nd : YAG entre la palette laser et le porte-lentille1 constituent une phase critique. En effet, le système comportant ces deux pièces est hyperstatique (voir annexe C.1) et n'a pas de symétrie cylindrique ou sphérique. La condition d'isostaticité est définie par : le nombre total d'inconnues statiques du système doit être inférieur ou égal au nombre d'équation décrivant le système (voir annexe C.1.2). Un système hyperstatique comporte plus d'inconnues statiques que d'équations. Ceci se traduit par une indétermination sur certaines inconnues statiques en relation avec le positionnement, le parallélisme, la coaxialité... Ce système peut donc se déformer, accumuler des contraintes et relaxer ces contraintes avec une indétermination relativement importante engendrée par le haut degré d'hyperstaticité.
- Le report entre la palette laser et le Peltier : La brasure (Epsilon) permettant la liaison de type encastrement entre la palette et le module thermoélectrique (Peltier) constitue également un point faible du système. Son épaisseur d'origine étant de 15 μm et après écrasement proche de 8 μm couplée à un manque d'homogénéité dans l'épaisseur, on peut supposer qu'un éventuel affaissement de l'ensemble palette laser – porte-lentille1 est possible et peut atteindre quelques microns. Ceci peut conduire à l'apparition de défauts induits ou à l'aggravation de défauts préexistants (délamination, fissuration). Une dégradation progressive de la puissance optique peut alors résulter du désalignement de l'axe optique, principalement en translation, entre le système laser-lentille 1 et le système lentille 2-fibre.

Nous avons donc divisé l'étude de ce sous-ensemble en deux parties :

- Le sous-ensemble palette laser/porte-lentille1 (sous-ensemble n°1-a) avec une analyse particulière des tirs laser Nd : YAG,
- Le sous-ensemble palette laser/embase Peltier (sous-ensemble n°1-b) avec une évaluation de la criticité thermomécanique du joint de brasure entre la palette laser et l'embase du thermorégulateur (Peltier).

- *Etude du bloc fibre optique*

Le sous-ensemble n°2, défini par l'ensemble fibre optique, comporte les deux types de contraintes extérieures :

- Deux forces dynamiques : La liaison de la fêrulle et du guide fêrulle s'effectue par des tirs laser Nd : YAG. Cette étape de fabrication comporte deux contraintes extérieures essentielles. La première est la force de pression permettant de maintenir les deux pièces en contact pendant les tirs. La deuxième est l'énergie calorifique apportée par les tirs laser Nd : YAG.
- Une force permanente : le sous-ensemble n°2 est soumis au poids \vec{P} .
- Une contrainte environnementale : les cycles thermiques 233 K/358 K (-40°C/+85°C) mettent en évidence la différence de CTE entre le Kovar/Zirconium, et entre SiO₂ et la colle EPOTEK. Nous ferons donc une étude particulière de l'ensemble fibre optique.

La figure 150 présente le sous-ensemble n°2 avec les différents efforts extérieurs et les zones critiques.

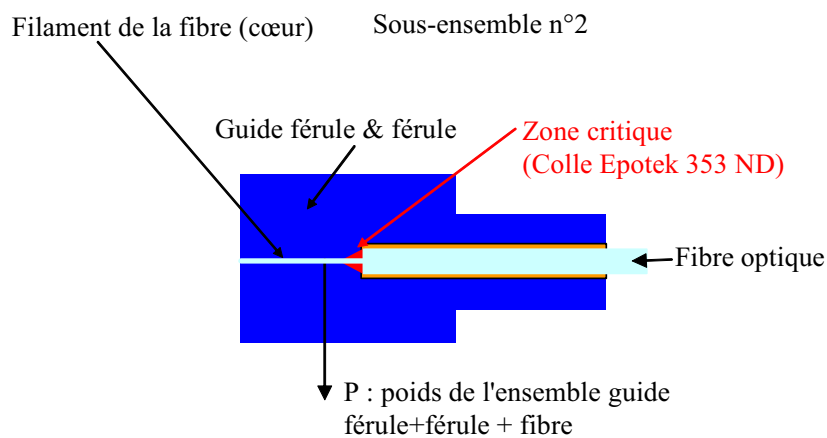


Figure 150 – Points d'appui et zones critiques sur le sous-ensemble n°2

Une analyse identique au sous-ensemble précédent montre que, d'une part les soudures laser Nd : YAG permettant de solidariser la fêrulle avec le guide fêrulle et d'autre part le collage de la fibre optique dans la fêrulle doivent être considérées comme critiques d'un point de vue thermomécanique. Ce sous-ensemble comporte donc deux zones critiques :

- Colle dans le cône de la fêrulle en Zirconium : La perte totale de puissance optique sur certaines têtes optiques a été mise en relation avec la rupture de la fibre optique. La localisation de la zone sensible, réalisée par le fabricant, a été révélée par une analyse de défaillance spécifique de la partie "pigtail" [109]. Une zone de fortes contraintes de traction/compression a été mise en évidence par des micro-sections effectuées par le fabricant. Ces résultats appuient les conclusions mises en évidence dans le rapport fourni sur les fêrules. En effet, nous pouvons observer sur un certain nombre de microsections la rupture de la fibre optique. L'hypothèse formulée dans ce cas est de considérer que la rupture de la fibre est induite par une concentration élevée de contraintes localisées dans le cône de fêrulle. Nous allons mettre en évidence ces contraintes avec un modèle de simulation centré sur l'assemblage fibre optique.
- Soudures lasers YAG sur l'ensemble fibre optique : Le caractère symétrique de la pièce et des tirs laser Nd : YAG implique que la déformation de l'ensemble s'effectue de manière uniforme autour de l'axe optique. L'assemblage du sous-ensemble par les soudures YAG apparaît donc

comme peu critique et n'a pas fait l'objet d'un développement en simulation.

Nous allons, dans la prochaine partie, mettre en évidence les zones critiques retenues, situées dans les sous-ensembles n°1 et 2.

II.3 / Synthèse – Plan d'étude

Nous avons identifié trois zones critiques possibles :

- Tirs YAG au niveau du sous-ensemble n°1-a : La criticité de ce sous-ensemble se situe au niveau de l'assemblage par soudures laser Nd : YAG de la palette laser avec le porte-lentille1. Les grandeurs physiques définissant les efforts extérieurs sont fonction du temps caractérisant le dépôt surfacique d'énergie laser.
- Brasure du sous-ensemble n°1-b : La notion de fatigue thermomécanique d'une brasure ne peut être révélée que par l'observation des déformations du joint. L'amplitude maximale des déformations est déterminée par la différence de CTE entre le joint de brasure et les matériaux à assembler. Les grandeurs physiques définissant les efforts extérieurs sont des chargements en température sous forme de cycles thermiques.
- Fibre optique au niveau du sous-ensemble n°2. Dans ce dernier cas, la différence de CTE entre les différents éléments de l'assemblage et la colle contribuent à la concentration de niveau de contraintes critiques pour la bonne tenue mécanique du filament de la fibre optique. Afin d'évaluer la criticité de cet assemblage, les cycles thermiques 233 K/358 K (-40°C/+85°C) sont requis.

L'objectif majeur s'argumente autour de la mise en relation entre le degré de criticité de chaque zone et la déviation de l'axe optique. Une étude expérimentale appliquée aux têtes optiques considérées a permis d'évaluer, pour une déviation angulaire de l'axe optique de 0,02° ou une translation de l'axe de 1,4 µm, une perte de couplage optique de 10% correspondant au critère de défaillance.

Dans la partie suivante, nous allons, à l'aide de simulations par éléments finis, proposer des interprétations concernant la criticité des zones sensibles au sein des sous-ensembles prédéfinis.

III / RESULTATS DES SIMULATIONS THERMOMECHANIQUES

Cette partie propose les résultats de simulations pour les différents sous-ensembles énumérés dans la partie II. Nous les exposerons dans l'ordre de criticité proposé précédemment. L'agencement de chaque partie s'effectuera suivant la méthodologie suivante :

- Développement d'une présentation théorique pour certains sous-ensembles afin de préciser les choix des types de simulation : physique ou thermomécanique et dynamique ou statique.
- Représentation du modèle ANSYS associé aux sous-ensembles avec la représentation des éléments finis.
- Précision des conditions de simulation traduisant les étapes de fabrication ou les contraintes environnementales.
- Identification des zones critiques en soulignant la cartographie des niveaux de contraintes et la localisation de déformations élevées.

Une liaison entre les contraintes ou les déformations et les contraintes extérieures au système sera établie. Nous évaluerons, par la suite, l'impact des contraintes extérieures sur le désalignement optique et donc la perte de puissance optique.

La justesse des simulations réalisées dépend en partie de la qualité des valeurs numériques des différentes propriétés des matériaux nécessaires aux analyses. Afin d'améliorer cette qualité, une

synthèse bibliographique des différentes valeurs nécessaires aux simulations complétée par des caractérisations expérimentales des matériaux a donc été réalisée [110, 111].

III.1 / Influence des soudures par lasers Nd : YAG sur le sous-ensemble n°1-a

III.1.a / Problématique

La représentation schématique du sous-ensemble n°1-a, donnée en figure 151, permet de distinguer l'assemblage des deux éléments palette laser et porte-lentille1 et leur liaison à effectuer par des soudures au laser Nd : YAG. Les différents intérêts de cette technique d'assemblage sont :

- la rapidité d'exécution (environ 100 s par série de tirs) [36, 112],
- la précision et la répétitivité des soudures qui sont adaptées à la dimension des têtes optiques (quelques centaines de μm) et permettent de garantir une précision d'alignement de $\pm 2 \mu\text{m}$ [113],
- la réalisation de boîtiers hermétiques dont la constitution principale est un alliage métallique (Kovar - FeNiCo ou Invar - FeNi) favorise cette technique d'assemblage [114].

Ce procédé de fabrication apporte une énergie localisée très importante par rapport au volume de la partie soudée (quelques joules (J) pour $15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3$) susceptible d'accumuler des contraintes relatives à des gradients thermiques élevés au niveau de cette interface [115 , 116].

De plus, une analyse mécanique va permettre de montrer que la nature hyperstatique de la liaison mécanique entre les deux éléments va probablement jouer un rôle néfaste au sein de la structure contribuant à la rendre critique. La notion d'hyperstaticité d'un système est plus particulièrement développée dans l'annexe C.1.

Une éventuelle déviation de l'axe optique *résultant* des déformations du sous-ensemble n°1-a après le soudage YAG peut alors être *rattrapée* par un *alignement dynamique* du sous-ensemble n°2 en mesurant la puissance optique en bout de fibre. Cependant le caractère hyperstatique de la liaison du sous-ensemble n°1-a implique la non-reproductibilité de fabrication de l'assemblage mais également une possible relaxation, non maîtrisée, des contraintes accumulées.

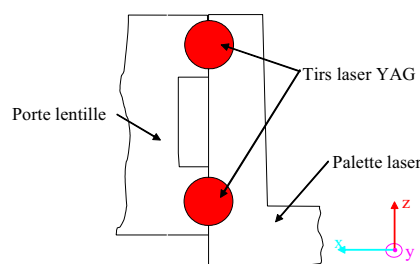


Figure 151 – Représentation schématique des deux éléments, palette laser et porte-lentille1, soudé par tirs laser Nd : YAG

Les objectifs de l'étude sont les suivants :

- Par une analyse mécanique, préciser les différentes liaisons du sous-ensemble, hyperstaticité, dissymétrie et l'évolution de la température du système pendant les tirs laser Nd : YAG pour adapter les simulations afin de traduire au mieux ces conditions par un modèle approprié.
- Déterminer la cartographie des températures du sous-ensemble soumis à la contrainte des tirs laser Nd : YAG.
- Evaluer l'ordre de grandeur de la déviation résiduelle de l'axe optique et son impact sur la

technologie,

- Etablir des hypothèses de mécanismes de déviation de l'axe optique en tenant compte du processus de fabrication de la tête optique.

III.1.b / Bilan des analyses mécanique et thermique du sous-ensemble

- Liaisons entre palette laser et porte-lentille1

L'étude de la liaison palette laser/porte-lentille1 peut se diviser en deux parties :

Liaison pendant l'alignement : nous sommes alors en présence de quatre liaisons planes en parallèle schématisées dans la figure 152.

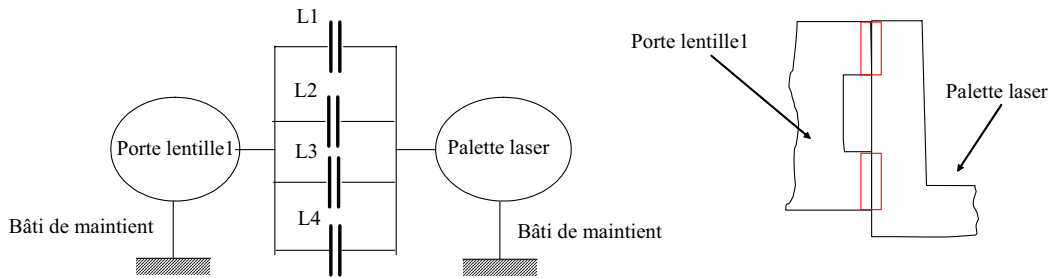


Figure 152 – Schéma des liaisons entre palette laser et porte-lentille1 pendant la phase d'alignement

Une étude, développée plus en détail dans l'annexe C.1, permet de conclure sur le degré d'hyperstaticité d'ordre 3 de la structure. De manière simple, on définit la notion d'hyperstatisme en considérant un système, composé de plusieurs éléments dont les liaisons introduisent plus d'inconnues statiques que d'équations mécaniques.

L'hypothèse retenue s'appuie sur le fait que les liaisons sont parfaites et les pièces indéformables. Cette hypothèse constitue une approximation car les colonnettes se déforment sous l'action de la force de pression comme cela est démontré dans l'annexe C.3. Le système comporte plus d'inconnues que d'équations possibles (degré hyperstatique) en se référant à l'annexe C.1. En d'autres termes, il est impossible que les deux surfaces en contact soient parfaitement planes, parallèles et coplanaires. En effet, aucune méthode rapide et systématique ne permet d'obtenir une qualité de surface à partir d'un alliage métallique répondant aux critères demandés. Ceci se traduit alors par un positionnement des pièces utilisées dépendant fortement de leur qualité d'usinage et/ou de la tolérance sur l'état de surface et de planéité des surfaces en contact impossible à réaliser.

Liaison après les tirs laser Nd : YAG de soudure : Dans ce cas, le système comporte quatre liaisons de type encastrement en parallèle données par la figure 153.

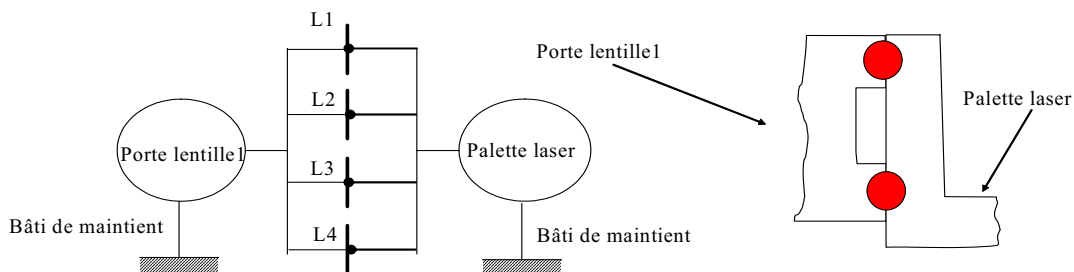


Figure 153 – Schéma des liaisons entre palette laser et porte-lentille1 après les tirs laser Nd : YAG de soudure

Si nous considérons que les colonnettes répondent à la définition des poutres encastées aux deux extrémités, les résultats de la mécanique générale, énonçant qu'une poutre en liaison encastrement aux deux extrémités est un système hyperstatique, sont alors utilisés.

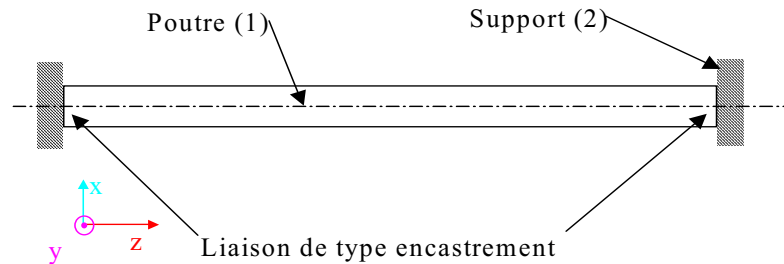


Figure 154 – Représentation schématique d'une poutre fixée à un support par deux liaisons de type encastrement

Définissons trois axes x , y et z représentés dans la figure 154. La déformée de la poutre maintenue entre deux liaisons encastrement et soumise à une élévation de température est complexe et difficile à prévoir (système hyperstatique). Dans notre étude, les colonnettes de la palette laser peuvent être assimilées à des poutres encastées aux deux extrémités : liaisons L1 et L2 pour la première colonnette et liaisons L3 et L4 pour la deuxième colonnette.

Un système hyperstatique est considéré comme sensible puisqu'il dépend de la fabrication initiale des pièces élémentaires constituant le sous-ensemble et affecte fortement le positionnement entre les pièces et donc la fabrication finale du sous-ensemble.

Le simulateur ANSYS considère un modèle géométrique parfait qui ne permet pas de traduire l'hyperstaticité du système. En effet, le simulateur considère des éléments de volume ayant une géométrie parfaite (base cubique, cylindrique ou sphérique). Dans le cas de notre modèle, la liaison entre les colonnettes et le porte-lentille1 est donc considérée comme parfaite. Afin d'effectuer une simulation convergente, il n'est pas possible d'envisager tous les défauts de planéité, perpendicularité... des éléments du système. Les résultats de simulation sont réalisés en considérant un système placé dans les conditions parfaites de planéité.

- *Etude des symétries du système*

Considérons un système symétrique dont l'axe optique coïnciderait avec l'axe principal d'inertie. Ce système peut être schématisé par la figure 155 avec un axe de révolution coïncidant avec l'axe optique. On observe que les masses sont uniformément réparties autour de l'axe optique suivant Oz (axe principal d'inertie). L'axe principal d'inertie coïncide avec l'axe optique. Ceci nous permet de dire que le système va se déformer de manière symétrique autour de cet axe qui restera immobile lorsqu'il est soumis à une élévation de température.

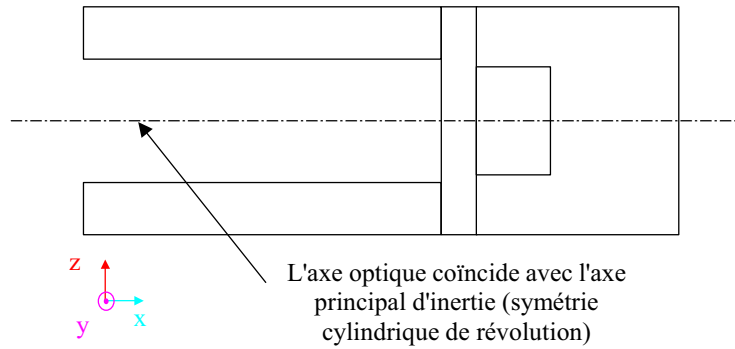


Figure 155 – Schématisation d'un système symétrique de révolution

La figure 156 présente la structure d'ensemble du système palette laser/porte-lentille1 de la tête optique démontrant que l'axe principal d'inertie et l'axe optique ne sont pas confondus. La masse de chaque élément n'est pas répartie uniformément autour de l'axe optique. Nous sommes en présence d'un système ayant une matrice d'inertie $[3; 3]$ dont tous les éléments de la matrice ont une valeur non nulle.

L'expression générale de la matrice d'inertie d'un système mécanique par rapport à son centre de gravité peut se mettre sous la forme suivante :

$$I(G,S) = \begin{pmatrix} A & -F & -E \\ -F & B & -D \\ -E & -D & C \end{pmatrix} \quad \text{E III-1}$$

Les termes A, B et C représentent les valeurs principales d'inertie, les termes D, E et F les produits d'inertie. Une simulation mécanique a été effectuée pour déterminer la matrice d'inertie du sous-ensemble n°1-a et les résultats sont présentés dans la relation E III-2 :

$$I(G,S) = \begin{pmatrix} 0,5448 \cdot 10^{-8} & 0,5057 \cdot 10^{-12} & -0,2174 \cdot 10^{-6} \\ 0,5057 \cdot 10^{-12} & 0,9944 \cdot 10^{-8} & 0,1692 \cdot 10^{-12} \\ -0,2174 \cdot 10^{-6} & 0,1692 \cdot 10^{-12} & 0,1188 \cdot 10^{-7} \end{pmatrix} \quad \text{E III-2}$$

Cette matrice montre que le système n'est pas symétrique autour de l'axe optique. Dans le cas d'un échauffement uniforme de l'ensemble ce qui ne sera pas le cas lors des tirs laser Nd : YAG, la déformation de l'ensemble ne sera donc pas symétrique par rapport à l'axe optique.

On définit, à présent, l'axe optique du système pour des conditions normales de température et de pression (298 K/ 10^5 Pa). Cet axe constitue l'axe optique théorique et correspond à l'alignement du système avant les tirs laser Nd : YAG (figure 156).

Compte tenu de la dissymétrie du système, la déformation induite par l'élévation de température, même si elle était uniforme, peut entraîner une déviation géométrique ainsi qu'une déformation de l'axe optique [117].

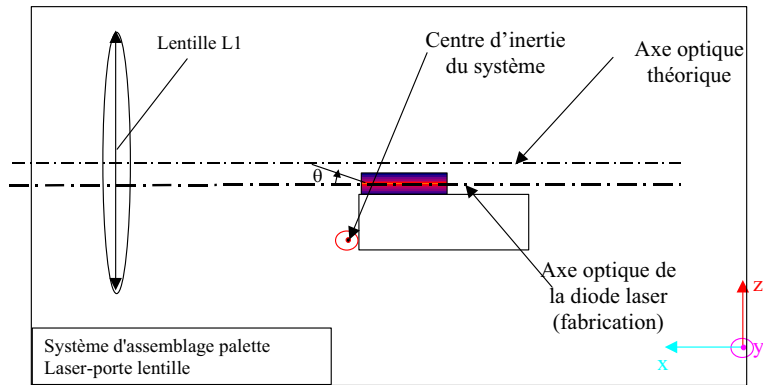


Figure 156 – Schéma du sous-ensemble n°1-a avec les différents axes du système

▪ *Conditions Thermiques – Hypothèses de simulation des soudures laser Nd : YAG*

Les hypothèses de simulation des soudures laser Nd : YAG entre la palette laser et le porte-lentille1 sont les suivantes :

- La première considération est basée sur l’hypothèse que l’échauffement du volume associé aux tirs YAG est suffisamment rapide pour considérer que l'ensemble de la palette laser et du porte-lentille1 reste à température ambiante pendant cette phase (voir annexe C.2). Seule une partie de la colonnette et l'interface au niveau du tir ont des températures plus élevées [113].
- La traduction du phénomène physique de soudage par l'apport d'énergie d'un faisceau laser Nd : YAG peut s'effectuer en considérant deux approches distinctes :

☞ Première approche :

Cette méthode est conventionnellement représentée par une simulation thermomécanique traduisant cet apport d'énergie par un flux thermique volumique. Dans ce cas, il est nécessaire de calculer l'intensité élémentaire de ce flux en fonction de la position sur la surface du tir afin que le volume de soudure soit identique à celui de la figure 158a. Le flux d'énergie thermique volumique élémentaire est défini par une fonction gaussienne : $\Phi(r)=\Phi_0 \exp(-r^2/W_0^2)$. L'intégrale de cette fonction sur la surface totale doit être égale au flux total de l'énergie du tir laser Nd : YAG. L'équation du flux est définie en coordonnées cylindriques (r,θ,z) et ce flux est représenté en figure 157 où Φ_0 représente le flux maximal au centre du tir ($r=0$) et W_0 est le rayon du faisceau dans le plan focal [113].

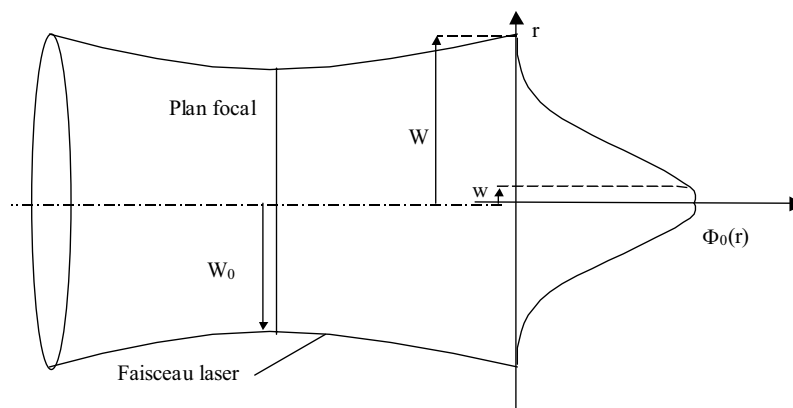


Figure 157 – Répartition du flux d'énergie incident d'un faisceau laser Nd : YAG (d'après 113)

La faisabilité de cette simulation est limitée par la procédure d'enregistrement des conditions sur le modèle. En effet, il est nécessaire d'apposer chaque valeur de flux d'énergie élémentaire sur les nœuds définissant la surface du volume considéré (disque). La surface d'un tir comporte, dans notre cas, environ 100 nœuds. De plus, le nombre de nœuds peut changer suivant les dimensions du modèle, l'enregistrement des valeurs de flux sur les différents nœuds doit donc être effectué manuellement à chaque simulation et pour chaque tir. Cette phase est extrêmement longue pour l'opérateur et très mal adaptée à une modélisation automatique en vue de la génération d'un macromodèle.

Nous avons donc choisi de rejeter cette première approche pour la modélisation des tirs YAG.

☞ Deuxième approche :

La méthode électro-thermique a pour objectif de traduire le même phénomène en appliquant un potentiel surfacique constant V_0 sur un disque de rayon $w=25\mu\text{m}$ (voir figure 158a). Les conditions aux limites présentées dans la figure 158a permettent d'obtenir la décroissance du potentiel par une fonction gaussienne : $V(\mathbf{r})=V_0 \exp(-r^2/W^2_0)$, image de la fonction flux d'énergie du laser. La répartition des lignes équipotentielles est, elle aussi, gaussienne au sein du volume prédéfini d'après la loi de conservation de cette fonction. Les lignes équipotentielles prennent une forme très proche des lignes isothermes observées lors d'un tir laser Nd : YAG [113].

La différence de potentiel entre ces lignes induit un courant qui chauffe le matériau jusqu'à une température dont l'équation est donnée par E III-3. La résistivité ρ du volume a été évaluée à $5.10^{-3} \Omega.m$ afin d'obtenir sur le volume total du cube une puissance électrique de $E_{inc}/\Delta t$, avec E_{inc} l'énergie incidente du tir laser Nd : YAG et Δt la largeur de l'impulsion laser, valeur de la puissance incidente

du tir YAG. Soit donc : $\frac{V_0^2}{\rho W} W^2$. On détermine $V_0=10V$ dans notre cas.

Cette méthode permet d'obtenir l'ordre de grandeur du potentiel V_0 à appliquer pour simuler un tir laser Nd : YAG expérimental. Au final, on observe des lignes isothermes de même forme que les lignes équipotentielles. Cette fois, l'enregistrement des conditions sur le modèle est extrêmement simple et ne nécessite aucun calcul préliminaire. La validité de la forme des lignes équipotentielles a été réalisée par une simulation préliminaire dont le modèle est un cube élémentaire.

La condition, permettant de traduire un échauffement local dû aux tirs laser Nd : YAG, sera représentée par une énergie dissipée par effet joule en considérant les analogies électrique/thermique.

$$\Delta H = \int_{t_i}^{t_f} \frac{V_{YAGi}^2}{R} dt = \frac{V_{YAGi}^2}{2R} \Delta t \quad \text{E III-3}$$

où ΔH représente la variation d'enthalpie du système, V_{YAGi} correspond la tension appliquée au volume cubique de soudure comme l'explique la figure 158a, R est la résistance équivalente du volume considéré et Δt la durée de l'impulsion du tir laser Nd : YAG. Le paramètre V_{YAGi} est dépendant du temps et définit la tension du tir YAG supérieur $i=1$ et inférieur $i=2$.

L'avantage de cette hypothèse réside dans la souplesse de modulation des grandeurs électriques avec le simulateur. En effet, l'application d'une impulsion rectangulaire électrique au niveau du volume du tir (figure 158a) conduit à une énergie dont la forme temporelle est triangulaire. Cette évolution de l'énergie est typique pour un tir laser Nd : YAG comme l'indique **Martin Von Allmen** [113]. La figure 158b montre que la géométrie du volume de soudure obtenu par simulation est proche de la géométrie du volume de soudure expérimentale.

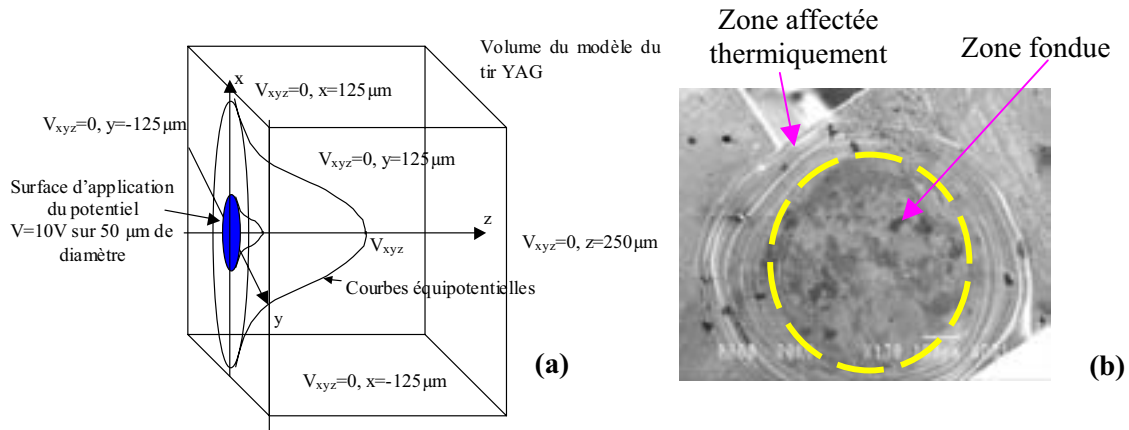


Figure 158 – Représentation du volume du tir avec la répartition théorique du potentiel électrique

- Au niveau du volume représentatif de la soudure YAG, les surfaces du porte-lentille1 et de la colonnette sont mises en contact. Avant le tir laser Nd : YAG le contact est glissant avec frottement, après le tir, le contact est bloqué. Pour modéliser ce type de contact plusieurs approches peuvent être envisagées :

- ☞ Première approche : la mise en contact simple est définie dans le logiciel ANSYS par une surface située à l'interface des éléments en liaison. La figure 159 représente le déplacement possible des volumes mis en contact par l'intermédiaire de la surface "contact". Ce dernier s'effectue avec un glissement sans frottement et ne peut être retenu compte tenu des conditions de contact entre la palette laser et le porte-lentille1.

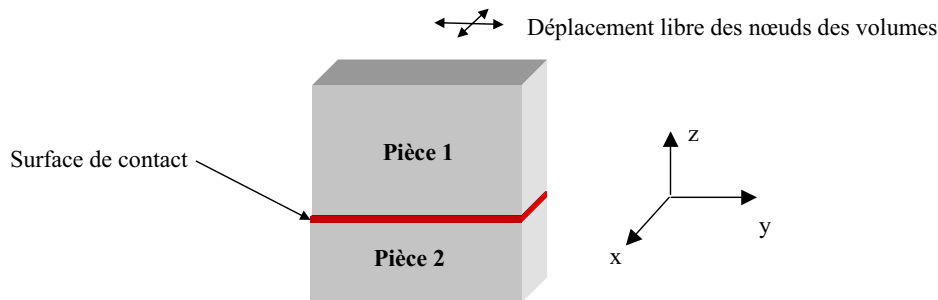


Figure 159 – Représentation de la surface "contact" du logiciel ANSYS

- ☞ Deuxième approche : une fonction spécifique (fonction "glue") sous ANSYS permet d'effectuer une liaison sans glissement entre deux pièces. Les nœuds appartenant à la pièce 1 et 2 et contenus à l'interface pièce1/pièce2 sont remplacés par des nœuds communs comme le montre la figure 160. Les pièces ne peuvent pas se déplacer l'une par rapport à l'autre. Cette fonction est adaptée pour modéliser le comportement des liaisons L1, L2, L3 et L4 après tris laser. Dans le cas des liaisons L1, L2, L3 et L4 avant le tir laser Nd : YAG nous avons considéré que la force de pression avait une amplitude suffisamment importante (500g) pour que le contact entre la palette laser et le porte lentille soit sans glissement. Nous avons donc retenu cette solution pour traduire le contact entre la palette et le porte-lentille1.

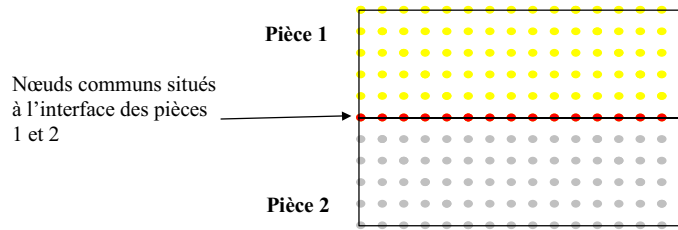


Figure 160 – Représentation de la mise en commun de nœuds à l'interface

- Le volume de soudure est donc représenté par une forme cubique de 250 μm de côté se situant à l'interface porte-lentille1/colonnette. Ce cube a un volume légèrement supérieur au flux d'énergie du tir laser Nd : YAG $\Phi(r)$. La base géométrique du sous-ensemble palette laser/porte-lentille1 est une base cubique. Afin d'optimiser le maillage, nous avons donc défini un élément de volume cubique.

III.1.c / Conditions de simulation

Dans cette partie, nous allons regrouper l'ensemble des conditions initiales appliquées au sous-ensemble n°1-a, énuméré dans les parties précédentes, et adaptées pour une simulation thermomécanique ANSYS.

Le sous-ensemble n°1-a est soumis à deux forces permanentes, le poids \vec{P} et la force de pression \vec{F}_{pres} dont l'intensité est dépendante de la technologie. Cette dernière permettant de plaquer les pièces, est conservée durant toute la phase des tirs laser Nd : YAG. Les tirs sont effectués d'abord au sommet de la colonnette (tir n°1) puis à la base de la colonnette (tir n°2). La palette laser est fixée au niveau de son embase et le porte-lentille1 est maintenu par sa face arrière, après la mise en pression. L'ensemble de ces considérations permet de réaliser une liaison encastrement (sans aucun degré de liberté) entre les deux pièces.

La structure finale est représentée géométriquement dans la figure 161 avec les volumes des tirs laser Nd : YAG.

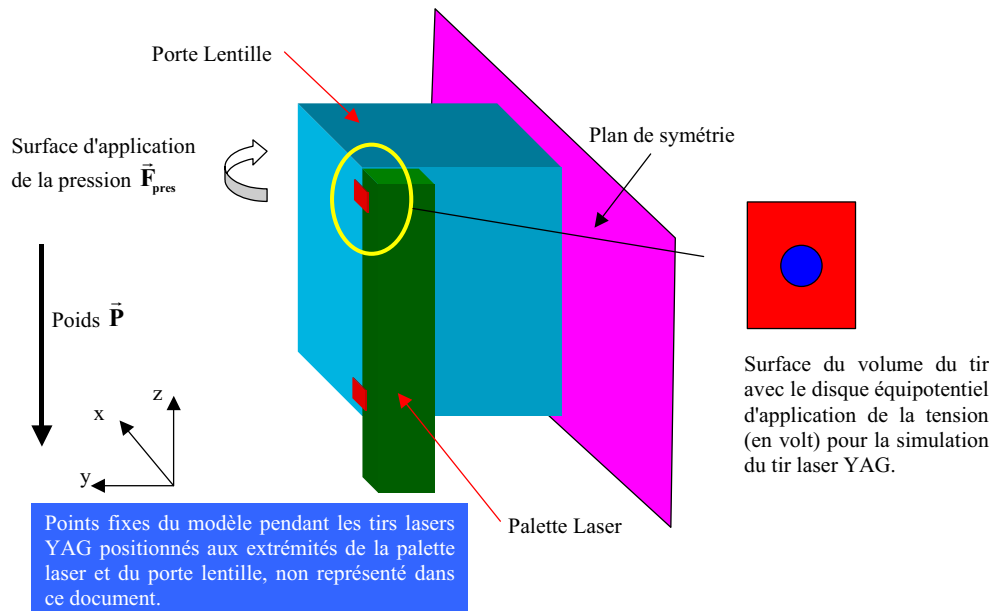


Figure 161 – Géométrie initiale des volumes du modèle ANSYS du sous-ensemble N° 1a

Les simulations effectuées sont basées sur l'approche "*multiphysics*" du logiciel ANSYS considérant des éléments hexagonaux dont les degrés de liberté sont : le déplacement suivant x, y et z, la température, la tension et le champ magnétique. Ces simulations prennent en compte à la fois les propriétés mécaniques, thermiques et électromagnétiques des matériaux. Dans le paragraphe III.1.b, nous avons indiqué que les tirs laser Nd : YAG seraient simulés par des échauffements électriques. Dans la simulation, nous aurons donc deux matériaux identiques d'un point de vue thermomécanique, mais différents d'un point de vue électrique. En effet, le premier matériau sera isolant, avec une résistivité $\rho=10^{10} \Omega.m$ et correspondra au système palette laser/porte-lentille1 ; le second sera faiblement résistif $\rho=5.10^{-3} \Omega.m$ défini précédemment et correspondra aux volumes des soudures laser Nd : YAG. Ceci permet d'effectuer un échauffement local en concentrant l'énergie électrique dans le volume considéré.

La figure 162 présente le maillage obtenu après optimisation en soulignant la finesse autour des zones à étudier (soudures YAG). Le maillage final et optimum est constitué de 7526 éléments et comporte 11803 nœuds. Ces nœuds définissent les lieux géométriques des calculs effectués par le simulateur.

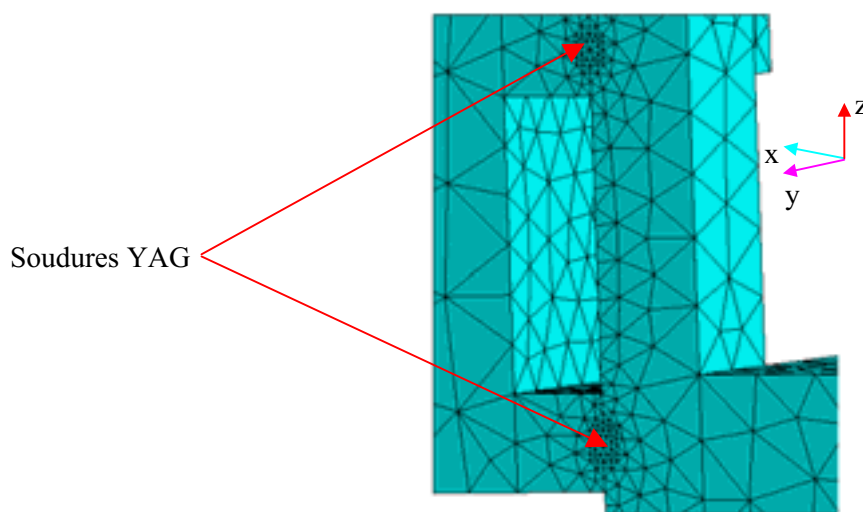


Figure 162 – Maillage optimisé pour le modèle ANSYS du sous-ensemble n°1-a

La simulation "*multiphysics*" dynamique ANSYS 5.7 est une simulation dépendante des caractéristiques thermomécanique, électrique et temporelle. Ce type de simulation permet par une méthode simplifiée et souple de simuler l'apport d'énergie d'un faisceau laser Nd : YAG et simultanément le comportement thermomécanique du sous-ensemble considéré. Nous avons donc tenu compte de la largeur temporelle de l'impulsion laser expérimentale. Les impulsions représentant l'évolution du potentiel sont rectangulaires de manière à donner une impulsion d'énergie triangulaire comme le montre **Martin Von Allmen [113]**. La figure 163 indique la chronologie du déroulement des simulations. Les triangles correspondent aux résultats de simulation qui seront présentés, les disques correspondent aux vérifications faites pour observer le bon déroulement des simulations et le losange marque la fin de la simulation. Les conditions et résultats de simulations thermique et électrique du tir YAG n°1 sont à transposer au tir YAG n°2.

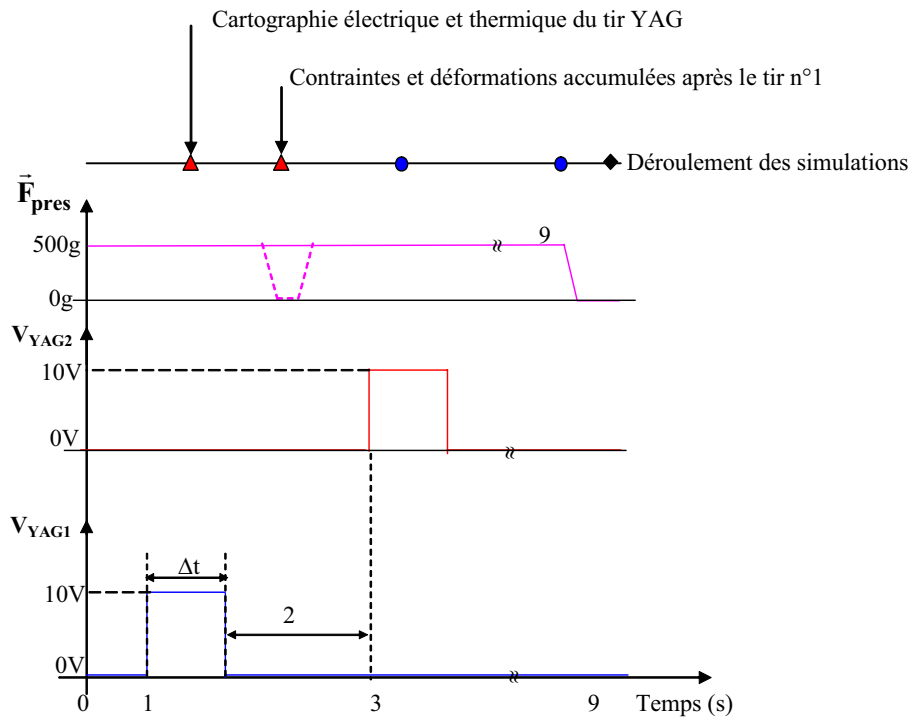


Figure 163 – Chronologie des paramètres principaux pendant le déroulement des simulations

Les paramètres \vec{F}_{pres} , V_{YAG1} et V_{YAG2} représentent respectivement les valeurs nominales de la force de pression et les tensions superficielles appliquées aux volumes des tirs YAG n°1 et 2.

L'originalité forte de ce macromodèle développé sous ANSYS, menées en accord avec le fabricant, est de prendre en compte au plus juste les nombreuses étapes de fabrication et d'assemblage du sous-ensemble palette-laser / porte Lentille1 pour effectuer ensuite la simulation "*multiphysics*".

L'évaluation de la criticité thermomécanique de la tête optique passe par la prise en compte des étapes de fabrication et des données physico-chimiques des matériaux, soit :

- les références de température,
- les forces permanentes appliquées au système,
- les forces dynamiques traduisant l'étape de fabrication.

Déroulement des simulations	Grandeurs physiques et valeurs associées					
Données physiques des matériaux	Désignation	Constantes de matériaux utiles aux simulations²²				
	Kovar ²³ I	d = 8360 kg.m ⁻³ ; ρ = 10 ¹⁰ Ω.m				
		Température (K)	298	698	1100	1400
		E (10 ⁹ Pa)	138	138	138	138
		α (W.m ⁻¹ /K)	17,3	17,3	17,3	17,3
		C (J.kg ⁻¹)	439	439	649	649
		CTE (10 ⁻⁶ m/K)	5,86	5,86	11,5	11,5
	Kovar II (Volume des tirs YAG)	d = 8360 kg.m ⁻³ ; ρ = 0,005 Ω.m				
		Température (K)	298	698	1100	1400
		E (10 ⁹ Pa)	138	138	138	138
		α (W.m ⁻¹ /K)	17,3	17,3	17,3	17,3
		C (J.kg ⁻¹)	439	439	649	649
CTE (10 ⁻⁶ m/K)		5,86	5,86	11,5	11,5	
Références communes pour les hypothèses de simulation	Désignation	Caractéristique des contraintes				
	Référence de température	La température de référence est fixée à 298 K. Température uniforme.				
	Plan de symétrie	Plan (Ox, Oz) localisé dans la figure 161.				
	Points fixes du sous-ensemble.	Les points fixes sont indiqués dans la figure 161.				
	Poids P ²⁴	Dirigé suivant l'axe Oz vers le bas : module = M.g (g = 9,81 N.kg ⁻¹)				
	Force de pression	Quelques 100 g appliqué sur la surface arrière du porte-lentille1 (figure 161)				
	Application de la tension (en volt)	10 V sur un disque inscrit dans la surface extérieure du volume du tir (figure 161)				
Références distinctes correspondantes aux différentes simulations	Type de simulation	Chronologie des simulations				
	Simulation non-linéaire et dynamique transitoire avec une approche multiphysics	n°1 – Application de la force de pression. n°2 – Bridage du porte-lentille1 n°3 – V _s = 0V → V _s = 10V sur le volume du tir supérieur. n°4 – V _s = 0V → V _s = 10V sur le volume du tir inférieur. n°5 – débridage du porte-lentille1				

Tableau 31 – Conditions de simulation pour l'ensemble palette laser porte-lentille1 (sous-ensemble n°1a)

Glossaire :

²² E représente le module de Young (Pascal : Pa) ; CTE représente le coefficient de dilatation thermique en m/K ; d est la densité en kg.m⁻³ ; α est la conductivité thermique en W.m⁻¹/K ; C est la capacité calorifique en J.kg⁻¹ ; ρ est la résistivité en Ω.m.

²³ Kovar : Alliage de Fer (Fe), Nickel (Ni) et Cobalt (Co) pour l'essentiel.

²⁴ La masse de chaque volume est calculée à partir de la densité de chaque matériau pour déterminer l'intensité du poids \vec{P} .

Les simulations, traduisant les tirs laser Nd : YAG, comportent deux approximations :

- Comportement des courbes contrainte-déformation de l'alliage Kovar :

Lors des tirs laser Nd : YAG, le Kovar est porté à haute température (1723 K/+1450°C) au niveau des volumes des tirs. L'hypothèse avancée est de considérer que le Kovar a un comportement thermomécanique bilinéaire donné par la figure 164 [118].

Les grandeurs associées à ce graphe sont :

- ☞ **E** : le module de Young,
- ☞ **Y** : la limite élastique,
- ☞ **S** : le module de plasticité.

Le Kovar est un alliage métallique dont le comportement peut être assimilé à un acier. Le comportement thermomécanique de cet alliage métallique, très connu, est constitué d'une partie correspondant aux déformations élastiques et une partie correspondant aux déformations plastiques. L'amplitude des températures (1100 K/+827°C) pendant la phase des tirs laser Nd : YAG est telle que l'alliage métallique peut être assimilé à un alliage tendre [119]. Cela a pour effet de diminuer la limite élastique et le module de plasticité alors que la température augmente. Les courbes contrainte-déformation de ce matériau sont représentées par des courbes bilinéaires représenté par la figure 164. De manière à réduire le temps de calcul effectué par le logiciel ANSYS, le comportement thermomécanique du Kovar est donné pour des températures inférieures ou égales à 1400 K (1127).

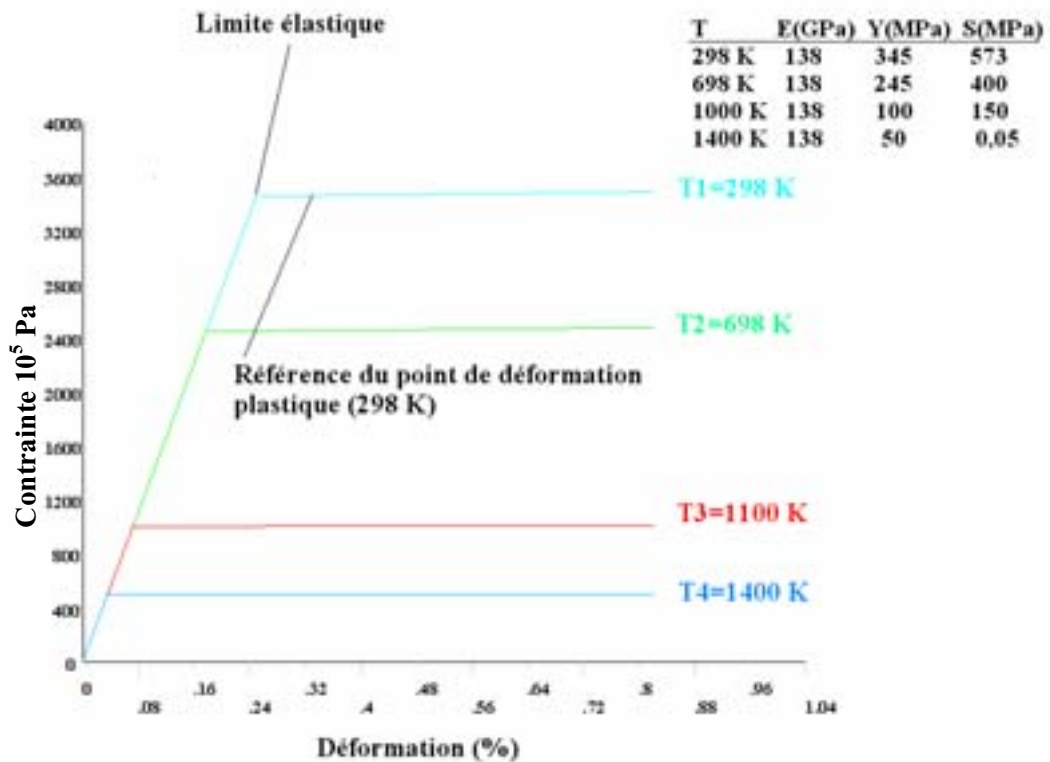


Figure 164 – Courbes contrainte-déformation en température du Kovar

- Comportement thermique de l'alliage Kovar :

Afin d'effectuer des simulations traduisant la fusion de volume de soudure, il est nécessaire de connaître l'expression complète de la variation d'enthalpie ΔH :

$$\frac{V^2}{2R} \Delta t = m C_p \Delta T + m L_f \quad (1) \quad \text{E III-4}$$

$$\Delta H_s = m C_p \Delta T + m L_s \quad (2)$$

Les paramètres C_p , capacité calorifique massique, L_f , chaleur latente de fusion, L_s chaleur latente de solidification permettent de définir la fonction enthalpie. La capacité calorifique massique est un paramètre qui dépend de la température et du matériau (Kovar). La prise en compte de la fusion et la solidification du volume de soudure donne lieu à une augmentation considérable de la non-linéarité de la simulation. En effet, la fonction enthalpie présente des discontinuités dues aux chaleurs latentes L_s et L_f qui introduisent une non-linéarité supplémentaire au macromodèle. Dans ce cas, les temps de calcul associés deviennent alors prohibitifs.

Dans un souci de simplifier notre approche et d'assurer la validité des simulations, nous avons donc limité l'apport d'énergie dans le volume du tir afin de réduire la température d'échauffement en dessous de la température de fusion jusqu'à la limite de 1400 K (+1127°C) [120]. Le volume de soudure caractérisé par la fusion du Kovar est très faible par rapport au volume du sous-ensemble n°1-a. Les niveaux de déformation et de contrainte sont essentiellement induits par un gradient thermique. Ces deux considérations permettent de valider la simplification du macromodèle caractérisé par un échauffement d'amplitude limité à 1100 K (+827°C). Cette élévation de température est relativement proche de l'amplitude maximale évaluée à 1400 K (+1127°C) et conduit ainsi à un comportement optimiste.

Les simulations seront présentées de la manière suivante :

- Répartition des potentiels dans la structure confirmant l'énergie électrique est confinée dans le volume du tir YAG.
- Cartographies des températures pendant les tirs laser Nd : YAG, des contraintes et des déformations et la déviation de l'axe optique.

III.1.d / Résultats de simulations relatives à l'étape de fabrication par tirs laser Nd : YAG

Les simulations "*multiphysics*" traitent l'ensemble des grandeurs simultanément. Ces dernières concernent l'évolution des potentiels et la cartographie thermomécanique du sous-ensemble étudié.

- *Validation des répartitions du potentiel électrique*

La figure 165 montre que le potentiel électrique traduisant les tirs laser Nd : YAG est concentré dans le volume du tir. De ce point de vue, l'objectif est atteint, puisque l'apport d'énergie concentrée dans le volume prédéfini est équivalent aux tirs laser : YAG. Nous observons la même répartition pour le tir inférieur.

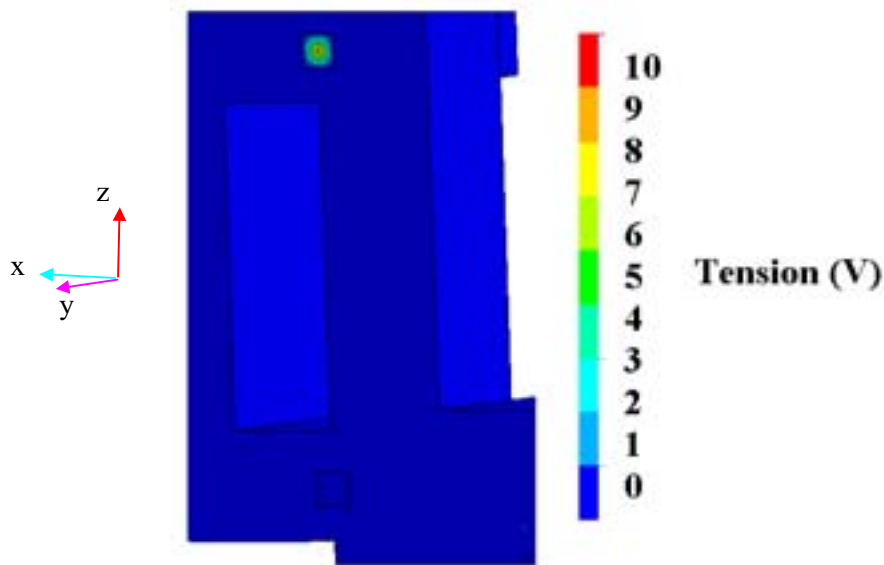


Figure 165 – Cartographie des potentiels simulant le tir YAG supérieur

- *Cartographie des températures lors du tir laser Nd : YAG*

La cartographie des températures du modèle palette laser/porte-lentille1 est donnée par la figure 166. Nous observons que la température de la palette laser et du porte-lentille1 n'évolue quasiment pas. Seule la colonnette de la palette laser est soumise à un gradient de température évalué à 1100 K (+827°C). La courbe de température de la figure 166 prise sur la ligne d'interface entre la palette laser et le porte-lentille1 montre que la surface d'échauffement s'étend sur environ 400 μm de diamètre pour une température supérieure à 700 K (+327°C). Ce résultat est en accord avec l'image MEB relative à l'analyse en surface d'un tir YAG sur une tête optique (figure 158).

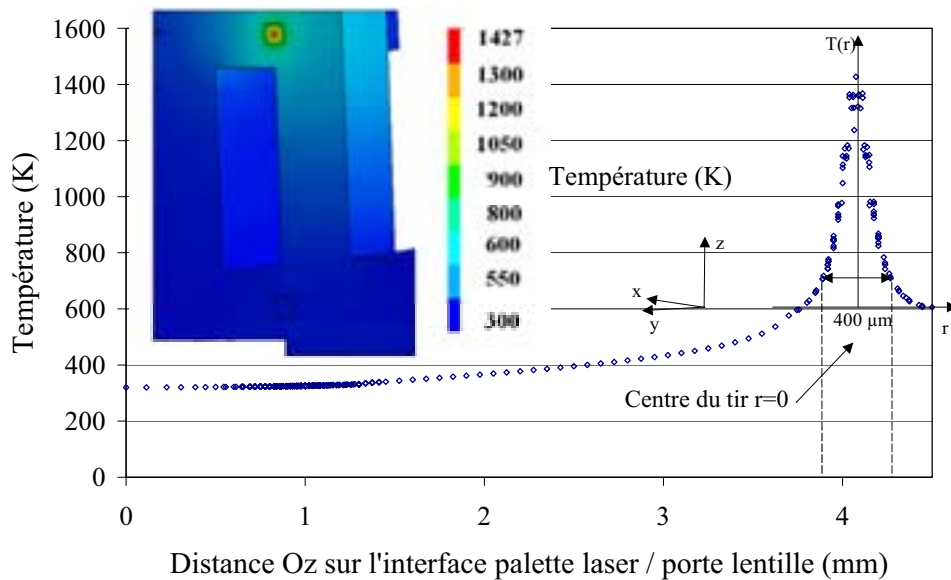


Figure 166 – Profil de répartition de température relative au tir YAG supérieur

Les tirs laser Nd : YAG induisent des gradients très élevés de températures proche de 1100 K (+827°C) entre le centre du tir et la palette laser. La variation de température résultante est une

fonction gaussienne de z et la base de cette fonction est donnée pour $T_{\min} = 600 \text{ K}$ ($+327^\circ\text{C}$) comme le montre la figure 166. La fonction donnant la variation de température est donc : $T(\mathbf{r}) = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \exp(-r^2/W_0^2)$ avec laquelle on évalue W_0 , le rayon focal du faisceau simulé, à $150 \mu\text{m}$. Typiquement le rayon focale est donné par **M. Von Allmen** et **B. Dieter** est compris entre 50 et $200 \mu\text{m}$ [113, 121].

▪ *Déformations et contraintes accumulées après tirs laser Nd : YAG*

L'étude des résultats thermomécaniques se fait en deux temps. En effet, les deux tirs laser Nd : YAG induisent une déformation de l'ensemble et sont réalisés l'un après l'autre. Cette approche va permettre, dans un premier temps, d'évaluer l'impact du premier tir sur la déviation de l'axe optique ; puis, dans un deuxième temps, d'observer l'ensemble des déformations résiduelles après les deux tirs YAG. Ce point permettra de préciser l'étape de fabrication la plus critique en conservant le déroulement de la fabrication. En effet, l'étude du tir YAG n°2 seul ne représentait pas le procédé de fabrication.

Ces déformations sont définies par le critère de Von-Mises et sont observées lorsque le système est relâché ou revenu à l'équilibre ; les brides du porte-lentille1 sont enlevées et la force de pression est annulée.

□ Tir YAG n°1 (supérieur)

La figure 167 représente la cartographie des déformations induites par le tir laser Nd : YAG n°1 (supérieur) et représente la déformée de la ligne extérieure de la colonnette suivant les axes Ox et Oy . La déformée de la colonnette dans la direction Ox se caractérise par une déviation d'angle de l'axe optique. Pour le tir YAG n°1, la déformée reste faible (au maximum $0,2 \mu\text{m}$).

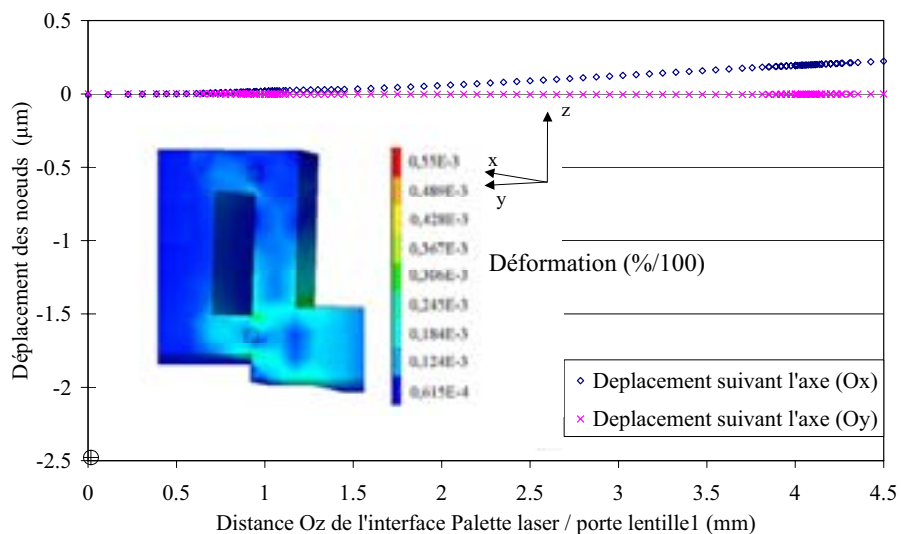
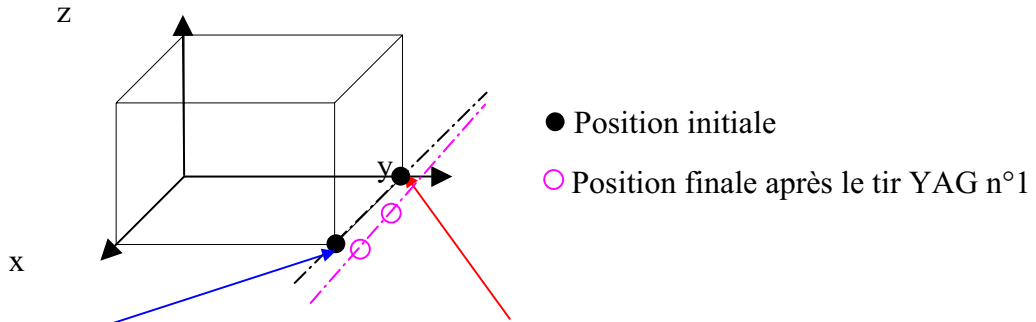


Figure 167 – Profil des déformations après le tir YAG supérieur

Les déformations après le tir YAG n°1 sont au maximum de $0,00568\%$ et se situent à la base de la colonnette. Afin de déterminer l'impact du tir laser Nd : YAG n°1 (supérieur), nous avons évalué la déviation de l'axe optique en observant le déplacement de deux nœuds situés sur ce dernier. Les résultats sont représentés dans le tableau 32.



Nœud d'entrée n°8329			Nœud de sortie n°8338		
Δx (μm)	Δy (μm)	Δz (μm)	Δx (μm)	Δy (μm)	Δz (μm)
+0,10999	0	-0,084561	0.10996	0	-0.25476

Tableau 32 – Déplacements des nœuds représentant l'entrée et la sortie de l'axe optique (1/2 représentation du sous-ensemble)

Au final, on observe une rotation maximale de l'axe optique théorique autour de l'axe Oy de :

$$\Delta\theta = 0,00336^\circ$$

E III-5

□ Déformations après tir YAG n°2 (inférieur)

La figure 168 présente les déformations globales du sous-ensemble après les deux tirs YAG. L'amplitude des déformations s'élève à 0,055 % au niveau de la base de la colonnette soit dix fois plus élevée qu'après le premier tir. La déformée de la ligne extérieure de la colonnette après le tir n°2 est beaucoup plus prononcée et s'étend jusqu'à 2 μm .

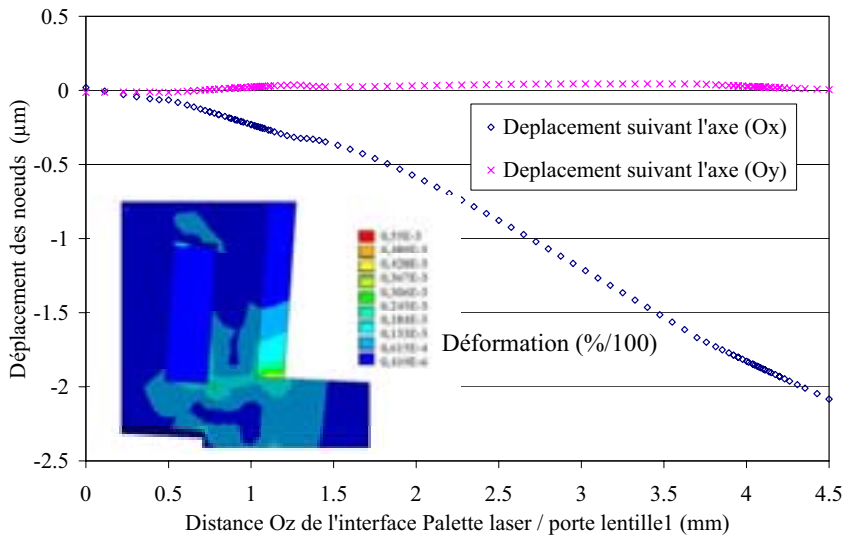
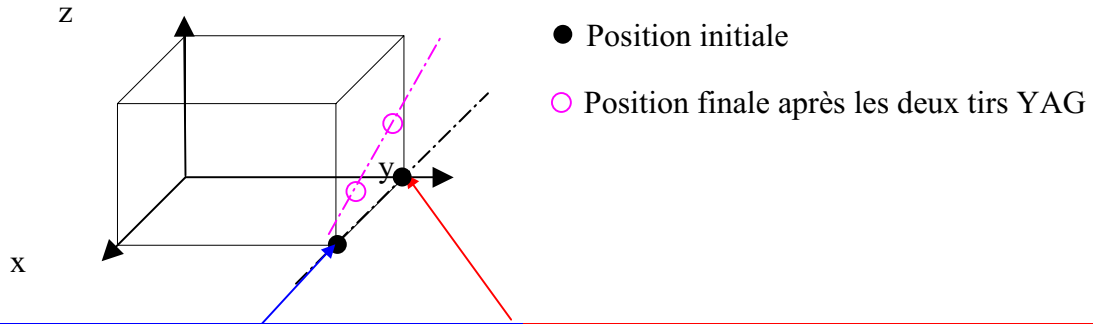


Figure 168 – Profil des déformations de l'ensemble après les deux tirs YAG

Nous avons pris les deux même nœuds que précédemment afin d'évaluer la déviation de l'axe optique après les deux tirs laser Nd : YAG (tableau 33).



Nœud d'entrée n°8329			Nœud de sortie n°8338		
Δx (μm)	Δy (μm)	Δz (μm)	Δx (μm)	Δy (μm)	Δz (μm)
-1.0921	0	0.70364	-1.0957	0	2.2229

Tableau 33 – Evaluation des déplacements des nœuds représentant l'entrée et la sortie de l'axe optique

Au final, on observe une rotation maximale de l'axe optique théorique autour de l'axe **Oy** de :

$$\Delta\theta = 0,03^\circ$$

E III-6

La figure 169 représente la cartographie des contraintes résiduelles accumulées lors des tirs laser Nd : YAG dans le sous-ensemble palette laser/porte-lentille1. Nous observons des niveaux de contraintes résiduelles de 60 MPa situés à la base de la colonnette. L'accumulation de contrainte est un phénomène déjà observé au sein des systèmes optoélectroniques émissifs pour applications de télécommunication soudés par faisceaux laser Nd : YAG comme l'indique **J. Zang** [122].

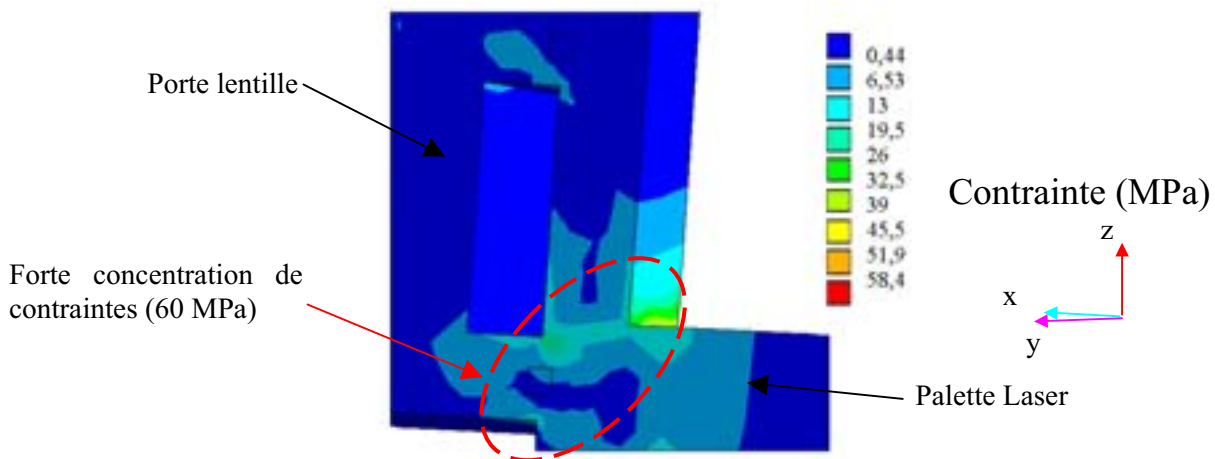


Figure 169 – Cartographie des contraintes de Von-Mises résiduelles du système libre après le procédé de soudage YAG (T=298 K/+25°C)

▪ *Synthèse et hypothèses des mécanismes de déviation de l'axe optique*

Les simulations électriques, thermiques et mécaniques effectuées simultanément se sont attachées à évaluer l'ordre de grandeur des niveaux de contrainte et de déformation résiduelles au sein du sous-ensemble n°1-a après les tirs laser Nd : YAG simulés par une impulsion électrique. Les résultats des simulations tendent à montrer que la déviation de l'axe optique est caractérisée par une

déviations angulaires. Cette dernière a été évaluée pour chaque étape de fabrication et comparée à la déviation angulaire de $0,02^\circ$ conduisant à une perte de puissance optique de 10 %.

Les niveaux de déformations après le tir YAG supérieur sont de 0,00568% au maximum et se situent à la base de la colonnette. La déviation angulaire de l'axe optique résultante est d'environ $0,003^\circ$ et peut être considérée comme très faible par rapport la référence de $0,02^\circ$. La caractéristique reliant la perte de couplage optique à la déviation d'angle, obtenue expérimentalement par le fabricant, a établi que la perte de couplage optique s'élevait à 0,2 % pour une déviation angulaire de $0,003^\circ$.

Les déformations globales du sous-ensemble après les deux tirs YAG ont une amplitude s'élevant à 0,055 % au niveau de la base de la colonnette, soit dix fois plus élevée qu'après le premier tir. La déviation angulaire de l'axe optique résultante est d'environ $0,03^\circ$ et peut être considérée comme très forte par rapport la référence de $0,02^\circ$. La perte de couplage optique serait dans ce cas de 15 %. L'accumulation de contraintes, localisées à la base de la colonnette, est parfaitement corrélée aux niveaux des contraintes induites par la force de pression utilisée pendant le procédé de fabrication (voir détail en annexe C.3). L'échauffement du tir YAG inférieur, localisé dans le même lieu géométrique, piège les contraintes accumulées, à la base de la colonnette, lors de la mise en pression de l'ensemble.

La figure 170 schématise la déviation de l'axe optique théorique totale en trois dimensions. La déviation angulaire est prépondérante par rapport à la déviation d'axe et traduit la rotation du porte lentille par rapport à la palette laser.

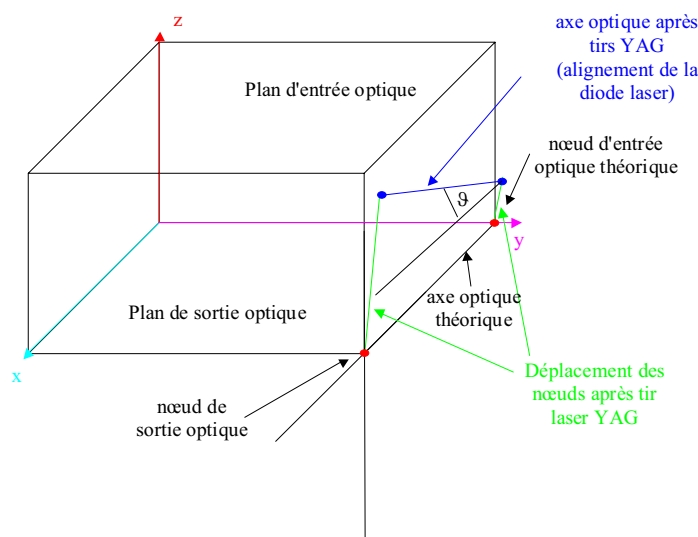


Figure 170 – Schématisation de la déviation de l'axe optique théorique après les tirs YAG

Cependant, le désalignement de l'axe optique est compensé par un alignement dynamique avec la partie fibre optique (sous-ensemble n°2) et permet d'obtenir le couplage optique optimum.

Dans le cas d'une éventuelle perte de couplage optique, deux hypothèses sont envisageables :

- Présence d'un effort permanent sur le sous-ensemble n°1-a dont l'amplitude est suffisante pour induire une déviation de l'axe optique.
- Relaxation des contraintes accumulées lors des tirs YAG induisant une déformation du sous-ensemble n°1-a et donc une déviation de l'axe optique.

La prochaine partie va permettre de révéler l'hypothèse la plus probable.

III.1.e / Hypothèse de relaxation des contraintes – mise en évidence de la présence de défauts dans les soudures YAG

La relaxation des contraintes accumulées lors des tirs laser Nd : YAG est l'hypothèse la plus probable pour justifier la déviation de l'axe optique responsable de la perte de couplage.

Lorsque le volume du matériau est intègre, le temps de relaxation est proche de 10^5 heures pour des conditions normales de température et de pression (300 K / 10^5 Pa) [107, 123]. De manière générale, la relaxation partielle ou totale des contraintes est réalisée par une phase de recuit haute température évaluée à 2/3 de la température de fusion ; le temps de relaxation étant dépendant de la température maximale appliquée et de la vitesse de refroidissement [115]. Dans le cas de cycles thermiques rapides (VRT), le faible écart de température auquel est porté le matériau ($\Delta T = 60$ K) ne peut être seul à l'origine du phénomène de relaxation pouvant expliquer une dérive de puissance optique.

Des considérations supplémentaires sont donc à prendre en compte afin d'expliquer la relaxation des contraintes induites par les défauts situés dans le volume des tirs YAG.

- Le Kovar, présent dans les volumes des tirs YAG a un comportement thermomécanique différent du Kovar brut [124]. En effet, pour une même température, la limite élastique du volume de soudure est inférieure à la limite élastique du Kovar brut (345 MPa / 300 K). Les joints de soudure YAG sont donc des zones fragiles.
- La présence de défauts dans le volume du tir permet d'expliquer l'accélération du temps de relaxation des contraintes. Nous avons donc réalisé des analyses de microsections dans le plan des volumes de soudure par MEB. La figure 171 représente les vues en microsection et en surface d'un tir YAG. La figure 171-a montre la présence de fissures sur le bord du tir YAG d'environ 50 μm de long. On observe dans la figure 171-b des microcavités et des fissures. Les microcavités ont une taille moyenne d'environ 5 μm et la fissure a une longueur de 10 μm .

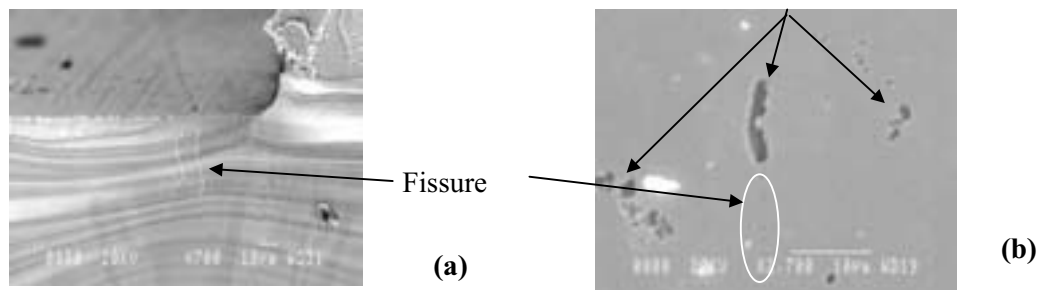


Figure 171 – Défauts de surface (a) et de volume (b) dans les soudures YAG

La mise en évidence de la relaxation des contraintes étant très délicate à démontrer, une recherche bibliographique a permis d'identifier les causes des différents défauts observés dans la figure 171 [125]. Il existe deux types de défauts : les défauts intrinsèques et extrinsèques.

▪ *Défauts intrinsèques*

Les cavités de petites tailles, 2 à 3 μm environ, sont identifiées comme des soufflures. Elles sont constituées de gaz emprisonnés lors de la phase liquide de l'alliage, qui reste occlus dans la masse métallique. Les origines de ces cavités sont :

- Métallurgiques, liées au dégagement de monoxyde de carbone dans les aciers effervescent ou la diminution de la solubilité des gaz en solution dans le bain au cours du refroidissement,
- externes sachant que le milieu environnant favorise la présence de gaz dans le bain liquide, par l'humidité ambiante (hydrogène), par des gaz réagissant avec le métal (N_2) et la présence de

mouvements importants du bain qui piège les gaz de protection.

Les cavités de forme allongée sont des retassures qui prennent naissance au cours du refroidissement et de la contraction du métal fondu. La structure de solidification joue un rôle important dans la formation des retassures.

Il existe deux grands types de fissure :

- ☞ Fissuration à "chaud" : elles apparaissent lors du refroidissement de la matière de la même manière que la retassure. Elles se situent dans le volume de soudure (figure 171-a).
- ☞ Fissuration à "froid" : elles sont généralement engendrées par l'hydrogène et elles peuvent être caractérisées à l'échelle macroscopique (figure 171-b), dans la région où elles apparaissent, par leur orientation par rapport au volume du tir et par leur position. Celles que nous observons dans notre cas sont situées au niveau des zones affectées thermiquement (ZAT) et dans la zone fondue (figure 172). La fissuration à froid est essentiellement reliées aux conditions de soudage mise en œuvre (épaisseur, énergie et température des pièces). Le métal utilisé prend la trempe, c'est à dire qu'il est le siège d'une transformation martensitique totale ou partielle au sein de la ZAT et/ou de la zone fondue. Les alliages métalliques sont fortement exposés à ce phénomène car les éléments additionnés augmentent la trempabilité du matériau.



Figure 172 – Vue par microscope optique avec un grossissement $\times 20$ du tir YAG en surface

▪ *Défauts extrinsèques*

L'origine de l'apparition de défauts est également à relier à la maîtrise de la quantité d'énergie déposée sur le matériau. La présence des défauts observés s'explique par la densité surfacique d'énergie du tir YAG utilisé : $2,5 \cdot 10^5 \text{ J/cm}^2$. **W.H. Cheng** a montré que certaines têtes optiques réalisées à l'aide de tirs YAG dont l'énergie dépasse $1,5 \cdot 10^5 \text{ J/cm}^2$ sont caractérisées par une instabilité de couplage optique après 500 cycles thermiques [126]. Cette étude a permis d'établir une relation double entre l'énergie incidente du tir laser Nd : YAG et la présence de défauts d'une part, puis la présence de défauts et la perte de couplage optique activée par des cycles thermiques $-40^\circ\text{C}/+85^\circ\text{C}$. Dans le cas contraire, on observe, après 500 cycles thermiques, une plus grande stabilité du couplage optique des têtes optiques. De plus, ce type de comportement est à corrélérer aux zones où les tirs laser Nd : YAG sont proches de la diode laser.

- *Solutions technologiques réduisant le taux de défauts au sein des volumes de soudure*

Le sous-ensemble n°1-a répond à l'ensemble de ces critères et peut donc être identifié comme critique. Afin de réduire le problème apporté par les tirs YAG, le soudage est souvent associé à des actions postérieures au tir permettant de :

- Modifier l'état structural du métal dans le joint et notamment d'affiner les grains dans le volume du tir et les ZAT. La solution technologique est de réduire l'intensité de la puissance incidente du tir laser Nd : YAG [118, 127].
- Diminuer le niveau de contraintes résiduelles, il s'agit d'une relaxation par un recuit haute température à 1200 K (+927°C) ($2/3 T_{\max}$) permettant de libérer les contraintes accumulées pendant le tir YAG [128].
- Améliorer la géométrie de raccordement entre le métal de base et le métal fondu. Cette étape de fabrication est caractérisée par une préparation spécifique de l'état de surface visant à diminuer la réflexion du laser pendant le tir et d'échauffer les pièces à souder afin de diminuer le gradient de température entre le volume de soudure fondu et les ZAT [125].
- Créer des contraintes résiduelles favorables à la tenue mécanique (surtout en fatigue) de joint. Cette technique permet de définir la position des soudures laser Nd : YAG pour que les contraintes accumulées soient favorables au fonctionnement du système [125].

Ces différentes manipulations peuvent être envisagées comme étapes de fabrication complémentaires pour augmenter la robustesse du système en réduisant deux éléments essentiels :

- le taux de défauts dans le volume des tirs
- les contraintes accumulées dans le sous-ensemble considéré.

Ces solutions seront détaillées dans la partie IV.

III.2 / Analyse du système palette laser-embase Peltier (Sous-ensemble n°1-b)

III.2.a / Objectifs

Cette partie s'attache à déterminer le degré de criticité du sous-ensemble n°1-a lorsqu'il est soumis à des cycles thermiques VRT $-40^{\circ}\text{C}/+85^{\circ}\text{C}$. Le joint de brasure, interface entre la palette laser et l'embase du thermorégulateur, est la zone la plus sensible de ce sous-ensemble et sera le centre de notre intérêt. Cette étude peut être menée séparément de la précédente car la cartographie des températures pendant les tirs laser Nd : YAG nous indique que l'interface palette laser/Peltier n'est pas affectée. Nous considérons alors que l'interaction entre le sous-ensemble n°1a et le sous-ensemble n°1-b est négligeable.

Cette analyse se scindera en deux parties :

- La première partie de l'étude est linéaire. Les propriétés mécaniques des matériaux sont alors considérées comme constantes : en particulier, la courbe contrainte-déformation est une droite dont la pente est le module de **Young**. Le résultat de la simulation est alors obtenu en une passe par cas de charge ; nous prendrons comme température de référence 298 K (+25 °C) et deux cas de charge à 233 K (-40°C) et 358 K (+85°C).
- La deuxième se focalisera sur une étude dite non-linéaire. La non-linéarité porte ici sur l'introduction du comportement plastique d'un matériau, en l'occurrence de la brasure Epsilon. Le comportement choisi est un comportement bi-linéaire qui se base sur des mesures expérimentales. Les chargements en température se feront en plusieurs étapes par pas de 20 K.

Au préalable, nous présenterons les modèles et conditions de simulations de référence réalisées

pour ce sous-ensemble. Nous donnerons, entre autres, les références et les constantes permettant d'effectuer une simulation thermomécanique du sous-ensemble.

III.2.b / Modèles et conditions de simulation

Le sous-ensemble considéré est soumis à des efforts permanents : le poids \vec{P} et la force magnétique \vec{F} induite par l'isolateur situé dans le porte-lentille1. Il crée une force magnétique d'environ 30 g mesurée au centre de physique moléculaire optique et hertzienne (CPMOH) de l'Université de Bordeaux I. Afin d'optimiser le macromodèle considéré, le porte-lentille1 n'est pas modélisé car son interaction avec la brasure est négligeable. Cependant, le modèle tient compte de la contrainte induite par le champ magnétique qu'il apporte à la palette laser. La figure 173 schématise le modèle ANSYS du sous-ensemble palette laser/ embase Peltier.

Le modèle comporte un plan de référence permettant un mouvement libre dans le plan (Ox, Oy). Le système est symétrique par rapport au plan (Ox, Oz) et permet de simplifier le modèle mathématique. On définit un point de référence du modèle n'ayant aucun degré de liberté conduisant à la convergence optimisée des calculs. Le poids \vec{P} est appliqué sur l'ensemble de la structure alors que la force magnétique \vec{F} est répartie sur la surface arrière de la colonnette sous la forme d'une pression.

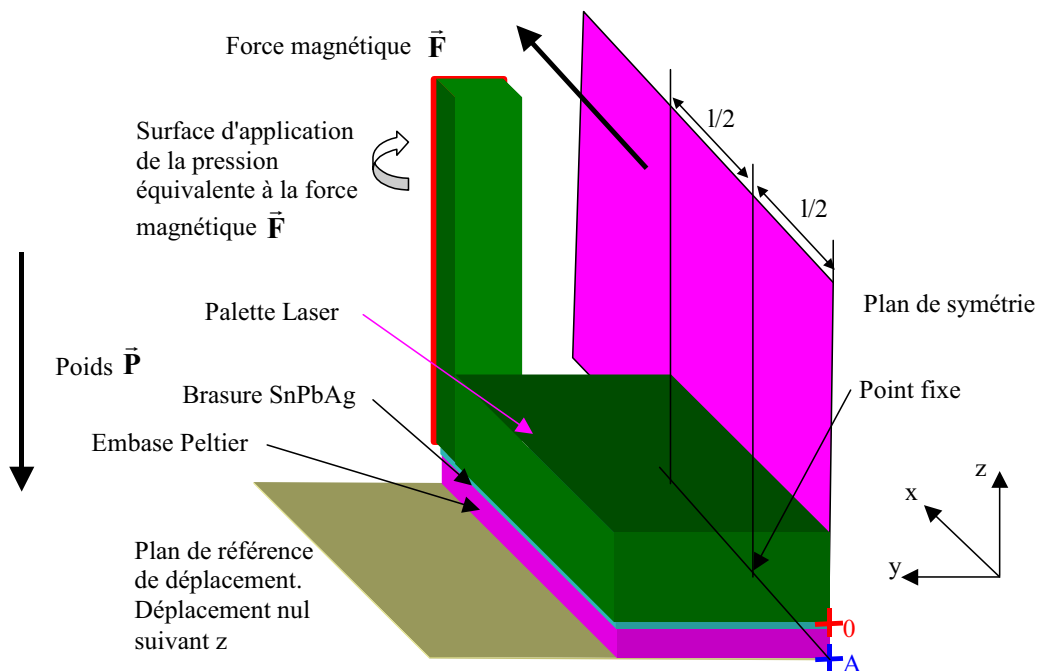


Figure 173 - Géométrie initiale des volumes du modèle ANSYS du sous-ensemble n° 1-b

La figure 174 représente le modèle par éléments finis du système palette laser sur l'embase Peltier comportant 55075 éléments et 123193 nœuds par des éléments de forme parallélépipédique pour la brasure Epsilon et l'embase Peltier et hexagonaux pour la palette laser. Le maillage des éléments a été effectué manuellement dans le but de préciser l'étude sur l'interface palette laser/Peltier. En effet, le maillage est affiné au niveau de la brasure (indiqué par les flèches), seul élément susceptible de se dégrader lors des cycles thermiques 233 K/358 K (-40°C/+85°C).

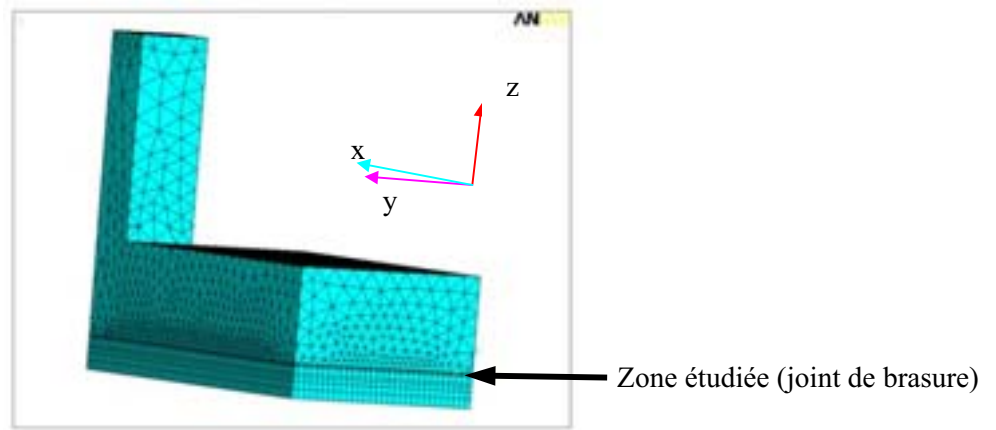


Figure 174 : Maillage optimisé pour le modèle ANSYS du sous-élément palette laser/Peltier

Nous avons résumé le déroulement des simulations dans le tableau 34 afin de simplifier la compréhension de l'étude envisagée et de concentrer les informations. Plusieurs types de simulations ont été effectués sur le même modèle : linéaires et non-linéaires. Les contraintes et hypothèses de simulation restent identiques pour les deux types de simulation.

L'étude thermomécanique du joint de brasure passe d'abord par une simulation linéaire afin de déterminer l'évolution du matériau en fonction des contraintes extérieures. Dans notre cas, la température est le paramètre à faire varier afin de réaliser les cycles thermiques. Dans la figure 175, nous avons superposé un cycle thermique continu en indiquant par des points les étapes de simulations. Les simulations thermomécaniques étant statiques, le chargement en température conditionne les étapes simulées. Pour des simulations linéaires, le chargement en température s'effectue en une seule passe de 300K→358K ou bien de 300K→233K.

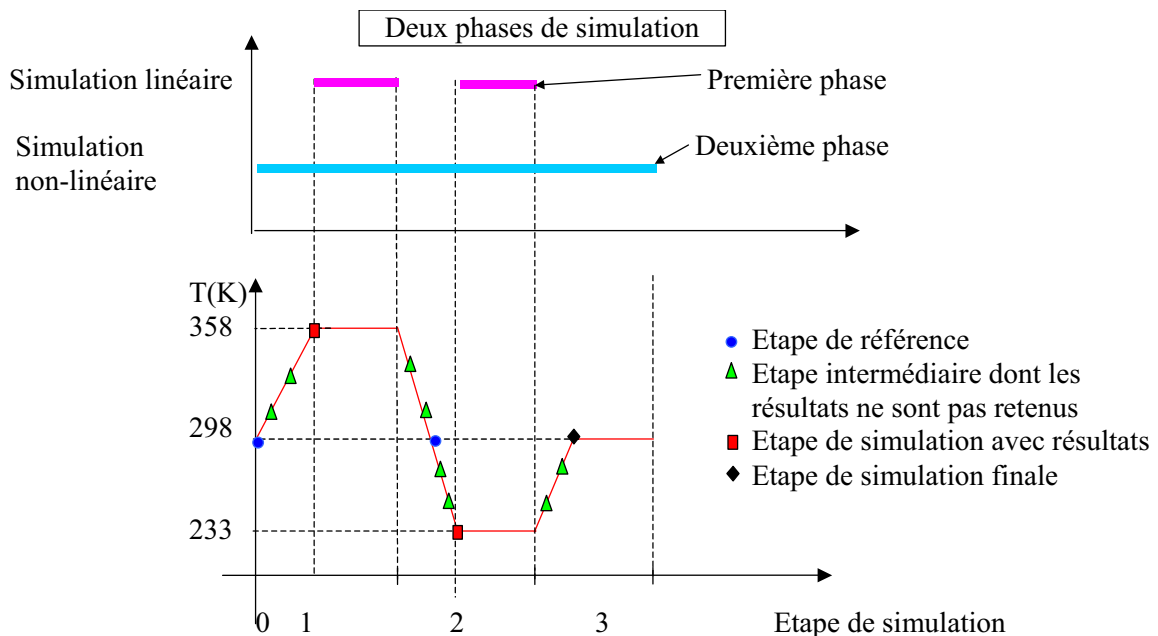


Figure 175 – Représentation graphique d'un cycle thermique adapté aux étapes de simulations ANSYS

Déroulement des simulations	Grandeurs physiques et valeurs associées					
Données physiques des matériaux	<i>Désignation</i>	<i>Constantes de matériaux utiles aux simulations²⁵</i>				
	Kovar ²⁶	E = 138.10 ⁹ Pa : CTE = 5,86.10 ⁻⁶ m/K : d = 8360 kg.m ⁻³				
	Brasure Epsilon ²⁷	d = 11020 kg.m ⁻³				
		Température (K)	233	298	348	398
		E (10 ⁹ Pa)	9	9	9	9
		Y (10 ⁶ Pa)	10	9	4	2
		S (10 ⁹ Pa)	2,7	2,3	1,1	0,5
CTE (10 ⁻⁶ m /K)	24,7	24,7	24,7	24,7		
Références communes pour les hypothèses de simulation	<i>Désignation</i>	<i>Caractéristiques des contraintes</i>				
	Référence de température	La température de référence est fixée à 298 K. Température uniforme.				
	Plan de symétrie	Plan (Ox, Oz) donné dans la figure 173.				
	Plan de référence pour les déformations	Plan (Ax, Ay) donné dans la figure 173 : pas de déplacement selon l'axe Oz pour la surface du modèle contenu dans le plan.				
	Poids \vec{P} ²⁸	Dirigé suivant l'axe Oz vers le bas : module = M.g (g = 9,81 N.kg ⁻¹)				
	Force magnétique \vec{F}	Dirigée suivant l'axe Ox. Cette force est assimilée à une pression de 30 g. La surface d'application est la surface de la colonnette parallèle au plan (Oy, Oz).				
Références distinctes correspondantes aux différentes simulations	<i>Type de simulation</i>	<i>Chronologie des simulations</i>				
	Simulation statique et linéaire avec une approche thermomécanique	n°1 - T = 298 K → T = 358 K n°2 - T = 298 K → T = 233 K				
	Simulation statique et non-linéaire avec une approche thermomécanique	n°1 - T = 298 K → T = 358 K n°2 - T = 358K → T = 233 K n°3 - T = 233 K → T = 298 K				

Tableau 34– Conditions de simulation pour l'ensemble palette laser-reportée sur l'embase Peltier

Le cycle thermique donné dans le tableau 34 est détaillé dans la figure 175. Cependant, on ne peut pas effectuer des simulations pour une variation continue d'un paramètre.

La précision des simulations dépend fortement des données d'entrées dans le simulateur. Une étude expérimentale sur les courbes contrainte-déformation spécialement adaptée à la brasure Epsilon d'épaisseur 15 µm a été effectuée à l'Ecole des Mines de Paris [129]. Les préformes de brasure sont positionnées entre deux éprouvettes de type "annulaire" de diamètre intérieur d=18 mm et de diamètre extérieur D=20 mm. Une refusions de la brasure est alors effectuée pour donner un échantillon représenté dans la figure 176.

Glossaire :

²⁵ E représente le module de Young (Pascal : Pa) ; CTE représente le coefficient d'allongement en m/K et d est la densité en kg.m⁻³.

²⁶ Kovar : alliage de Fer (Fe), Nickel (Ni) et Cobalt (Co) pour l'essentiel.

²⁷ Brasure composée de 62 % d'Etain (Sn), de 36% de Plomb(Pb) et 2% d'argent (Ag).

²⁸ La masse de chaque volume est calculée pour déterminer l'intensité de P.

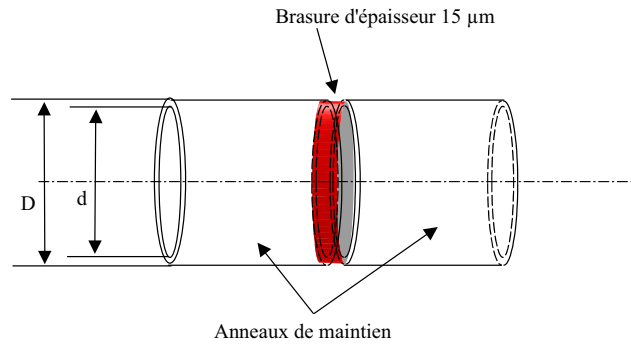


Figure 176 – Schéma d'une éprouvette annulaire

Les essais de traction et de torsion sont alors effectués et permettent de déterminer l'évolution des courbes contrainte-déformation. Ces résultats sont présentés graphiquement dans la figure 177 et numériquement dans le tableau 34.

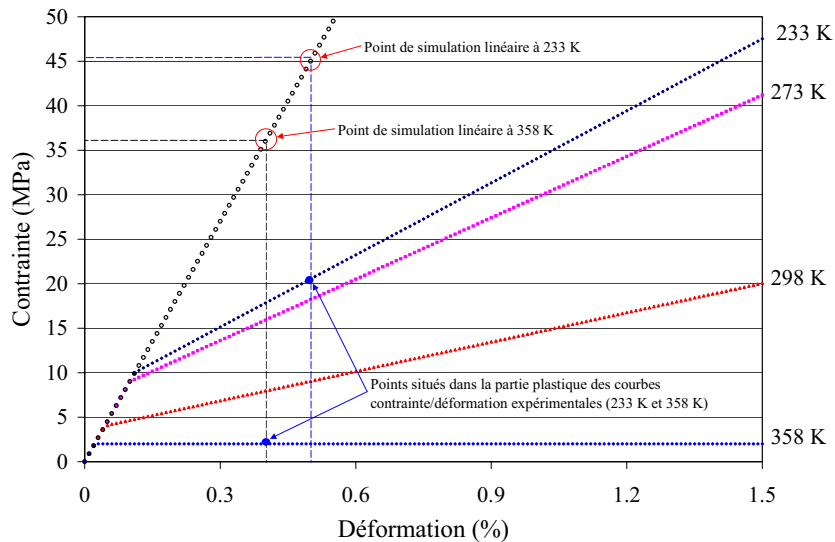


Figure 177 – Courbes expérimentales contrainte-déformation d'éprouvette de test de 15 µm d'épaisseur

III.2.c / Résultats des simulations linéaires

Les résultats porteront plus précisément sur l'analyse des contraintes et déformations de Von-Mises relatives au volume du joint de brasure.

Les simulations suivantes ont été effectuées afin de déterminer si le niveau de contraintes et de déformations localisées dans le joint de brasure correspond au domaine plastique (figure 177). Pour cela, les courbes contrainte-déformation sont représentées par une droite affine reliant les contraintes aux déformations par la relation : $\sigma = E\varepsilon$ où σ représente la contrainte (Pa), E le module de Young (Pa) et ε la déformation relative.

Dans chaque cas, nous donnerons la représentation du joint en **vue de dessous dans le plan (x, y)** ainsi que sa position d'origine représentée par le dessin des éléments (rectangle).

- Cas de charge : 298 K (+25°C) → 358 K (+85°C)

La figure 178 représente le joint de brasure lors d'un passage en température haute (358 K/+85°C). On observe une déformation maximale du joint de brasure d'environ 0,4%.

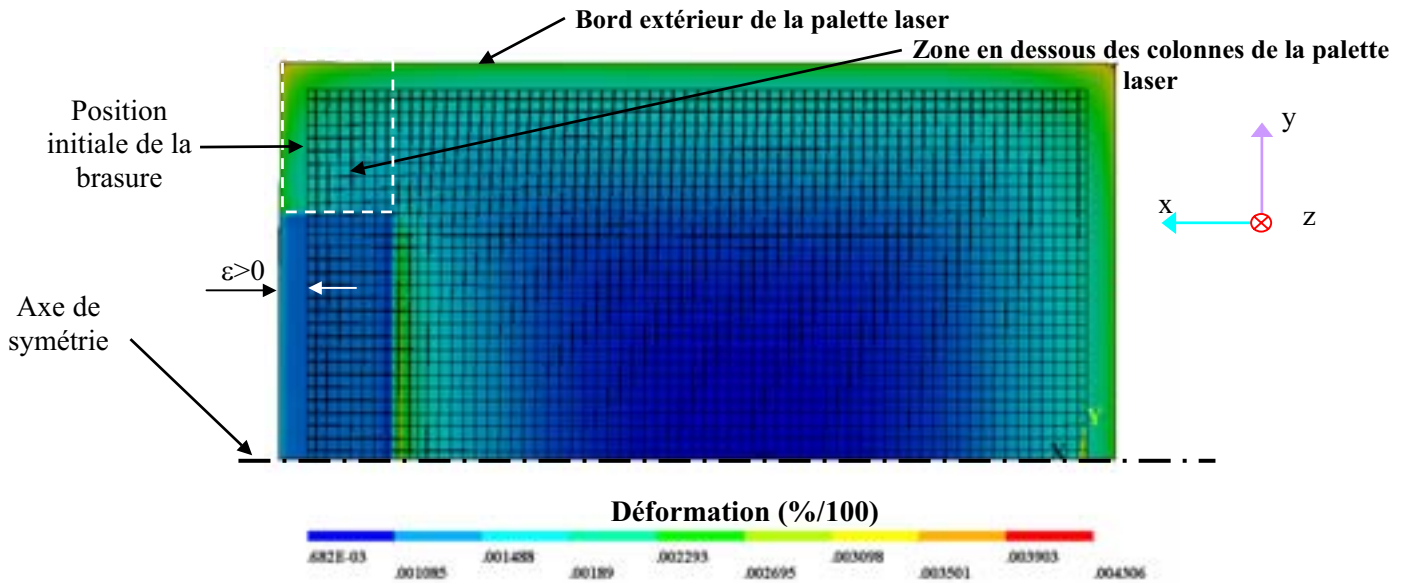


Figure 178 – Cartographie des déformations de Von-Mises dans la brasure pour une température de 358K

- Cas de charge : 298 K (+25°C) → 233 K (-40°C)

La figure 179 représente la cartographie des contraintes dans le joint de brasure pour une température de 233 K (-40°C). On observe un maximum de contraintes dans le joint d'environ 45 MPa situées sur les bords de ce dernier.

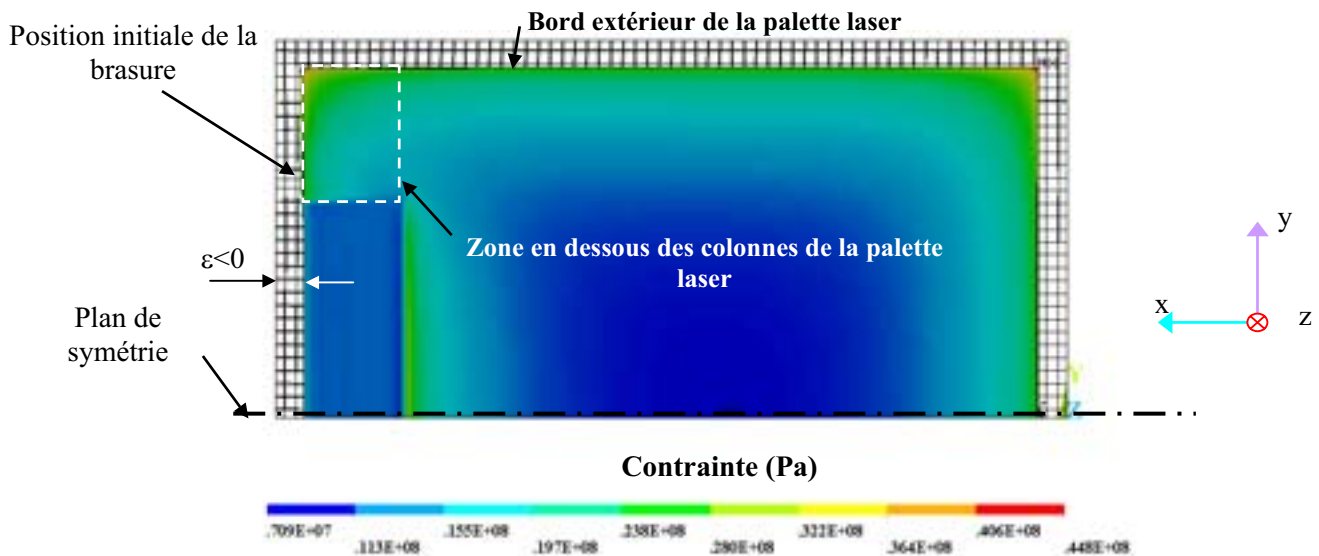


Figure 179 – Cartographie des contraintes de Von-Mises dans la brasure pour une température de 233 K

Le niveau des contraintes et des déformations atteint *correspond au domaine plastique de la brasure*, c'est à dire que pour 233 K (-40°C), le niveau de contrainte maximal est de 44 MPa et dépasse la contrainte limite élastique correspondante, soit 10 MPa. De la même manière, à 358 K (+85°C), la déformation maximale est de 0,4 % et dépasse la limite élastique correspondante, soit 0,2 %. Cet ensemble de considérations est représenté dans la figure 177. Une étude non-linéaire, tenant compte des courbes contrainte-déformation, doit maintenant être effectuée afin de déterminer, avec un modèle approprié, les contraintes et déformations accumulées lors d'un cycle thermique.

III.2.d / Etude de la plasticité du joint de brasure

Cette partie s'intéresse aux déformations plastiques accumulées dans la brasure lors d'un cycle thermique obtenues après des simulations non-linéaires. Cette étude a trois objectifs :

- localiser au sein de la brasure les zones de fortes déformations à 358 K (+85°C), pour une température de référence de 298 K (+25°C), qui peuvent prédisposer à l'amorce de fractures de fatigue,
- évaluer l'impact des efforts que sont le poids et la force magnétique sur la déformation du joint,
- donner un ordre de grandeur de la déviation de l'axe optique du système.

Les études représentées ci-après sont définies géographiquement de la même manière que dans la section III.2.c. Le modèle et les éléments finis ont une représentation identique.

- *Localisation des zones plastiques – fatigue de la brasure Epsilon*

La localisation des zones de déformation plastique se fait après un chargement en température à 358 K (+85°C). Il est important de souligner que cette simulation s'effectue sans les efforts extérieurs \vec{F} et \vec{P} afin de déterminer les conditions de fatigue thermique de la brasure soumise à des cycles thermiques.

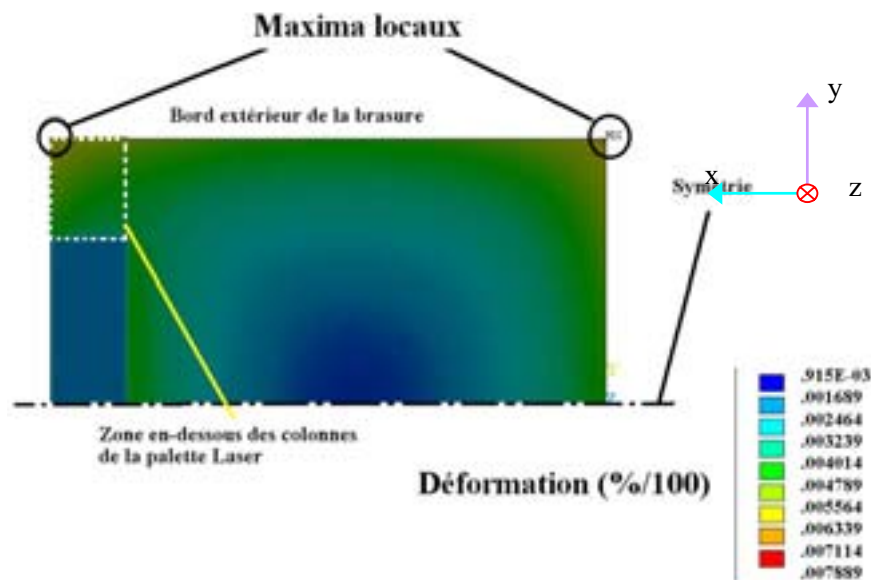


Figure 180 – Cartographie des déformations plastiques à 358 K (+85°C)

On observe que les zones de plus forte plasticité se situent sur les bords de la brasure (0,8%) et en dessous des colonnes de la palette laser.

L'amplitude maximale des déformations plastiques, évaluée à 0,8 % au maximum, peut être à l'origine d'une initiation de défauts par fatigue du joint de brasure [117]. La loi, la plus adaptée à notre cas, liant le nombre de cycles à la défaillance et à la déformation que subit le matériau a été proposée à l'origine par **Coffin-Manson** [108] :

$$N = \frac{k}{(\Delta\epsilon_p)^n}$$

E III-7

- où **N** est le nombre de cycles thermiques conduisant à la rupture
 ϵ_p représente la déformation plastique du joint
n, k des constantes dépendantes du matériau

Le paramètre **n** est relatif à l'épaisseur de la brasure pour le matériau Epsilon. Pour des joints de brasure proches de 10 μm , la valeur de **n** est égale à 1,2. La courbe donnant l'évolution du nombre de cycles thermiques en fonction de $\Delta\epsilon_p$ est représentée par une droite. La pente expérimentale de cette droite permet d'évaluer la valeur de **k** à 27,2. Ces considérations sont basées sur les travaux réalisés par **J.H. Lau** [117]. Cependant le joint de brasure considéré doit être parfaitement homogène et exempt de défauts afin de pouvoir appliquer cette loi. Les tests expérimentaux explicités en fin de chapitre permettront de valider cette hypothèse. L'évaluation de la déformation plastique accumulée par le joint de brasure permet d'obtenir le paramètre $\Delta\epsilon_p$ en particulier à partir de la représentation du cycle d'hystérésis en traçant le graphe $\sigma=f(\epsilon)$ après deux cycles thermiques en ne tenant pas compte du premier cycle (figure 181).

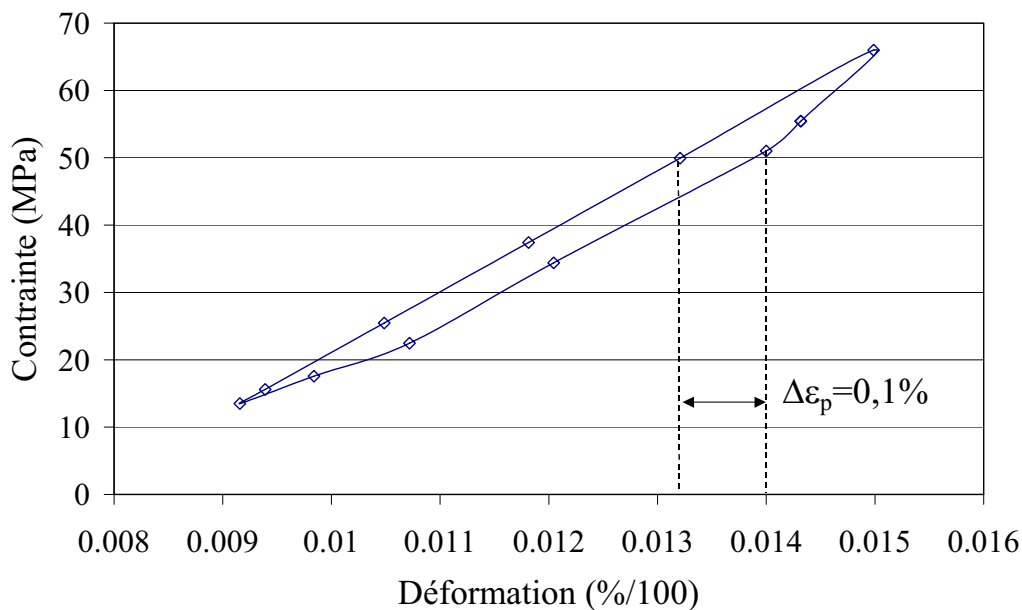


Figure 181 – Graphe donnant l'évolution de la contrainte de Von-Mises $\sigma(\epsilon)$ pour un cycle thermique

Le nombre de cycles thermiques nécessaire pour l'initiation de fissures par fatigue est supérieur à 600 cycles en considérant que le premier cycle ne doit pas être pris en compte.

A présent, nous allons quantifier les contraintes et déformations dans une zone locale de déformation plastique maximale.

▪ *Maxima locaux de contraintes et déformations dans le sous-ensemble n°1-b*

Nous avons isolé deux éléments se situant dans la zone de déformation plastique maximale indiquée dans la cartographie de la figure 180. Un élément se situe en dessous de la colonne de la palette laser (n° 916 observation des contraintes) et à l'autre l'extrémité (n° 909 observation des déformations) selon le schéma de la figure 182. Les numéros correspondent aux éléments du maillage.

L'étude est réalisée afin de montrer l'impact des efforts \vec{F} et \vec{P} représentés dans la figure 182 sur les déformations et les contraintes du joint de brasure et leur rôle sur une éventuelle déformation permanente de ce dernier. En d'autres termes, ces simulations vont nous permettre de conclure si le joint de brasure, soumis à une force permanente, est susceptible d'accroître la fatigue du joint au cours des cycles thermiques. *Nous avons donc effectué une simulation en tenant compte de ces forces et une simulation sans ces forces.*

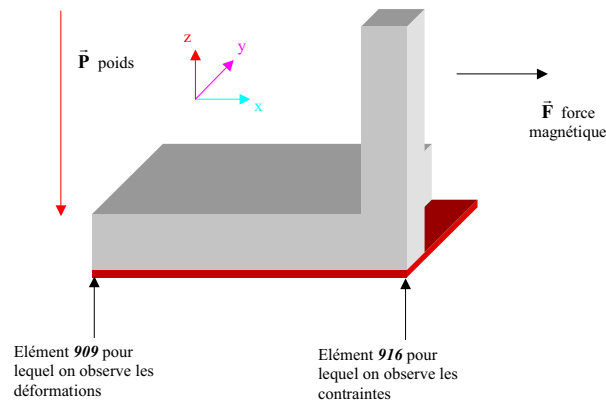


Figure 182 – Schéma représentant les éléments étudiés 909 et 916 et les forces extérieures appliquées au système

La différence des contraintes et des déformations n'est pas suffisante pour être observée sur un graphe. Nous avons donc choisi de donner les résultats dans le tableau 35 et le tableau 36. On exprimera **les contraintes (notées S)** et **les déformations (notées E)** suivant les différentes orientations : x, y et z pour les translations xy, yz et xz pour le cisaillement autour des axes z, x et y. Les résultats sont donnés pour une température de 233 K (-40°C) dans l'élément **916** et pour une température de 358 K (+85°C) dans l'élément **909** en accord avec la figure 175.

Variations de contraintes dans l'élément 916						
	SX(MPa)	SY(MPa)	SZ(MPa)	SXY(MPa)	SYZ(MPa)	SXZ(MPa)
Avec F et P	20,7	20,6	18,8	0,128	10,3	11,7
Sans F et P	20,2	20,1	18,5	0,127	10,3	11,6
Ecart	0,5	0,5	0,3	0,001	0	0,1

Tableau 35 – Variations de contraintes dans l'élément 916 entre le système soumis aux forces extérieures et le système sans force extérieure

Variations de déformations dans l'élément 909						
	EX(%)	EY(%)	EZ(%)	EXY(%)	EYZ(%)	EXZ(%)
Avec F et P	-0,152	-0,144	0,346	0,193.10 ⁻⁴	0,958	0,523
Sans F et P	-0,152	-0,143	0,345	0,193.10 ⁻⁴	0,958	0,522
Ecart	0	10 ⁻³	10 ⁻³	0	0	10 ⁻³

Tableau 36 - Variations des déformations dans l'élément 909 entre le système soumis aux forces extérieures et le système sans force extérieure

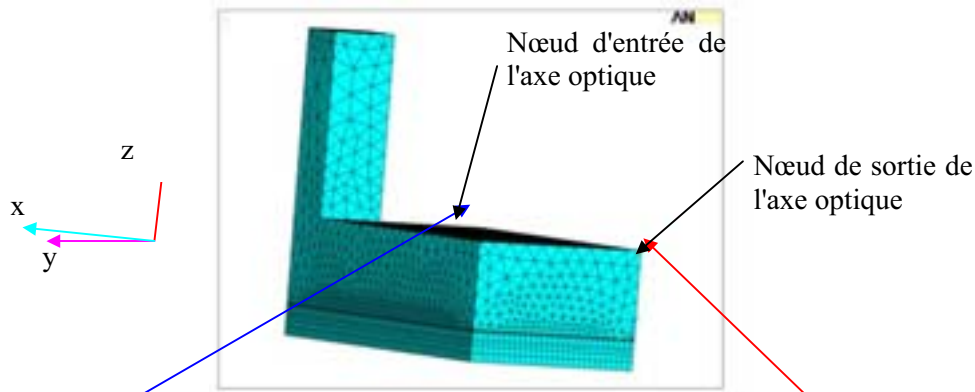
Les maxima de contraintes de **Von-Mises** relevées dans l'élément n°916 défini ci-dessus sont d'environ 40,5 MPa pour le système contraint et 40 MPa pour le système non soumis aux forces extérieures pour une température de 233 K (-40°C). La différence des niveaux de contrainte entre le système soumis aux efforts permanents \bar{F} et \bar{P} et le système libre est très faible. On peut dire que les forces permanentes (poids et force magnétique) n'apportent quasiment pas de contrainte supplémentaire.

Concernant les déformations, l'élément observé est le n°909 et la différence de déformation maximale est aussi identique.

Par conséquent, les forces extérieures appliquées au système ne sont pas considérées comme des facteurs aggravants d'une dérive de couplage optique. Observons, à présent, l'impact des déformations plastiques du joint de brasure sur la déviation de l'axe optique théorique.

- *Evaluation de la déviation de l'axe optique*

Afin d'évaluer l'impact de la plasticité du joint de brasure sur la déviation de l'axe optique, nous allons observer la position relative des nœuds d'entrée et de sortie définissant cet axe. La démarche est similaire à celle entreprise pour le sous-ensemble n°1-a.



Nœud d'entrée n°10726			Nœud de sortie n°11704		
Δx (μm)	Δy (μm)	Δz (μm)	Δx (μm)	Δy (μm)	Δz (μm)
-0.071804	0	-0.014863	0	0	-0.0145

Au final, on observe une rotation maximale de l'axe optique théorique autour de l'axe "y" de :
 $\Delta\alpha = 0,0000035^\circ$

III.2.e / Synthèse et interprétation

Pour résumer les résultats de simulation nous dirons que les bords du joint de brasure passent dans le domaine plastique. Les forces extérieures permanentes ne contribuent pas à une déformation supplémentaire du joint. Seule l'amplitude des déformations plastiques permet d'évaluer la fatigue du joint soumis aux cycles thermiques. Nous avons donc déterminé le nombre de cycles (600) nécessaire pour initier des défauts par fatigue du matériau en utilisant la loi de **Coffin-Manson**. Cependant le joint de brasure considéré doit être parfaitement homogène et exempt de défaut afin de pouvoir appliquer cette loi.

Pour vérifier la qualité de la brasure, nous avons effectué des tests d'expertises isolant le sous-ensemble considéré. Nous verrons que l'analyse par microscope acoustique développée au Laboratoire permettra de donner les réponses satisfaisantes à nos exigences [49].

Nous allons aborder, à présent, la dernière partie de l'étude portant sur le sous-ensemble fibre optique.

III.3 / Analyse du système fibre optique

III.3.a / Objectifs

Le sous-ensemble n°2 a fait l'objet d'une étude concentré sur l'assemblage fibre optique/férule. Ces deux éléments sont maintenus ensemble par une colle époxy dont la référence est EPOTEK. Les caractéristiques mécaniques n'étant pas à notre disposition, nous avons réalisé une étude permettant d'obtenir les courbes contrainte-déformation pour des températures contenues dans la plage 233 K/358 K (-40°C/+85°C).

Une fois l'étude réalisée, nous avons effectué une simulation thermomécanique retraçant les conditions de vieillissement de cycles thermiques VRT 233K/358K (-40°C/+85°C). Nous avons alors extrait des résultats de simulation, les zones de plus fortes contraintes. Nous débiterons cette partie par la présentation du modèle et des conditions de simulation.

III.3.b / Modèle et conditions de simulation

Le sous-ensemble n°2 est soumis à un seul effort permanent qui est le poids \vec{P} . Sa direction est suivant l'axe Ox dirigé vers les valeurs positives de x. De façon analogue à l'ensemble palette laser/Peltier, la contrainte environnementale sera appliquée sous la forme d'un cycle thermique 233 K/358 K (-40°C/+85°C) décrit ultérieurement. Le modèle ANSYS développé comporte des éléments de symétrie, une surface et un point de référence. L'ensemble de ces éléments est représenté dans la figure 183.

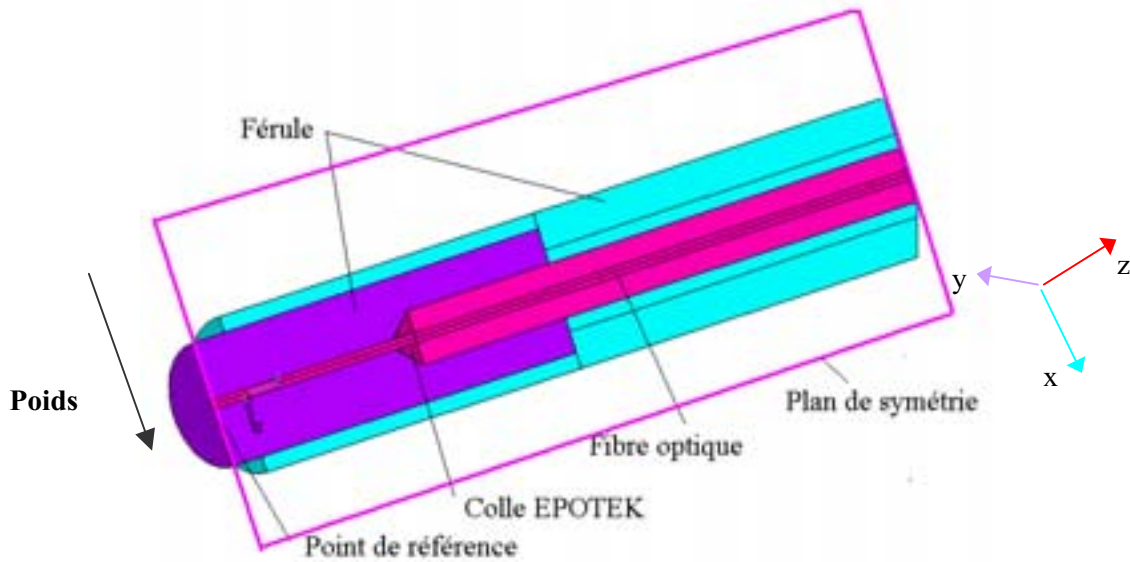


Figure 183 – Géométrie initiale des volumes du modèle ANSYS du sous-ensemble N°2

La figure 184 représente le maillage global du sous-ensemble n°2 utilisant des éléments hexagonaux obtenus par le système de maillage automatique. Le maillage des éléments a été effectué dans le but de préciser l'étude sur l'interface férule/fibre optique. En effet, la partie qui nous intéresse est le cône de la férule remplie d'un adhésif de type : epoteck, le maillage a donc été affiné dans cette zone afin d'améliorer la précision des calculs. Le système comporte 16741 éléments et 3572 nœuds. Ces valeurs s'expliquent par la présence d'un élément de type "contact" réalisant la liaison pivot glissant entre le guide férule et la férule.

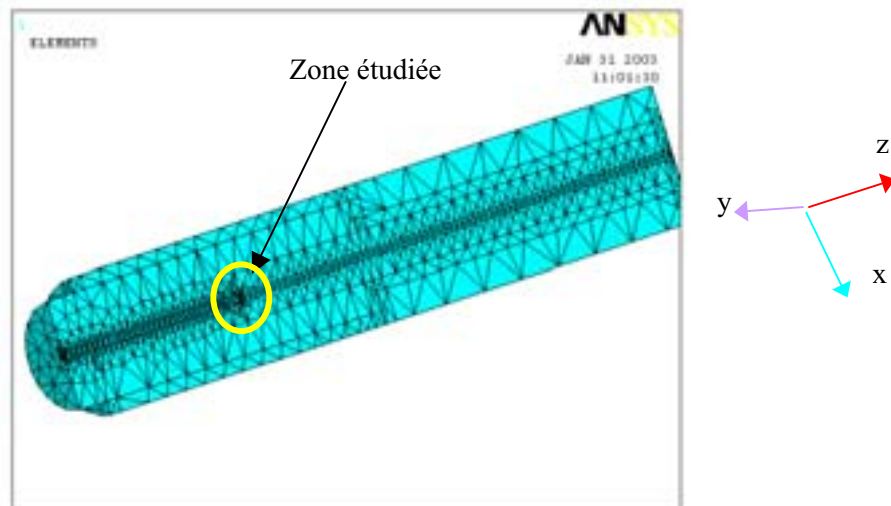


Figure 184 – Maillage optimisé pour le modèle ANSYS du sous-ensemble n°2

Les conditions intégrant les forces s'appliquant sur le système sont regroupées dans le tableau 37. Nous avons également donné les propriétés physiques de l'adhésif EPOTEK provenant des analyses effectuées en collaboration avec le Laboratoire de Ressources collages.

Déroulement des simulations	Grandeurs physiques et valeurs associées						
Matériaux mis en œuvre	Désignation	Constantes de matériaux utiles aux simulations ²⁹					
	Kovar ³⁰	E = 138.10 ⁹ Pa : CTE = 5,86.10 ⁻⁶ m/K : d = 8360 kg.m ⁻³					
	Colle EPOTEK ³¹	D _{partie A} = 1200 kg.m ⁻³ : D _{partie B} = 1020 kg.m ⁻³ : D = 1,038 kg.m ⁻³					
		Température (K)	233	273	298	328	358
		E (10 ⁹ Pa)	2	2	1,9	1,2	1,3
		σ _{max} (10 ⁶ Pa)	38	45	54	46	41
	CTE	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	
Zirconium	E = 200.10 ⁹ Pa : CTE = 7.10 ⁻⁶ m/K : d = 5680 kg.m ⁻³						
Silice	E = 72,4.10 ⁹ Pa : CTE = 5,6.10 ⁻⁷ m/K : d = 2200 kg.m ⁻³						
Références communes pour les hypothèses de simulations.	Désignation	Caractéristiques des contraintes					
	Référence de température	La température de référence est fixée à 298 K. Température uniforme.					
	Plan de symétrie	Plan (Ox, Oz) donné en figure 183					
	Plan de référence pour les déformations	Plan (Ax, Ay) donné en figure 183 : pas de déplacement selon l'axe Ax et Ay pour la surface du modèle contenu dans le plan. Le point O est fixe au court des simulations.					
	Poids \vec{P} ³²	Dirigé suivant l'axe Oz vers le bas : module = M.g (g = 9,81 N.kg ⁻¹)					
Références distinctes correspondantes aux différentes simulations	Type de simulation	Chronologie des simulations					
	Simulation statique et non-linéaire avec une approche thermomécanique	n°1 - T = 298 K → T = 358 K n°2 - T = 358K → T = 233K n°2 - T = 233 K → T = 298 K					

Tableau 37 – Conditions de simulation du sous-ensemble n°2

De manière analogue aux simulations précédentes, les cycles thermiques sont traduits par des étapes dont la figure 185 représente la chronologie ; la définition est identique à l'étude du sous-ensemble n°1-b.

²⁹ E représente le module de Young (Pascal : Pa) ; CTE représente le coefficient d'allongement en m/K et d est la densité en kg.m⁻³.

³⁰ Kovar : alliage de Fer (Fe : 53%), Nickel (Ni : 29%) et Cobalt (Co : 17%) pour l'essentiel.

³¹ Colle EPOTEK 353 ND dont les caractéristiques mécaniques ont été réalisées par le Laboratoire Ressources collages

³² La masse de chaque volume est calculée pour déterminer l'intensité de P.

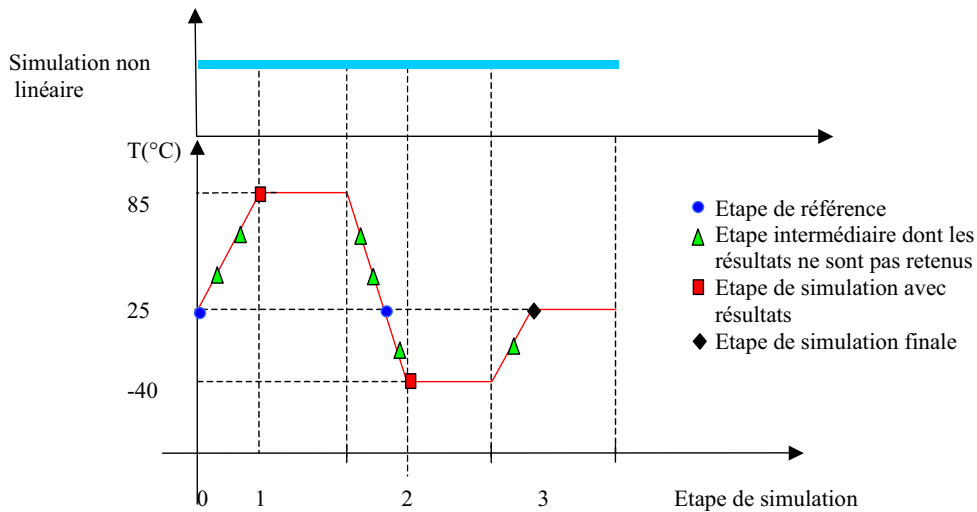


Figure 185 – Représentation graphique d'un cycle thermique adapté aux étapes de simulation ANSYS

Pour cette étude, nous avons effectué des simulations uniquement non-linéaires pour deux raisons :

- La liaison entre le guide férule et la férule est une liaison pivot glissant. Cette liaison comporte deux degrés de libertés : une rotation et une translation sur le même axe. Cette liaison peut être modélisée par un élément "contact³³" et ne peut être traité que par des simulations non-linéaires.
- Les caractéristiques thermomécaniques de l'adhésif EPOTEK comporte une non-linéarité du fait de la différence de module de **Young** en fonction de la température. Les caractéristiques contrainte-déformation évaluées en fonction de la température sont données dans la figure 186.

Les simulations effectuées pour la partie fibre optique ont nécessité la détermination expérimentale des courbes contrainte-déformation en température (figure 186) de la colle EPOTEK. On constate que le comportement de la colle est linéaire jusqu'à la rupture et que la contrainte élastique limite est identique à la contrainte à la rupture. Cette propriété tend à démontrer que la région plastique du matériau est très peu existante et souligne la fragilité du matériau. Ces courbes sont établies pour un procédé de fabrication défini par le fabricant et des dimensions d'éprouvettes de type "haltères" d'épaisseur standard (3 mm)[75].

³³ Contact : voir partie III.1.b

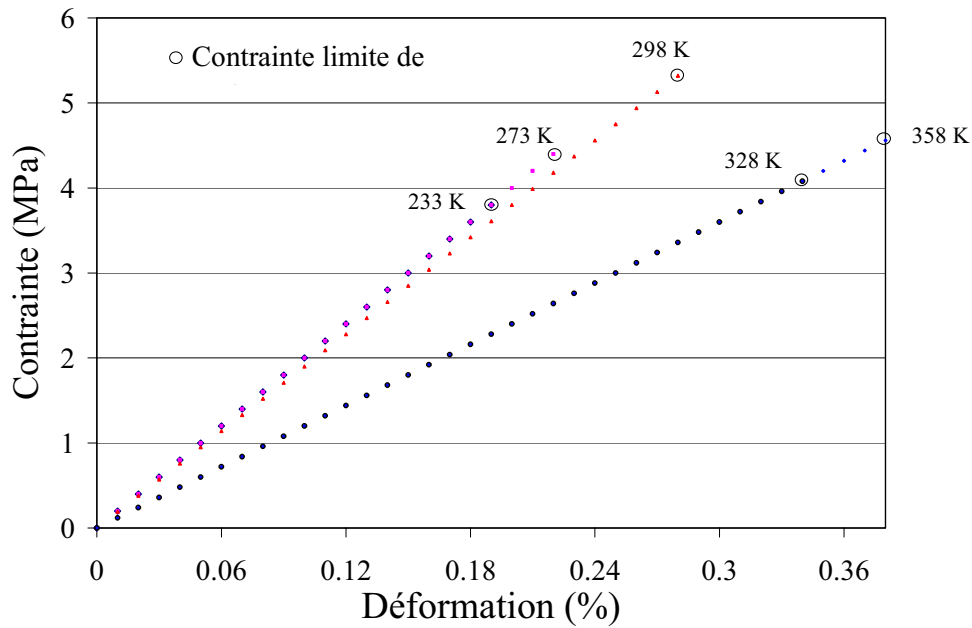


Figure 186 – Courbes expérimentales contrainte-déformation de la colle EPOTEK

Les simulations thermomécaniques se focalisent sur la partie de la fibre se situant dans le cône de la férule (figure 187) avec comme objectif majeur : évaluer l'amplitude des contraintes sur le filament de la fibre optique.

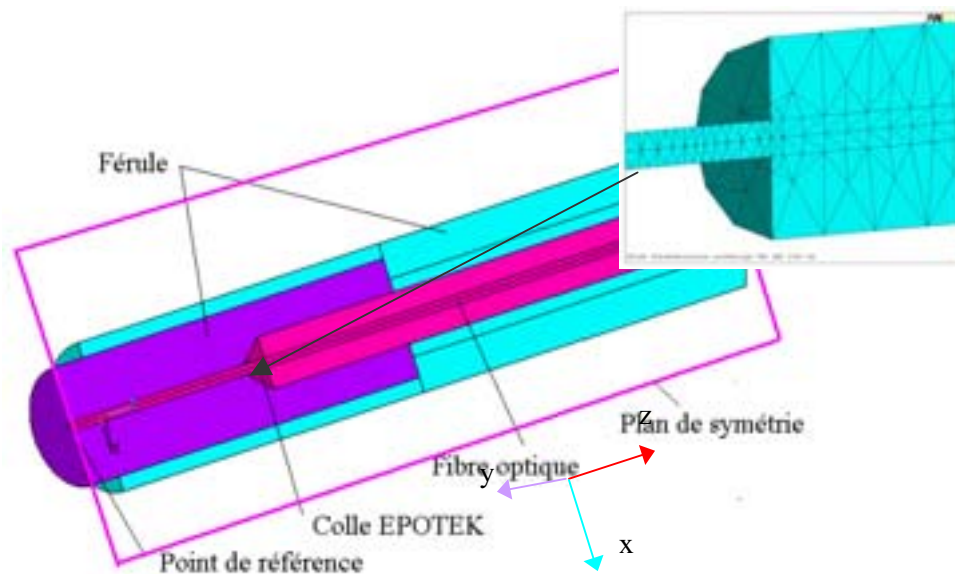


Figure 187 – Vue représentative de la zone étudiée correspondant au lieu identifiant la défaillance

III.3.c / Résultats des simulations

Les résultats sont présentés pour les températures de 358 K (+85°C) et 233 K (-40°C) sous forme de cartographie de contraintes **Von-Mises** sur la fibre optique dans les deux cas.

- Cartographie des contraintes à 358 K (+85°C)

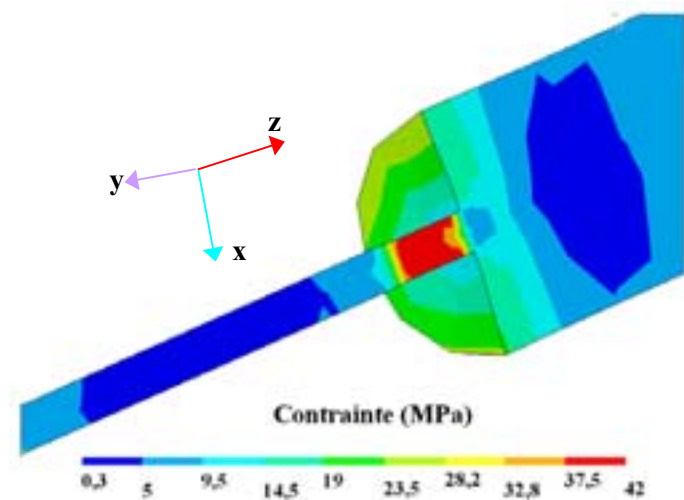


Figure 188 – Cartographie des contraintes de Von-Mises situées dans la zone considérée pour une température de 358 K (+85°C)

L'amplitude maximale des contraintes à 358 K (+85°C) est évaluée à 42 MPa (figure 188) et se situe en sortie de gaine, c'est à dire à la jonction entre fibre gainée et fibre dénudée. La différence de CTE entre la colle (13 ppm/K) et le cœur de la fibre (0,5 ppm/K) explique cette forte concentration de contraintes dans cette région.

- Cartographie des contraintes à 233 K (-40°C)

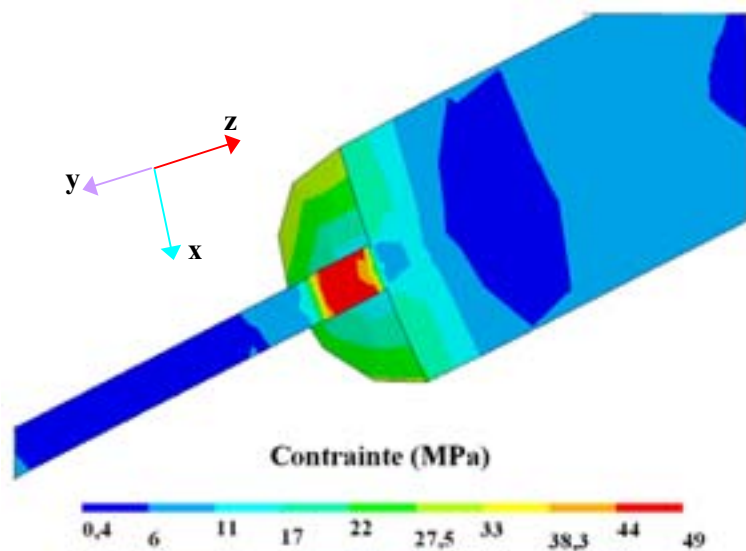


Figure 189 – Cartographie des contraintes de Von-Mises situées dans la zone considérée pour une température de 233 K (-40°C)

De la même manière, à la température 233 K (-40°C), on constate une amplitude maximale des contraintes dans la figure 189 de 49 MPa, localisé en sortie de gaine.

Afin d'observer la dynamique d'évolution des contraintes locales au cours des étapes de simulation, nous avons isolé un élément de cette zone.

Le niveau de contraintes observées dans la figure 191 suivant l'axe Oz est le plus important en valeur absolue. De plus, cette dernière s'inverse entre l'instant où le système passe de 358 K (+85°C) (42 MPa) et 233 K (-40°C) (-49 MPa). La fibre optique est donc soumise à une succession de tractions (233 K/-40°C) et compressions (358 K/+85°C) suivant les cycles effectués sur l'ensemble.

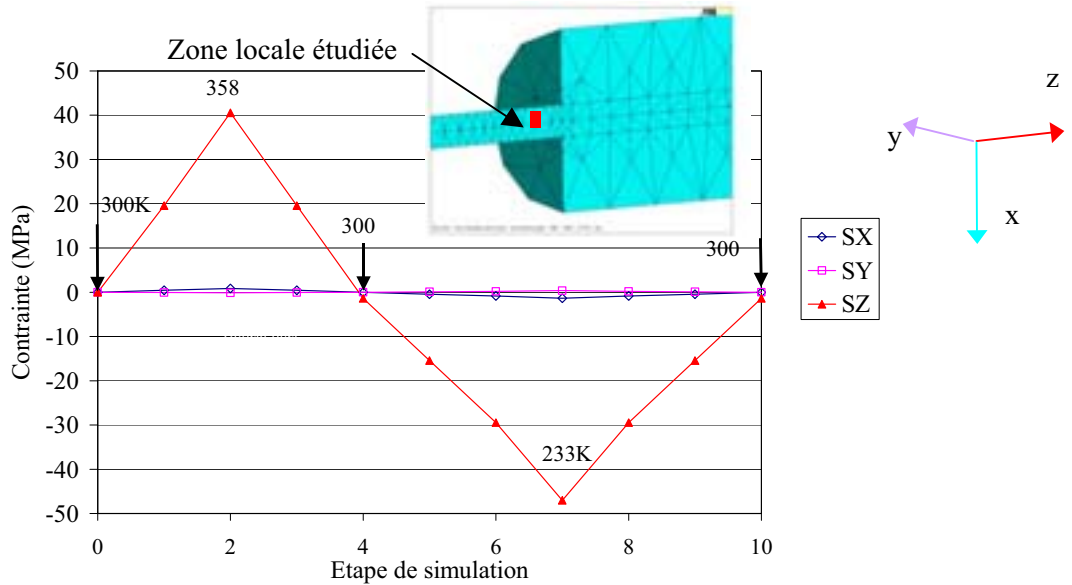


Figure 190 – Evaluation de la contrainte locale de tension dans un élément de sortie de gaine au cours d'un cycle thermique -40°C/+85°C

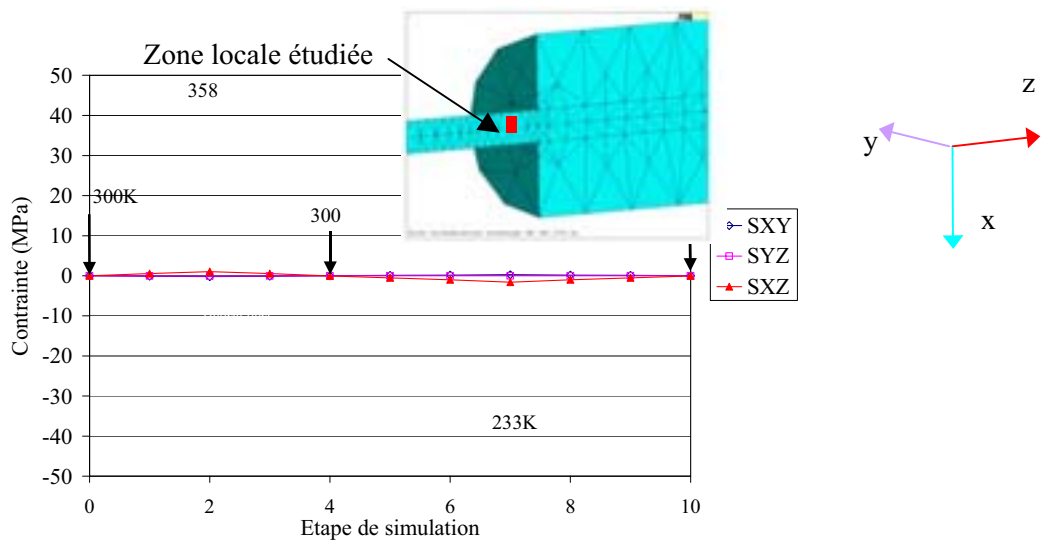


Figure 191 – Evaluation de la contrainte locale de cisaillement dans un élément de sortie de gaine au cours d'un cycle thermique -40°C/+85°C

La concentration des efforts est prépondérante suivant l'axe Oz. Ce phénomène s'explique par la forme cylindrique allongée, c'est à dire un cylindre dont le diamètre est très petit devant la longueur, du filament de la fibre. Lors d'un chargement positif en température, cette disproportion de dimension géométrique induit un allongement suivant Oz du cylindre définissant le cœur de la fibre bien plus important que l'augmentation de son diamètre. La contrainte résultante, suivant Oz, de ce phénomène

est bien plus élevé.

III.3.d / Synthèse des résultats

L'objectif de montrer la présence d'une concentration de contraintes sur le filament de la fibre optique a été atteint. Nous avons précisé le module de ces contraintes qui est d'environ 45 MPa en moyenne et dont l'orientation s'inverse entre 358 K (+85°C) et 233 K (-40°C). Il est à remarquer que l'amplitude maximale des contraintes est de 49 MPa alors que la contrainte de rupture du cœur de la fibre est de 2,5 GPa [111]. Cependant, cette dernière est évaluée pour un filament intègre ; c'est à dire n'ayant aucune présence de défaut dans son volume. Les tests d'expertises que nous avons proposés devraient éclaircir la criticité de ce sous-ensemble.

III.4 / Synthèse globale des simulations

Dans un premier temps, les réponses à une sollicitation de type impulsion laser Nd : YAG ont permis de calculer les niveaux de contraintes et de déformations obtenus sur le sous-ensemble n°1-a. Elles ont également démontré :

- ❑ La conséquence de la configuration technologique du sous-ensemble palette laser porte lentille1 induisant un degré d'hyperstaticité relativement élevé et une non-homogénéité de répartition de masses susceptible d'engendrer une distribution asymétrique des déformations au sein de la structure.
- ❑ Une criticité de tirs laser Nd : YAG à l'origine de gradients thermiques sévères responsables d'une accumulation de contraintes résiduelles pouvant être à l'origine d'une déviation de l'axe optique.

Dans un deuxième temps, les résultats de simulations issus de chargement en température de type cycles thermiques ont permis de calculer les niveaux de contraintes et de déformation sur les deux derniers sous-ensembles. Ils ont également démontré :

- ❑ Le faible impact du passage en zone plastique du joint de brasure entre la palette laser et le module thermoélectrique (Peltier) sur une éventuelle perte du couplage optique après cycles thermiques
- ❑ Une concentration élevée de contraintes très localisées au niveau du cône de fêrle dans la partie connecteur optique.

La figure 192 résume les résultats de simulation en reportant les points identifiés comme critiques et qui pourraient contribuer à une déviation de l'axe optique.

Les simulations en trois dimensions menées avec le logiciel ANSYS et une approche "multiphysique" sur des sous-ensembles complets d'une tête optique ont permis d'identifier et de localiser les zones critiques.

Nous avons, dans le même temps, évalué le mode de défaillance rapporté à la perte de puissance optique. Cette dernière résulte d'un désalignement optique ou la rupture d'un élément conduisant le faisceau. Ces considérations nous amènent à dire que l'assemblage par tirs laser Nd : YAG induit une perte de puissance optique par relaxation de contrainte avec un mode de défaillance graduel ou rapide [36, 112, 130]. En revanche, lorsque la fibre casse, la perte de puissance optique est totale et soudaine [131]. La partie considérant la brasure a un degré de criticité moindre cependant il est important de vérifier la qualité de la brasure à la fabrication, à savoir quantifié le nombre de défauts.

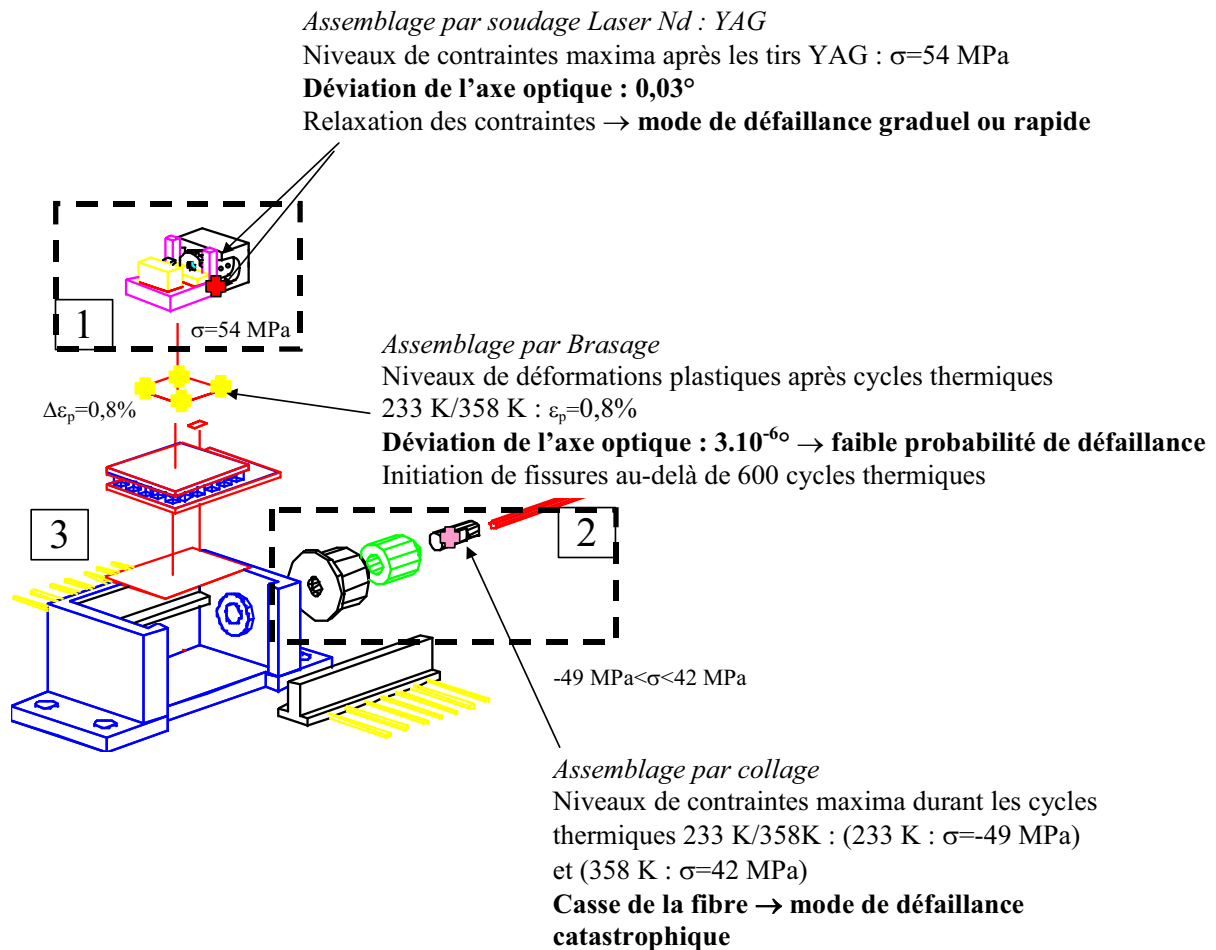


Figure 192 – Synthèse des zones critiques de la tête optique

Cet ensemble de résultats doit être maintenant appuyé par des tests d'expertises adaptés à la localisation de défauts sur un assemblage. Le champ d'action pour un tel dispositif est très réduit et s'oriente vers trois types d'analyse différente :

- ❑ Interférométrie optique permettant d'observer la qualité de surface et la déformation géométrique des échantillons,
- ❑ Microscopie acoustique permettant d'évaluer la qualité d'un joint de brasure et/ou localiser des défauts dans un assemblage,
- ❑ Microsections ciblées et observation réalisées par MEB.

La prochaine section permet de développer les analyses de vieillissement pour définir le mode de défaillance et les propositions d'analyses permettant d'assurer la localisation des zones critiques de l'assemblage au sein de la tête optique.

IV / ANALYSES DE VIEILLISSEMENTS ET PROPOSITIONS D'EXPERTISE

L'ensemble des simulations effectuées, dans la partie précédente, prend en compte un certain nombre d'hypothèses qu'il est nécessaire de vérifier par :

- des analyses de vieillissements,
- des tests d'expertises.

Les analyses de vieillissements vont permettre de vérifier que la contrainte environnementale critique correspond bien aux cycles thermiques rapides 233 K/358 K (-40°C/+85°C). Pour cela, nous comparerons les différents résultats de vieillissements effectués sur les têtes optiques en observant la dérive du couplage optique. Le critère de défaillance retenu pour cette technologie est 10 % de variation de la pente de la puissance optique : $\Delta E_{ta}(\%)$ et correspond aux standards de qualification pour des composants émissifs.

Ce travail étant réalisé, nous pourrions isoler les différents sous-ensembles mis en évidence dans la partie précédente afin de proposer des tests d'expertises visant à valider la liaison entre la perte de couplage optique et les zones identifiées comme critiques. Il est à noter que les tests d'expertises n'ont pu être menés que sur un nombre limité de têtes optiques car la validation expérimentale des résultats de simulation impose la réalisation de structures de test de diverses configurations et doit intégrer la variation des paramètres relatifs aux étapes de fabrication.

IV.1 / Analyse des tests de vieillissement

IV.1.a / Analyses électro-optiques des diodes laser DFB 1550 nm

Cette première partie de l'étude a permis de révéler que la diode laser reste intègre durant toute les phases de vieillissement : tests mécaniques, stockage en température (+85°C) et cycles thermiques (-40°C/+85°C). Ces différentes conditions de vieillissement seront détaillées dans les sections suivantes. Les mesures ont été réalisées à l'aide du banc d'analyses électro-optiques mis en place au laboratoire. La chute de puissance optique n'est donc pas à relier à une diminution de la puissance optique en sortie de "facet"³⁴.

IV.1.b / Résultats des tests mécaniques

Des tests mécaniques ont été menés notamment en vibration et chocs suivant les méthodes MIL-STD-883. Ce type de tests ne fait pas apparaître de défaillances. De multiples tests (herméticité, ESD, humidité, traction sur la fibre...) ont également été réalisés mais aucun ne montre de défaillances.

IV.1.c / Résultats des stockages en température

Le *stockage haute-température*, selon la méthode CEI-68-2-2, a été effectué pour une température de 358 K (+85°C) jusqu'à 10000 heures. Une très faible dérive du couplage optique est à souligner pour cette condition de vieillissement au-dessus de 5000h. On note toutefois une différence de comportement au niveau de la perte de couplage entre les différentes têtes optiques soulignant probablement une dispersion technologique.

³⁴ Facet : surface d'émission de la diode laser.

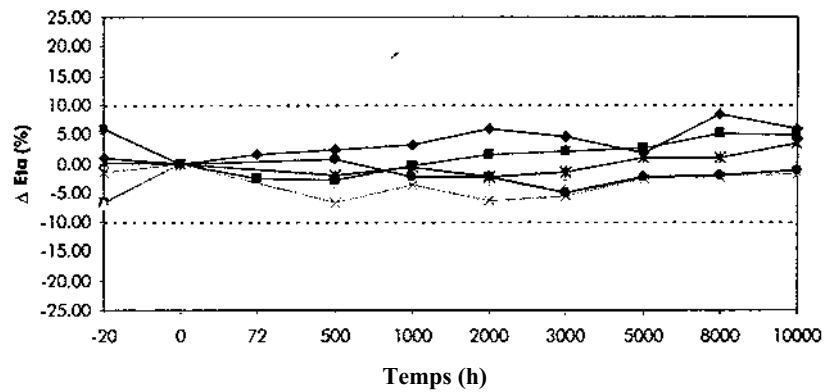


Figure 193 - Résultats des vieillissements pour des stockages en température à 358 K (+85°C)

Le stockage basse température 233 K (-40°C) jusqu'à 1000 heures ne fait pas apparaître de défaillances mais confirme également une dispersion technologique de la dérive de la puissance optique.

Les travaux de **M. Fukuda** et **M. Vanzi** ont montré que le stockage thermique était un facteur qui active la défaillance de la diode laser. Les résultats des tests en stockage thermique ont démontré une absence de défaillance de la tête optique et donc de la diode laser et sont en accord avec les analyses électro-optiques.

IV.1.d / Résultats des cycles thermiques- Impact sur la dérive de la puissance optique

Les cycles thermiques appliqués aux têtes optiques sont relatifs aux méthodes CEI-68-2-14 définies par les températures extrêmes de 233 K/358 K (-40°C/+85°C). Deux types de tests ont été réalisés :

- Des cycles thermiques lents (VLT) (2K/min, palier de 15 ou 30 minutes) qui n'ont révélé aucune défaillance.
- Des cycles thermiques rapides (VRT) (20 K/min, palier de 15 ou 30 minutes) révélant une dérive du couplage optique à partir de 50 cycles (figure 194) avec trois types de comportement relatifs à l'évolution du paramètre ΔE_{ta} (%) :
 - ☞ Une perte totale de la puissance optique sur un taux de défaillance τ_1 de pièces après 200 cycles thermiques correspond à un mode de défaillance catastrophique. On peut probablement rapprocher ce mode de défaillance d'une rupture de la transmission du faisceau optique. Cette hypothèse sera renforcée par une analyse par *microsection de la partie fibre (sous-ensemble n°2)*.
 - ☞ La perte de 30 à 40 % du couplage optique sur un nombre τ_2 ($\tau_2 = \tau_1$) de pièces après 500 cycles thermiques est à relier à une déviation de l'axe optique du système. Cette déviation peut être angulaire et proche de 0,02° ou axiale avec une amplitude de 40 μm. La déviation de l'axe optique peut être rapprocher à la qualité de la liaison entre la palette laser et le porte-lentille1. Pour valider l'hypothèse d'une déviation de l'axe optique sur le sous-ensemble n°1-a, la méthode *d'analyse de déviation angulaire doit être mise en œuvre sur le sous-ensemble n°1-a*. La qualité de la liaison entre la palette laser et le porte lentille1 est fortement dépendante de la qualité d'usinage des surfaces de contact. Afin de valider cette hypothèse, Il sera nécessaire d'effectuer une cartographie de *l'état de surface de contact de la palette laser d'une part et du porte-lentille1 d'autre part*. De plus, la déviation de l'axe optique ne peut être expliquée que par une relaxation de contrainte au sein du sous-ensemble n°1-a. La présence de défauts au sein des

volumes des tirs YAG a été mise en évidence mais nous devons la relier à une déviation de l'axe optique du sous-ensemble n°1.

- ☞ La chute de puissance optique comprise entre 5 et 20% est à relier à un mode de défaillance graduel. Cependant, on observe que la variation du paramètre ΔE_{ta} (%) est non-homogène. Cela montre que l'instabilité des têtes optiques est difficilement prévisible et ne peut dépendre que de leur fabrication. L'élément identifié comme instable au niveau de l'assemblage est le sous-ensemble n°1-a. Cet état est à relier à l'ordre élevé d'hyperstaticité de la liaison. Les analyses à effectuées sont identiques au cas précédent.

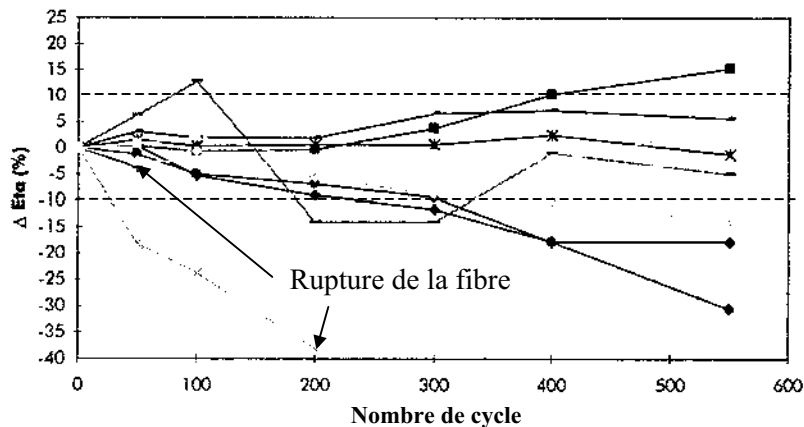


Figure 194 – Résultats des vieillissements pour des cycles VRT 233 K/358 K (-40°C/+85°C)

L'application de cycles thermiques 233 K/358 K (-40°C/+85°C) démontrent donc le caractère thermomécanique des dégradations des têtes optiques. Il en résulte que la dérive de la puissance optique observée sur les têtes est bien la conséquence d'une perte de couplage optique. Le comportement disparate des différentes têtes optiques indique qu'une zone de la structure présente une instabilité qui dépend fortement de l'assemblage et/ou de la fabrication des pièces élémentaires. Les résultats de simulations couplés aux analyses de défaillance révèlent deux zones critiques possibles :

- Une dérive du sous-système palette laser/porte-lentille1 est à relier à une perte du couplage optique graduelle ou rapide,
- Une dérive du sous-système fibre optique est à relier à une perte catastrophique du couplage optique.

Le tableau 38 présente les résultats des tests de vieillissements suivant le programme de qualification des têtes optiques 1550 nm. Nous avons ajouté les analyses de défaillances à entreprendre afin de localiser le ou les défauts au sein de la tête optique en accord avec les résultats de simulation et les tests de vieillissements.

Type de vieillissement	Critère de défaillance	Nombre de composants	Nombre de composants défaillants	Objectif de qualification	Proposition d'analyse de défaillance
Cycles thermiques -40°C/+70°C	$\Delta E_{ta} < 10\%$	10	0 après 500 cycles	1 ^{ère} campagne de qualification	
		11	0 après 500 cycles	2 nd campagne de qualification	
		4	0 après 500 cycles	Qualification de la lentille 2	
		7	0 après 100 cycles – n ₁ après 500 cycles	Qualification de nouveau module thermoélectrique Peltier	Analyse par microscopie acoustique de la liaison palette laser/Peltier
		10	0 après 100 cycles – n ₂ après 500 cycles (problème de la partie connecteur fibre)	Nouvelle technologie de brasage entre la palette laser et le Peltier	Microsection de la partie connecteur fibre
Cycles thermiques -40°C/+85°C	$\Delta E_{ta} < 10\%$	8	0 après 100 cycles – n ₃ après 500 cycles	1 ^{ère} campagne de qualification	Etude par microsection et interférométrie optique des soudures laser Nd : YAG pour chaque étape de fabrication
		7	n ₄ après 100 cycles – n ₅ après 500 cycles	2 nd campagne de qualification	

Tableau 38 – Plan d’analyses de vieillissement et proposition des analyses de défaillances (n₁ = n₂ ; n₅ > n₃ > n₁)

La partie suivante est dictée par la motivation de révéler l’assemblage critique et propose des solutions permettant d’assurer la détermination de cette zone en suivant les indications données dans la dernière colonne du tableau 38.

IV.2 / Résultats des analyses de défaillances

Les analyses de défaillances menées dans ce cadre ont utilisé trois techniques distinctes :

- Les analyses technologiques par microsection sur des zones prédéfinies : la difficulté d’effectuer une analyse par microscopie optique ou MEB est que la préparation du plan de coupe nécessite de supposer qu’il contient un défaut. Les simulations ont permis de définir les interfaces critiques déterminant le plan de microsection optimum pour l’observation d’éventuels défauts.
- Les analyses par microscopie acoustique : ce type d’analyses est adapté à l’évaluation de l’intégrité d’une interface entre deux matériaux. Elle est particulièrement performante pour des analyses de défaillances au sein d’une brasure. [49].
- Les analyses par le principe d’interférométrie optique : le principe est basé sur la microscopie optique avec un déplacement tous les 100 nm de l’objectif suivant l’axe d’observation pendant la mesure. Une saisie informatique des images est effectuée pour chaque position de l’objectif et regroupée sur une seule image. Le traitement final est exécuté de la même manière qu’un relevé topographique. Le résultat est une image (300 µm×280 µm de surface) en trois dimensions de l’objet observé.

IV.2.a / Analyses technologiques des sous-ensembles

▪ Sous-ensemble n°1-a

La figure 195 représente une image de la liaison palette laser/porte-lentille1 à l'aide du MEB. Deux points importants ressortent de cette image :

- ☞ La présence d'un défaut de contact sur environ 300 μm . Ce point indique que le contact entre la palette laser et le porte-lentille1 n'est pas parfait.
- ☞ La présence d'un décalage entre la colonnette et le porte-lentille1. Ce point indique que le tir YAG effectué sur cette partie n'est pas symétrique entre la colonnette et le porte-lentille. Il a été démontré dans la littérature que le soudage par laser Nd : YAG pour solidariser des pièces dont les bords ne sont pas dans le même plan sont optimum en les effectuant avec un angle compris entre 30° et 45° par rapport au plan de la liaison [113]. Dans notre cas les tirs laser Nd : YAG sont effectués dans le plan de la liaison. Les soudures ne sont donc pas obtenus de manière optimum dans ce cas.

Nous avons observé dans la partie III.1 que les soudures laser Nd : YAG n'étaient pas intégrées dans le volume et en surface. L'ensemble des résultats d'analyses de défaillances par microsection sur cette zone de la tête optique montre que la liaison entre la palette laser et le porte-lentille1 comporte des imperfections qui peuvent expliquer la relaxation des contraintes accumulées après les tirs Nd : YAG. Le plan d'expérience que nous avons bâti et que nous proposons dans la fin du document permet de démontrer ce point important.

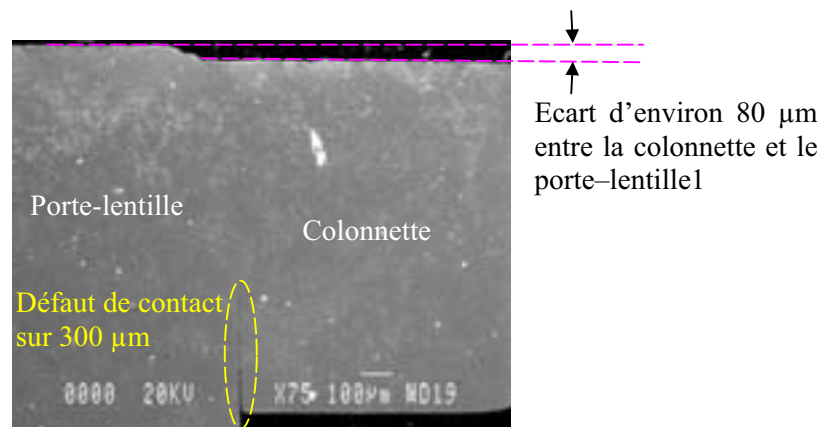


Figure 195 – Image MEB de la liaison palette laser/porte-lentille1

▪ Sous-ensemble n°1-b

Cette partie s'intéresse au joint de brasure Epsilon situé à l'interface palette laser/embase Peltier. Afin de simplifier les commentaires, nous considérerons que la palette laser est constituée d'une embase et de deux colonnettes.

La visualisation du joint de brasure par microscopie optique sur un plan de microsection défini par la figure 196 montre deux éléments qui sont :

- L'homogénéité du joint de brasure sur la surface de contact. Les images (a) et (b) de la figure 196 montrent que le joint est homogène sur la surface totale de l'embase de la palette laser. La conclusion finale est que le joint de brasure est exempt de défauts et permet donc de valider l'ensemble des résultats de simulations attachés au sous-ensemble n°1-b.
- La présence de défauts en dessous des colonnettes. L'image (c) de la figure 196 montre la présence de fissures au niveau du joint de brasure situé sous les colonnettes vers le bord

extérieur. Cet aspect montre que la présence des colonnettes affecte le joint de brasure. Leur présence introduit une discontinuité de surface de contact car cette dernière ne représente pas un figure géométrique de référence (carré, rectangle...). Une étude évaluant l'impact des colonnettes sur la phase de refusion et de refroidissement de la brasure est envisagée.

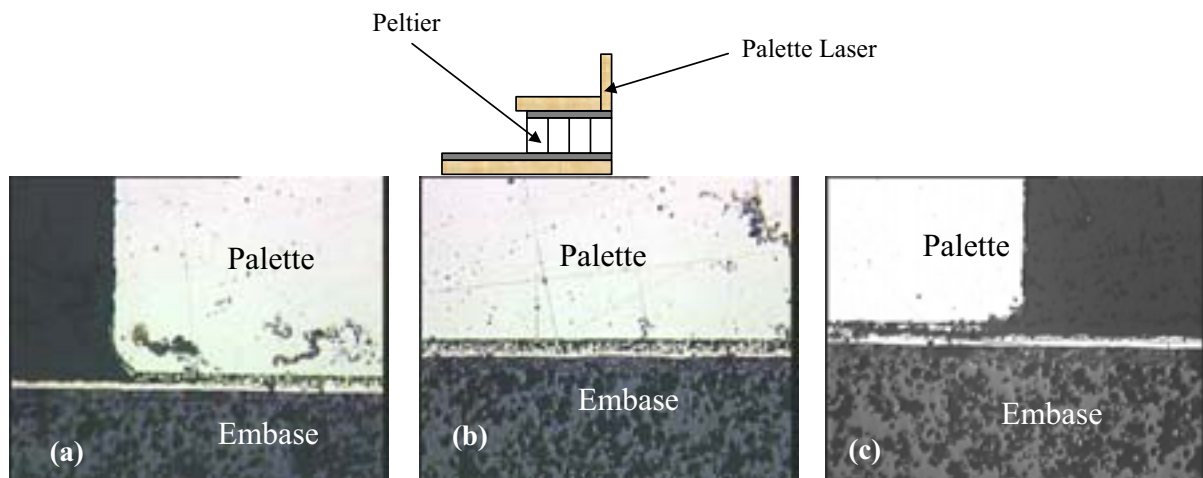


Figure 196 – Image au microscope optique de l'interface palette laser/embase Peltier après 500 cycles thermiques

▪ *Sous-ensemble n°2*

Nous avons isolé le sous-ensemble fibre optique/férule composant le sous-ensemble n°2. Après 500 cycles thermiques VRT 233K/358 (-40°C/+85°C), des analyses par microscope optique après microsection ont été effectuées afin d'obtenir la même vue que le modèle ANSYS (voir figure 183). Sur plusieurs échantillons, nous avons observé une fissure voire même une rupture au niveau de la sortie de la fibre nue. Pour des raisons de confidentialité, l'image représentant la rupture de la fibre optique ne peut être présentée dans ces travaux.

La cause possible de la rupture concilie deux aspects différents :

- ☞ La présence de fissures au niveau de la partie dénudée de la fibre avant vieillissement. Cet état est inhérent au procédé de mise en position de la fibre dans la férule
- ☞ La succession de traction compression au niveau de la sortie de gaine peut entraîner une rupture de la fibre optique. Cependant, la contrainte à la rupture sur le filament de la fibre (fibre dénudée) est d'environ 2,5 GPa [111]. La cassure de la fibre ne peut être expliquée que par une initiation de défaut lors du procédé de mise en place de la fibre dans la férule. La propagation de défauts induit par les cycles thermiques conduirait à une casse de la fibre. De plus, la fragilité de la fibre optique est souvent associée à sa sensibilité à l'humidité.

La rupture du filament de la fibre optique impose que la perte de puissance optique en sortie du module soit catastrophique. En observant les résultats de vieillissement, la rupture du filament est reliée au mode de dégradation catastrophique.

IV.2.b / Test par microscopie acoustique

Les tests mis en œuvre vont permettre d'observer la qualité de la brasure du sous-ensemble n°1-b qui a été étudiée dans cette partie. Pour cela nous avons isolé l'étape de fabrication comportant les éléments du modèle traité, c'est à dire la palette laser, la brasure et l'embase du Peltier. La sonde

ultrasonore utilisée est une sonde de focale 127 mm. Compte tenu de la fréquence d'analyse (25 MHz) et de l'épaisseur de la palette laser d (1,5 mm), le temps de vol théorique Δt entre l'écho de surface et l'écho de l'interface palette laser-module thermoélectrique est estimé à :

$$\Delta t = \frac{2d}{V_{\text{Kovar}}} = \frac{3.10^3}{4500} = 670 \text{ ns} \quad \text{E IV-1}$$

où $2d$ est la distance que parcourt l'onde acoustique, V_{Kovar} est la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans le Kovar.

L'écho de surface possède une largeur de 60 à 70 ns et est décorrélé de l'écho de l'interface considérée. La visualisation du côté palette laser est donc réalisable. Cependant, la présence des colonnettes ne permet pas d'effectuer une image ultrasonore sur toute la surface palette laser/module Peltier. Une solution possible serait d'effectuer la visualisation par la face arrière du thermorégulateur. La présence des cavités entre les éléments du module thermoélectrique donne une réponse d'amplitude élevée qui masque l'écho provenant de l'interface considérée. La discrimination de l'écho de l'interface palette laser/Peltier est plus difficile et ne nous permet pas d'envisager cette solution. La figure 197 représente le diagramme des échos correspondant à la focalisation sur l'interface palette laser-embase Peltier ainsi que la fenêtre de mesure entourant l'écho approprié pour une imagerie ultrasonore.



Figure 197 – Diagramme des échos correspondant à la focalisation sur l'interface palette laser/embase Peltier

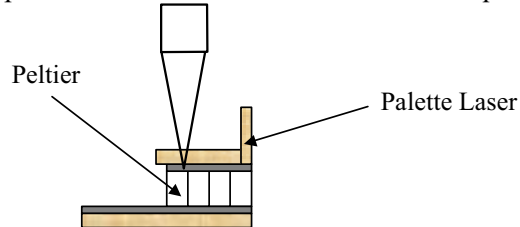
La solution adoptée est la visualisation des images ultrasonores par la surface de la palette laser. La cartographie a été réalisée avec un pas de $50 \mu\text{m}$ sur une surface de $4 \times 4 \text{ mm}^2$. L'échelle des intensités relatives de l'écho est représentée sur chaque figure avec un minimum à 0 (foncé) et un maximum à 70 (clair).

La figure 198 représente l'image ultrasonore de la brasure avant et après vieillissement. L'imagerie de l'interface palette laser/embase Peltier montre que le joint de brasure est homogène sur l'ensemble de la surface de contact avant et après vieillissement et pour les deux technologies. Cependant, des défauts de brasage localisés sur les bords de la brasure sont observés avant et après vieillissement. La propagation de ces défauts est extrêmement faible après 500 cycles thermiques.

La première conclusion permet de dire que le joint de brasure présente peut de défaut initialement et valide le calcul du nombre de cycles thermiques nécessaires pour l'initiation de fissures par fatigue. La loi de **Coffin-Manson** peut donc être appliquée au joint de brasure considéré, soit:

$$N = \frac{k}{(\Delta \varepsilon_p)^n}$$

La deuxième conclusion rend compte qu'après 500 cycles thermiques le joint de brasure est resté intègre et valide les simulations thermomécaniques conduisant à évaluer le nombre de cycles minimum avant défaillance à 600. Le joint de brasure répondant au critère des standards de qualification n'est, à priori, pas identifié comme étant une zone critique.



Avant vieillissement Epaisseur du joint de brasure 15 µm Après 500 cycles thermiques

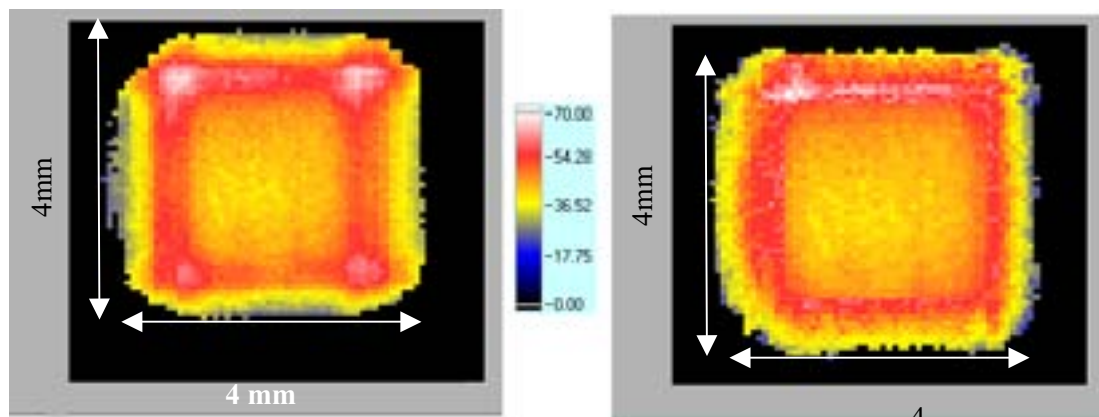


Figure 198 – Image ultrasonore du joint brasure localisé à l'interface palette laser/embase Peltier

IV.3 / Proposition d'un plan de tests expérimentaux complémentaires

Cette dernière partie rassemble dans le tableau 39 les tests d'expertises proposés en vue de déterminer la phase critique de l'assemblage : le soudage par tirs laser Nd : YAG entre la palette laser et le porte-lentille1. L'objectif de ce plan est de mettre en évidence le phénomène de relaxation de contraintes à partir d'une série de tests expérimentaux en tenant compte des procédés de fabrication

Le phénomène de relaxation des contraintes étant très difficile à confirmer de manière expérimentale, ce plan d'expertises a été établi en accord avec le fabricant [132]. Ce plan, objectif final du cahier des charges imposé par le fabricant et basé sur le développement de structures spécifiques de test, comporte de nombreuses phases impliquant des adaptations ou des variations des étapes de fabrication relativement longues à mettre en place. Pour cela, il a été nécessaire de considérer quatre lots de 5 sous-ensembles n°1-a. Chaque lot correspond à un déroulement de fabrication particulier développer dans le tableau 40 :

- ☞ Lot n°1 : déroulement normal de fabrication.
- ☞ Lot n°2 : on inclut l'étape de recuit haute température à 1200 K (+927°C) soit environ 2/3 de la température de fusion [115]. Ceci ne permet pas d'envisager une brasure de l'embase laser.
- ☞ Lot n°3 : permet de mesurer indirectement la déviation de l'axe optique. La mesure

par interférométrie optique permet une cartographie sur 280µm*300µm. La dimension de la palette laser ne permet pas d'observer la déviation de l'angle directement.

☞ Lot n°4 : lot de référence.

Sous-ensemble	Système d'analyse	Plan de manipulation	Conclusion
Sous-ensemble n°1-a	Interférométrie optique	Evaluation de l'état de surface de contact en palette laser et porte-lentille1	Etablir une liaison entre les défauts de fabrication des pièces élémentaires et la déviation de l'axe optique. Cette action permet de mettre en évidence le caractère hyperstatique de la liaison.
		Evaluation de la qualité des tirs laser Nd : YAG	
		Evaluation de la déformation après tirs laser Nd : YAG puis après cycles thermiques -40°C/+85°C	
Sous-ensemble n°1-a	Mesure de déviation de l'axe optique	Evaluation de la déviation de l'axe optique après tirs laser Nd : YAG puis après cycles thermiques -40°C/+85°C	Evaluer l'ordre de grandeur de la déviation de l'axe optique afin de valider la criticité de l'assemblage.

Tableau 39 – Plan d'expertise visant à déterminer la zone critique de la tête optique

Déroulement des travaux	Lot 1	Lot 2	Lot3	Lot4
Palette laser nue	Oui	Oui	Oui	Oui
Mesure Veeco (1)	Oui	Oui	Oui	Oui
brasure de l'embase laser ou du bloc de référence sur la palette	Oui	Non	Oui	Non
Mesure Veeco (3)	Oui	Non	Oui	Oui
Mise en pression de l'ensemble palette laser porte-lentille1	Oui	Oui	Oui	Non
Mesure Veeco (1, 3 et 5)	Oui	Oui	Oui	Oui
Tirs lasers YAG	Oui	Oui	Oui	Non
Mesure Veeco (2, 3,4 et 6)	Oui	Oui	Oui	Oui
Recuit haute température (1273 K/+1000°C)	Non	Oui	Non	Non
Mesure Veeco (2, 4,5 et 6)	Non	Oui	Non	Oui
Cycle thermique rapide (-40°C/+85°C-5°Cmin ⁻¹)	Oui	Oui	Oui	Non
Mesure Veeco (2,3,4,5 et 6)	Oui	Oui	Oui	Oui

Tableau 40 – Plan de mesure par interférométrie optique sur le sous-ensemble n°1-a

V / CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les zones critiques d'une tête optique 1550 nm par l'intermédiaire d'une expertise fine de la technologie et de simulations thermomécaniques par éléments finis. L'ensemble des résultats de simulation a porté sur trois sous-ensembles différents :

- Le sous-ensemble n°1-a : ce sous-ensemble traduit la liaison encastrement entre la palette laser et le porte-lentille. Cette dernière est réalisée au moyen de tirs laser Nd : YAG modélisés par une simulation électrique, thermique et mécanique dynamique. Il a été démontré que ce choix permettait de simplifier la modélisation de l'apport d'énergie localisé dans un volume restreint de soudure. Les résultats ont abouti à une déviation de l'axe optique de 0,03° avec des niveaux de contraintes de l'ordre de 54 MPa situés à la base de la colonnette. Ces contraintes sont le résultat d'une déformation plastique de la colonnette soumise à la force de maintien en contact de la palette laser et du porte-lentille. Il en ressort que le tir YAG inférieur (proche de la base de la colonnette) est le tir le plus critique. Ce sous-ensemble a donc été identifié comme le plus

critique pour la stabilité du couplage optique.

- Le sous-ensemble n°1-b : ce sous-ensemble est centré sur le report de la palette laser sur l'embase du module Peltier par une brasure Epsilon. Une simulation thermomécanique statique traduisant les cycles thermiques 233K/358K (-40°C/+85°C) a été réalisée sur ce sous-ensemble. Une étude de la plasticité du joint de brasure a montré que l'amplitude maximale des déformations plastiques accumulées (0,8%) peuvent induire une fatigue thermique responsable de l'initiation de fissures au sein de la brasure après 600 cycles thermiques. Ce sous-ensemble a été jugé comme peu lié à une déviation de l'axe optique.
- Le sous-ensemble n°2 : ce sous-ensemble représente la partie de connexion avec la fibre optique à la palette laser et au porte Lentille1. Une simulation thermomécanique statique traduisant les cycles thermiques 233 K / 358 K (-40°C/+85°C) a été réalisée sur ce sous-ensemble. L'accumulation des contraintes sur le filament de la fibre optique a été évaluée à 42 MPa à 358 K (+85°C) et -49 MPa à 233 K (-40°C). Cette succession de traction-compression ne peut expliquer seule la casse de la fibre dont la contrainte à la rupture est de 2,5 GPa. La présence de microfissures créées lors de la phase de dénudation de la fibre dans la férule peut alors accélérer le risque de rupture de la fibre à l'origine d'une mode de défaillance soudain et catastrophique (chute très brutale de la puissance optique).

L'analyse des vieillissements a montré que les cycles thermiques 233 K/358 K (-40°C/+85°C) constituent une contrainte environnementale critique pour une tête optique démontrant que l'origine de la défaillance est donc thermomécanique. Les analyses de défaillance ont confirmé la criticité du sous-ensemble n°2 relié à un mode de dégradation catastrophique. Pour le sous-ensemble n°1-a, nous avons montré que l'énergie déposée par les tirs laser Nd : YAG, proche de $2,5 \cdot 10^5$ W/cm², induit la présence de défauts volumiques et surfaciques au niveau des volumes de soudure pouvant fragiliser le contact crucial entre la palette laser et le porte-lentille1. L'hypothèse la plus probable pour expliquer la déviation progressive de l'axe optique observée sur 10% des têtes optiques a été de considérer le phénomène de relaxation des contraintes accumulées lors des tirs laser Nd : YAG accentué par la génération de défauts dans les zones soudées.

A la vue de l'ensemble de ces résultats, une campagne d'analyses de défaillance a été menée afin de valider expérimentalement les simulations. Elle a permis de démontrer la bonne adéquation avec les résultats obtenus sous ANSYS. De plus, le phénomène de relaxation des contraintes étant très difficile à confirmer de manière expérimentale, un plan d'expertises a été établi en accord avec le fabricant et a été présenté à la fin de ce document. Ce plan, objectif final du cahier des charges imposé par le fabricant et basé sur le développement de structures spécifiques de test, comporte de nombreuses phases impliquant des adaptations ou des variations des étapes de fabrication relativement longues à mettre en place. Ce dernier chapitre a également abouti à la génération d'un macromodèle tenant compte des différentes étapes de fabrication et des matériaux en présence avec comme objectif central de permettre au fabricant d'optimiser les règles de conception de nouvelles générations de têtes optiques robustes. Pour cette technologie de têtes optiques, nous proposons un certain nombre d'actions correctives :

- Réduire ou éliminer le caractère hyperstatique de la liaison palette laser/porte-lentille1 en réalisant cette dernière par trois points de soudure laser Nd : YAG au lieu de quatre.
- Rendre le sous-ensemble n°1-a le plus symétrique possible de révolution autour de l'axe optique afin de minimiser l'impact des tirs laser Nd : YAG sur la déviation de l'axe optique.
- Optimiser le guidage de la fibre optique dans la férule afin de réduire le nombre de défauts occasionnés pendant le positionnement de la fibre optique par collage.

Conclusion générale

Le sujet de ce mémoire porte sur le diagnostic de défaillance de composants et systèmes optoélectroniques émissifs pour applications de télécommunication.

Dans une première partie, un banc de caractérisations électro-optiques a été développé afin de relever les caractéristiques courant-tension, la puissance optique et le spectre optique d'un système optoélectronique émissif et d'effectuer une discrimination des dégradations entre la puce et l'assemblage. Une deuxième partie a permis de souligner l'intérêt des simulations thermomécaniques pour mettre en lumière les zones critiques d'un assemblage optoélectronique multi-procédés subissant une perte de couplage optique. Ce travail s'articule autour de quatre chapitres.

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté les technologies optoélectroniques en insistant plus particulièrement sur les systèmes émissifs IR pour applications de télécommunication. Nous avons recensé l'ensemble des modes de défaillance sur les systèmes optoélectroniques émissifs IR tant d'un point de vue composant qu'assemblage. Nous avons alors justifié l'étude de deux systèmes émissifs particuliers :

- Les diodes électroluminescentes dont la couche active est composée de InGaAs/GaAs, la longueur d'onde d'émission est centrée sur 935 nm et les applications courantes sont la détection de présence de produit,
- Les têtes optiques à diode laser basée sur une couche active InGaAsP/InP dont l'émission est centrée sur 1310 nm et les applications principales sont les transferts de données haut débit (640 Mbits/s) pour applications de télécommunication.

La difficulté majeure actuelle est de localiser la défaillance au sein d'un module optoélectronique et de caractériser la liaison entre la puce et l'alignement optique comprenant généralement des lentilles, des isolateurs et une fibre optique. Cette difficulté est justifiée par la complexité croissante des modules optoélectroniques nécessaire pour répondre aux exigences actuelles en matière de transfert de données. L'objectif majeur a été de développer un ensemble de mesures $I(V)$, $P(I)$ et $L(E)$ non-destructives et simples permettant de caractériser le composant dans son environnement final d'une part et une méthode d'analyse par des simulations physiques visant à localiser les zones critiques de l'assemblage d'autre part. Une approche "signature" basée sur un nombre de caractérisations relativement limitées et une connaissance des mécanismes de dégradation relatifs à la technologie à évaluer a donc été développée.

- Le second chapitre a eu pour objectif de justifier les choix des éléments constitutifs du banc de mesures électro-optiques conçu et réalisé au Laboratoire. Un rappel des principes physiques de l'interaction électron-photon, brique de base des structures photoniques, a permis de réunir les paramètres associés nécessaires à la caractérisation d'un composant de type diode électroluminescente et diode laser. A l'aide d'une recherche bibliographique, nous avons discriminé les paramètres dont la détermination s'effectue par des mesures statiques. Cette discrimination a donné naissance à deux points essentiels : *la construction de modèles électriques équivalents et le choix de systèmes de mesures basés sur l'évolution des courbes $I(V)$, $P(I)$ et $L(E)$ en fonction de la température*. La construction d'un modèle électrique équivalent utilise les paramètres suivants : résistance de fuite R_{sh} , courant de recombinaison I_r , courant de saturation I_s , facteur d'idéalité η , résistance série R_s et courant et tension de seuil I_{th} et V_{th} . Le modèle est construit à partir de cellules élémentaires composées de dipôles : résistances, diodes à jonction, et diodes Zener. L'agencement de ces dipôles a été guidé par une recherche bibliographique poussée relative à des technologies similaires de puces "nues".

Le banc de mesures électro-optiques dépendant de la température est constitué par :

- un système d'analyse de paramètres semiconducteurs Agilent-4145 de précision 10^{-12} A sur le

courant et 10^{-3} V sur la tension,

- un système de mesure de puissance optique avec une sphère intégrante de 4 pouces de diamètre LabSphere de précision 10^{-6} W sur un flux lumineux dans la bande 300-1800 nm,
- un monochromateur TRIAX de focale 320 mm dont la précision du spectre est de 10^{-2} nm sur la bande 300-1800 nm.

Ces éléments ont été choisis en s'appuyant sur les résultats des recherches bibliographiques sur l'ordre de grandeur des paramètres à mesurer. Ainsi l'Agilent 4145 offre la possibilité de caractériser les paramètres physiques relatifs à une jonction PN, la sphère intégrante permet une mesure de la puissance optique avec une sensibilité suffisante pour l'ensemble des composants électroluminescents émettant sur la bande 300 nm-1800 nm et le monochromateur TRIAX-320 est adapté pour caractériser le spectre de diodes laser multimodes de type Fabry-Pérot ou monomode de type DFB.

• Au travers des deux exemples d'analyses électro-optiques effectuées sur des diodes électroluminescentes et des diodes laser, *la vérification de la qualité et de la reproductibilité des mesures ainsi que l'extraction du modèle électrique équivalent associé ont été effectués.*

Dans un premier temps, nous avons caractérisé une technologie de diodes électroluminescentes dont la longueur d'onde d'émission est centrée sur 935 nm. Nous avons établi que le modèle de la DEL comporte une résistance série, une diode hétérojonction à base de InGaAs/GaAs traduisant les phénomènes de recombinaison et une diode homojonction traduisant les phénomènes de diffusion. L'analyse spectrale a permis de confirmer que la structure interne comportait une double hétérojonction.

Les résultats de vieillissements ont conduit à l'obtention de deux signatures de défaillance :

- une augmentation du courant de recombinaison d'environ 2 décades,
- une dérive de la résistance série.

La dérive de cette résistance comporte deux phases distinctes :

- une augmentation de 40 % après environ 800 heures de vieillissement
- une chute à 5% par rapport à sa valeur initiale après 1400 heures.

Une corrélation a été établie entre l'augmentation du courant de recombinaison et la perte de puissance optique, la cause de défaillance étant la diffusion de dopant dans la zone active mis en évidence par l'évolution de deux paramètres empiriques **a** et **b** reliés au phénomène de diffusion de dopants. L'évolution de la résistance série est essentiellement due à une dégradation du joint collé, par un adhésif conducteur chargé à l'argent, mais totalement décorrélée de la perte de puissance optique. Dans ce cas, la dégradation progressive de la colle sur les bords de la puce apparaît après 800 heures de vieillissement. Ce phénomène a été relié à l'augmentation de 40 % de la résistance série, et la présence de "pinholes" d'or au sein du joint après 1400 heures de vieillissement expliquant la diminution de la résistance série à 5% de la valeur initiale. Il apparaît que la contrainte environnementale critique est le courant d'alimentation. L'utilisation de contraintes échelonnées en courant s'étendant de 0, 110, 125 et 150 mA a permis de mettre *en évidence que la diffusion de dopants est activée par le courant alors que l'augmentation de la température au sein de la structure est plus particulièrement critique pour le joint collé.*

Dans un deuxième temps, nous avons caractérisé une technologie de têtes optiques Fabry Pérot émettant à 1310 nm pour des applications de télécommunication à 640 Mbits/s. Le modèle électrique équivalent retenu comporte une résistance série, une diode Zener traduisant l'effet laser, une diode hétérojonction correspondant aux phénomènes de recombinaisons, une diode homojonction caractérisant les phénomènes de diffusion, une diode tunnel en inverse modélisant finement les fuites de courant dans les zones latérales à la zone active et une résistance de fuite.

L'utilisation de la diode tunnel, souvent absente des modélisations déjà élaborées sur ces

technologies, permet de mieux prendre en compte les fuites de courant caractérisées à bas niveaux et à basse température pour cette technologie à partir de deux paramètres supplémentaires A_{TUN} et V_{dd} . Cette valeur du courant de fuite, très élevée (10^{-6} A) ne peut être expliquée que par un phénomène de conduction interne forcé induit par la jonction latérale à la zone active. Ce phénomène est justifié par le fait que les zones latérales sont fortement dopées (10^{19} cm⁻³) favorisant un effet tunnel mis en évidence à bas niveaux de courant.

L'étude des défaillances des têtes optiques a permis d'identifier quatre signatures de défaillance électro-optiques à partir de la prise en compte d'un critère de défaillance, défini par la norme **Telcordia GR-468 CORE**, relative à une diminution de 10 % de la puissance optique.

- La première signature est caractéristique de l'évolution du courant de seuil sans aucune modification de la courbe courant-tension. Cette signature est reliée à une défaillance de la cavité optique qui explique l'évolution du courant de seuil sans dérive de la courbe I(V).
 - La seconde signature est donnée par une augmentation d'environ une décade du courant de recombinaison. Cette dernière est corrélée à une présence de centres recombinants non-radiatifs au sein de la zone active.
 - La troisième signature de défaillance est plus difficile à caractériser par une analyse courant-tension classique. Les mesures sous polarisation inverse ont permis de lever certaines ambiguïtés. Nous avons notamment établi l'instabilité des zones latérales conduisant à une amplitude maximale de perte de puissance optique d'environ 15%, franchissant donc le critère de défaillance. La modélisation du courant de fuite par une diode tunnel a notamment permis de simuler l'évolution de ce dernier en fonction du temps de vieillissement permettant une meilleure discrimination sur les deux hypothèses de défaillance :
 - ☞ dégradation de la zone active,
 - ☞ dégradation des zones latérales à la zone active.
 - La quatrième signature est caractéristique d'une perte de couplage optique sans aucune variation significative des caractéristiques électriques. L'ensemble des méthodes de mesure, d'analyses de signatures et de modélisation ont convergé vers la même conclusion : la perte de puissance optique est à relier à un désalignement optique. Dans ce cas, les analyses électro-optiques ne sont pas suffisantes pour conclure sur l'origine de la dégradation probablement thermomécanique.
- Le dernier chapitre a donc eu pour objectif de révéler les zones critiques possibles d'une tête optique à diode laser 1550 nm DFB pour des applications de télécommunication à 2,5 Gbits/s. Les résultats de simulation ont permis d'identifier deux sous-ensembles critiques : l'assemblage palette laser/porte lentille 1 et la partie connecteur par fibre optique ("pigtail").

Dans le cas de l'assemblage palette laser/porte-lentille1, l'étape d'interconnexion des différents éléments, par des tirs laser Nd : YAG, est la phase identifiée comme la plus critique. Le degré d'hyperstaticité et l'asymétrie du sous-ensemble considéré autour de l'axe optique conduisent à renforcer sa criticité. *Les simulations ont été conduites de manière à s'approcher des conditions expérimentales d'un tir laser Nd : YAG.* Le très fort degré de non-linéarité de ce procédé de fabrication nous a conduit à effectuer quatre approximations majeures :

- à la température proche de la température de fusion, le Kovar se comporte thermomécaniquement comme un alliage tendre, avec une partie élastique et une partie plastique pour les courbes contrainte-déformation,
- la température limite au sein des volumes de soudures YAG a été fixée à 1400 K (+1127°C) au lieu de 1723 K (+1450°C) afin de réduire le degré de non-linéarité et de temps de simulation,
- les formes des pièces élémentaires ont été supposées parfaites d'un point de vue géométrique et ne permettent pas de traduire l'hyperstaticité du système,
- l'énergie du tir laser Nd : YAG a été simulée par un apport d'énergie thermoélectrique réduisant considérablement la complexité du modèle ainsi que les temps de calcul associés.

Le problème actuel des technologies optoélectroniques émissives IR pour des applications de télécommunication est essentiellement relié à la perte de couplage optique lors de l'application de cycles thermiques. Elle se caractérise par un déplacement angulaire évalué à $0,02^\circ$ et axial d'environ $1,4 \mu\text{m}$ correspondant à une perte de puissance optique de 10 %. Le très faible déplacement peut difficilement être mis en évidence par des méthodes d'analyses de défaillance conventionnelles mais peut être mis en lumière par des simulations thermomécaniques traduisant l'ensemble des contraintes appliquées au système considéré.

L'utilisation d'une approche originale sous ANSYS (approche "multiphysics") a permis de réaliser successivement des simulations mécaniques, thermiques et thermomécaniques sur le système palette laser/porte-lentille¹ démontrant que l'interconnexion des éléments par le procédé de soudage YAG est à l'origine de déformations résiduelles permanentes. La déformation engendrée par la force de pression, force de maintien exercée par le porte lentille sur la palette laser est alors figée par le tir YAG inférieur effectué à la base des colonnettes. Le résultat est la mise en évidence d'une déviation optique dont l'amplitude maximale obtenue par simulation est de $0,03^\circ$. Les simulations ont mis en évidence une contrainte maximale accumulée sur la base des colonnettes d'environ 60 MPa et une déformation maximale de la colonnette proche de $2 \mu\text{m}$ par rapport à l'embase. Une analyse technologique a montré que des défauts surfaciques et volumiques, cavités et fissures, sont induits par les tirs YAG dans le volume d'un joint soudé. Ces défauts peuvent alors engendrer une relaxation des contraintes accumulées après le tir en favorisant les dislocations et la propagation de défauts au sein de la zone fondue mais aussi des zones affectées thermiquement. Les cycles thermiques accélèrent alors la propagation de ces défauts dans le volume du tir et peuvent justifier la relaxation des contraintes de manière aléatoire dans le temps et dans l'espace responsable d'une perte de couplage au cours des cycles thermiques. Deux solutions sont donc proposées pour réduire ces défaillances :

- diminuer la puissance des tirs YAG avec une énergie déposée de l'ordre de $1,5 \cdot 10^5 \text{ J/cm}^2$ au maximum compte tenu des dimensions du joint permettant de souder les éléments à interconnecter,
- effectuer un recuit haute température à $+1000^\circ\text{C}$ ($2/3 T_{\text{max}}$) permettant de libérer les contraintes accumulées pendant le tir YAG; la durée du recuit étant proportionnelle au niveau des contraintes et aux matériaux en présence.

Concernant la partie fibre optique, les simulations ont été plus conventionnelles en modélisant des chargements en température traduisant les cycles thermiques $-40^\circ\text{C}/+85^\circ\text{C}$. Une caractérisation expérimentale mécanique de la colle de maintien de la fibre optique dans la fêrulle a été réalisée. L'objectif était de démontrer la présence d'une forte concentration de contraintes de traction-compression sur le cœur de la fibre optique dans le cône de fêrulle. Nous avons précisé le module des ces contraintes qui est d'environ 45 MPa en moyenne et dont l'orientation s'inverse entre 358 K ($+85^\circ\text{C}$) et 233 K (-40°C). Ces contraintes ne peuvent pas seules expliquer la rupture du filament dont la contrainte à la rupture est de 2,5 GPa. Cependant, ce niveau de contrainte est évalué en considérant un filament intègre. Les tests d'expertise et les analyses de vieillissement ont souligné que la rupture de la fibre optique est corrélée à la présence de défauts occasionnés par la phase d'assemblage et de dénudation.

Ce dernier chapitre a abouti à la génération d'un macromodèle tenant compte des différentes étapes de fabrication et des matériaux en présence avec comme objectif central de permettre au fabricant d'optimiser les règles de conception de nouvelles générations de têtes optiques. Les perspectives de notre travail portent sur l'évaluation d'une méthodologie pour l'extraction de données de fiabilité et l'optimisation de règles de conception visant à augmenter la robustesse des têtes optiques considérées. A plus long terme, notre démarche s'inscrit dans un cadre plus général s'articulant autour de quatre points essentiels :

- ❑ analyse critique détaillée des résultats des essais de vieillissement sur des lots représentatifs de nouvelles têtes optiques et de l'exploitation statistiques : règles de conception, conditions de soudage YAG, conditions exactes de test, chronologie des défaillances, ...
- ❑ détermination des distributions des paramètres d'entrée les plus représentatifs (données procédés) conduisant à calculer la distribution du paramètre de sortie (ex : couplage optique)
- ❑ proposition d'une méthodologie la plus adaptée à l'évaluation des résultats pour l'estimation du taux de défaillances et de la durée de vie des têtes optiques en fonction de la dérive des paramètres pertinents,
- ❑ construction de la fiabilité à partir de l'introduction de lois de dégradation intégrées dans le simulateur pour une évaluation de la durée de vie de la tête optique à partir de la connaissance des limites de contraintes et de déformations adaptées à la technologie considérée.

Annexes

Annexe A / Compléments de l'étude électro-optique

A.1. Polarisation inverse dans les composants III-V

La caractérisation d'un composant émissif peut être complétée par des mesures électriques inverses. Ces dernières sont réalisables avec un système de mesure ayant une limite inférieure de courant très faible. Dans le cas du HP-4145A, les mesures en inverse sont réalisables pour les diodes laser. En effet, le courant de fuite est supérieur à 1 nA dans le cas des composants que nous avons testés. La conduction de courant en polarisation inverse dans un composant est le fruit de nombreux phénomènes physiques. On peut classer ces derniers en deux classes : interne ou externe à la structure. Nous allons débiter par le mode de conduction interne – courant de génération.

A.1.1. Polarisation inverse – courant dans la jonction

Afin d'exprimer le courant dans la jonction PN, on évalue le taux de recombinaison. Lorsque le potentiel aux bornes d'une jonction est négatif, ce dernier s'exprime de la manière suivante :

$$r = -\frac{n_i}{2\tau_m} \quad \text{E -V-1}$$

où τ_m est la durée de vie moyenne des porteurs dans la zone de charge d'espace. Dans le cas d'une tension négative, le taux de recombinaison est négatif et se traduit par la génération de porteurs. On obtient donc le courant de génération :

$$J_g = -q \frac{n_i W}{2\tau_m} \quad \text{E -V-2}$$

La largeur W de la zone de déplétion est fonction du potentiel et s'exprime par : $k\sqrt{V}$. On retrouve le courant inverse de génération dans une jonction :

$$J_g = -q \frac{n_i k \sqrt{V}}{2\tau_m} \quad \text{E -V-3}$$

Le courant de génération n'est pas le seul élément du courant inverse dans une jonction. A ce dernier vient s'ajouter le courant de diffusion de porteur qui s'exprime de la façon suivante :

$$J = J_s (\exp(qV/kT) - 1) \quad \text{E -V-4}$$

Lorsque la tension est négative ($-V \gg kT/q$) l'expression du courant est proche de :

$$\mathbf{J} = -\mathbf{J}_s \quad \text{E -V-5}$$

La valeur totale du courant inverse dans une jonction est alors donnée par :

$$\mathbf{J} = -\mathbf{J}_s - q \frac{n_i k \sqrt{V}}{2\tau_m} \quad \text{E -V-6}$$

A.1.2. Courant inverse à l'extérieur de la jonction

Le courant inverse à l'extérieur de la jonction est principalement dû aux bords latéraux de la puce car ces derniers n'ont pas une résistivité infinie. Dans certain cas, on peut observer des courants de fuite de quelque microampères pour une polarisation inverse de 3 volts environ. La forme de la courbe $I(V)$ correspond à la somme des contributions de courant inverse dans la jonction avec le courant induit par les bords de la puce. La composante de courant interne à la jonction est extrêmement faible et masquée par le courant de fuite externe à la jonction. La caractéristique inverse permet de déterminer la valeur du courant de fuite en première approximation. La représentation $\text{Log } I(V)$ est souvent non-linéaire et il est difficile de déterminer le phénomène physique associé aux fuites de courant.

A.2. Constantes physiques – calculs annexes

Le chapitre I utilise des résultats de la physique du composant nécessitant un développement pour améliorer la compréhension.

A.2.1. Valeur de l'intégral I de l'élément de matrice $W_{n,k,n',k'}$

$W_{n,k,n',k'}$ est la représentation d'un élément de la matrice de l'**Hamiltonien** d'interaction optique couplant les états $|\Psi_{n,k}\rangle$ et $|\Psi_{n',k'}\rangle$, soit donc :

$$\begin{aligned} W_{n,k,n',k'} &= \langle \Psi_{n,k} | \mathbf{W} | \Psi_{n',k'} \rangle \\ W_{n,k,n',k'} &= -\frac{q\mathbf{E}}{V} \iiint_{\text{réseau}} \mathbf{u}_{n',k'}^*(\mathbf{r}) e^{ik'\mathbf{r}} \mathbf{r} e^{-ik_{op}\mathbf{r}} \mathbf{u}_{n,k}(\mathbf{r}) e^{ik\mathbf{r}} d^3\mathbf{r} \end{aligned} \quad \text{E -V-7}$$

Les fonctions $\mathbf{u}_k(\mathbf{r})$ présentent la périodicité du cristal :

$$\mathbf{u}_k(\mathbf{r}) = \mathbf{u}_k(\mathbf{r} + \mathbf{r}_i) \quad \text{E -V-8}$$

La figure 199 représente graphiquement la fonction de Bloch-Fouquet. On remarque que la fonction d'onde atomique $\mathbf{u}_k(\mathbf{r})$ est modulée par la fonction $\exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r})$. La variation de la fonction $\exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r})$ est beaucoup plus lente que la fonction d'onde atomique.

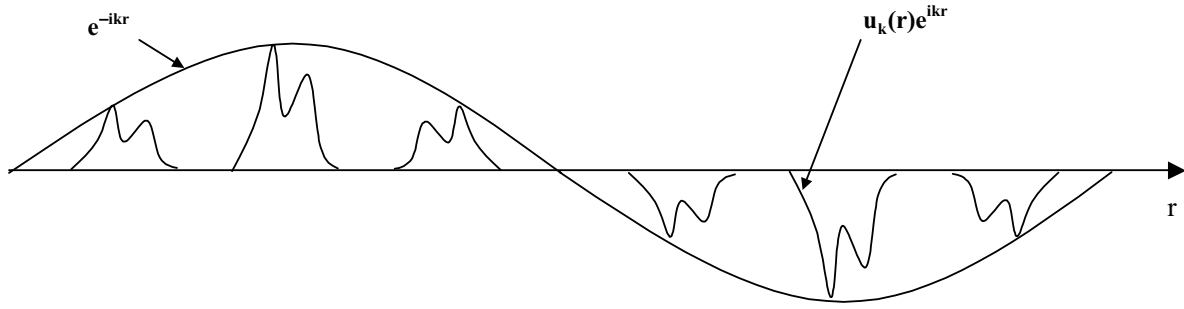


Figure 199 – Représentation des fonctions de Bloch-Fouquet

On peut donc décomposer l'intégrale de l'équation E -V-7 de la manière suivante :

$$W_{n,k,n',k'} = -\frac{qE}{V} \sum_j \exp(i(k'-k_{op} - k)) \iint_{\text{cellule } j} u_{n',k'}^*(r) r u_{n,k}(r) d^3r \quad \text{E -V-9}$$

On définit l'intégrale I utilisée dans le chapitre I par :

$$I = \iint_{\text{cellule } j} u_{n',k'}^*(\mathbf{R})(\mathbf{R} + \mathbf{r}_i) u_{n,k}(\mathbf{R}) d^3\mathbf{R} \quad \text{E -V-10}$$

où \mathbf{R} décrit la cellule élémentaire autour de 0 et $u_{n',k'}^*$ est le conjugué de $u_{n',k'}$. Le terme intégrale en \mathbf{r}_i s'élimine puisque les fonctions de Bloch sont orthonormales entre elles pour $\mathbf{k} \neq \mathbf{k}'$. L'intégrale I se simplifie et elle est indépendante de la cellule sur laquelle on calcule l'intégrale :

$$I = \iint_{\text{cellule } j} u_{n',k'}^*(\mathbf{R}) \mathbf{R} u_{n,k}(\mathbf{R}) d^3\mathbf{R} \quad \text{E -V-11}$$

A.2.2. Coefficient de recombinaison bimoléculaire

La formule de $R_{\text{spont}}(h\nu)$ exprime le taux de transition optique (en $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$) en fonction de l'énergie des photons pour deux distributions de porteurs hors équilibre, décrites par deux quasi-niveaux de Fermi. Nous cherchons maintenant le taux global de recombinaisons radiatives pour toutes les énergies de photons, c'est à dire l'intégrale de l'expression de $R_{\text{spont}}(h\nu)$:

$$R_{\text{spont}} = \frac{1}{\tau_R} \int_{E_g}^{\infty} \rho_j(h\nu) f_c(E_c(h\nu)) (1 - f_v(E_v(h\nu))) dh\nu \quad \text{E -V-12}$$

où le produit des deux distributions de **Fermi-Dirac** est donné par (E II-31 et E II-32) soit :

$$R_{\text{spont}} = \frac{e^{(E_{Fc} - E_{Fv})/kT}}{\tau_R} \int_{E_g}^{\infty} \rho_j(h\nu) e^{-h\nu/kT} dh\nu \quad \text{E -V-13}$$

Nous utilisons maintenant l'expression de la densité d'états joints (E II-30) d'où :

$$R_{\text{spon}} = \frac{e^{(E_{FC} - E_{FV} - E_G)/kT}}{\tau_R} \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_r}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_0^\infty (h\nu - E_G)^{1/2} e^{-\frac{h\nu - E_G}{kT}} d h\nu$$

$$R_{\text{spon}} = \frac{e^{(E_{FC} - E_{FV} - E_G)/kT}}{\tau_R} \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_r}{\hbar^2} kT \right)^{3/2} \int_0^\infty u^{1/2} e^{-u} du \quad \text{E -V-14}$$

$$u = \frac{h\nu - E_G}{kT}$$

Cette équation se simplifie en reconnaissant l'intégrale paramétrée en u qui vaut $\pi^2/2$ soit donc :

$$R_{\text{spon}} = \frac{e^{(E_{FC} - E_{FV} - E_G)/kT}}{\tau_R} \frac{1}{4} \left(\frac{2m_r}{\hbar^2} kT \right)^{3/2} \quad \text{E -V-15}$$

On peut simplifier le résultat en le donnant en fonction des densités effectives d'état dans la bande de conduction N_c et dans la bande de valence N_v :

$$R_{\text{spon}} = \frac{1}{\tau_R} \frac{N_j}{N_c N_v} np$$

$$R_{\text{spon}} = Bnp \quad \text{E -V-16}$$

avec

N_j Densité effective d'état
B Coefficient de recombinaisons bimoléculaires

Le tableau 41 donne la valeur du coefficient de recombinaison bimoléculaire pour différents matériaux.

Matériau	B(cm3.s ⁻¹)
GaAs	7,2.10 ⁻¹⁰
GaSb	2,4.10 ⁻¹⁰
InP	1,3.10 ⁻⁹
InAs	8,5.10 ⁻¹¹
InSb	4,6.10 ⁻¹¹

Tableau 41 – Valeurs des coefficients de recombinaison bimoléculaire pour différents matériaux (d'après [11])

Annexe B / Simulation thermoélectrique pour les DELs 935 nm

Le phénomène de diffusion de dopant mis en évidence dans le chapitre III dans l'étude des diodes électroluminescentes est principalement relié à la température de la puce pendant le vieillissement. Cette partie permet donc de déterminer la température de la puce en considérant les conditions de vieillissement. Pour cela, des simulations ANSYS comprenant des résultats thermiques et électriques ont été réalisées.

B.1. Modélisation électrique

La caractéristique linéaire I(V) permet de déterminer le comportement de la puce. Pour des courants supérieurs au courant de seuil, le comportement électrique de la DEL est ohmique. La valeur de la résistance est proche de 2,3 ohms pour un courant d'alimentation de 100 mA. L'analyse MEB nous a permis de déterminer le volume de la puce. Nous avons alors évalué la résistivité du composant "puce nue" à 0,96 mΩ.m.

Afin de simplifier le modèle, nous avons émis l'hypothèse que la résistivité des matériaux entourant le composant était nulle. La conversion d'énergie électrothermique se situe essentiellement dans la puce pour deux raisons :

- ❑ pour une conduction électrique la puce est l'élément le plus résistif et transforme une partie de l'énergie électrique en photons et l'autre partie en phonons,
- ❑ le rendement de l'émission est inférieur à 5%, on peut donc dire que l'énergie diffusée par les phonons est quasiment égale à l'énergie électrique.

Afin de déterminer la température de la puce, nous avons donc réalisé une simulation thermoélectrique dont les résultats sont exposés dans la prochaine section.

B.2. Modélisation thermoélectrique ANSYS

Cette section permet de déterminer la température de la puce dans son ensemble. Pour cela nous avons émis un certain nombre d'hypothèse :

- ❑ L'énergie électrique produit essentiellement de l'énergie calorifique au niveau de la puce. Nous avons donc négligé l'élévation de température induite dans les conducteurs métalliques par le courant électrique.
- ❑ Afin de simplifier les simulations, nous avons supposé la puce comme ayant une résistivité de 0,96 mΩ alors que les autres matériaux ont une résistivité quasiment nulle.

Nous avons considéré un modèle ANSYS permettant de traduire la géométrie de la DEL. La figure 200 présente la géométrie du modèle avec les différentes contraintes appliquées.

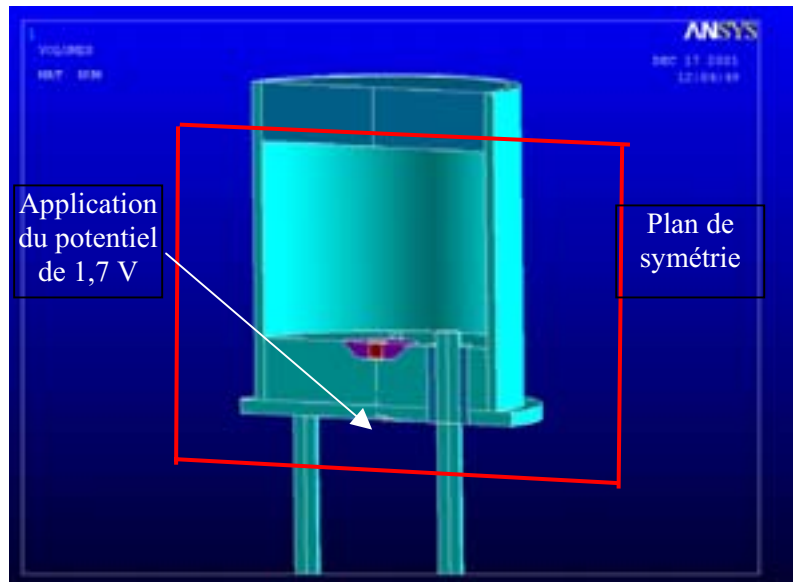


Figure 200 – Définition du volume de la DEL 935 nm

La figure 201 représente le maillage de l'ensemble.

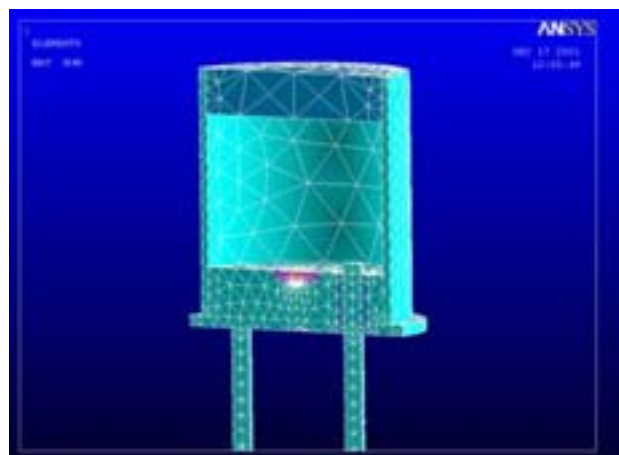


Figure 201 – Définition du maillage de l'ensemble

La simulation effectuée a été réalisée en statique afin d'évaluer la température de la puce en régime permanent. Nous avons imposé une tension de 1,7 V, correspondant à un courant de 100 mA, sur la surface supérieure de la puce et un potentiel de 0 V sur la surface inférieure de la puce. Nous avons effectué les simulations pour deux températures extérieures : 300 K (+27°C) et 398 K (+125°C).

La figure 202 représente la cartographie de température de la géométrie de la DEL pour une tension de 1,7V et une température extérieure de 300 K (+27°C). On observe que la température de la puce est de 452 K (+179 °C). On obtient une bonne corrélation avec la température de la zone active évaluée à partir du spectre optique (450 K/+177°C).

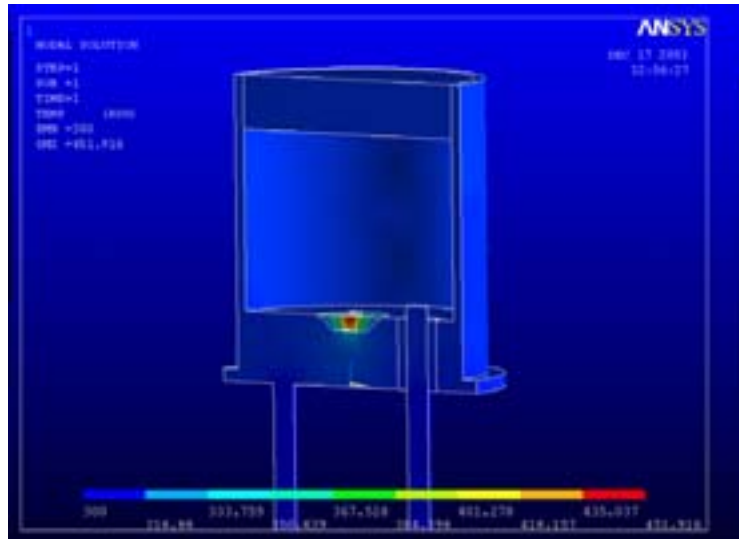


Figure 202 – Cartographie des températures pour une condition de température extérieure à 300 K (+27°C)

La figure 203 représente la cartographie en température de la géométrie de la DEL pour une tension de 1,7V et une température extérieure de 300 K (+27°C). On observe que la température de la puce est de 550 K (+277°C). Cette température est en accord avec la température de diffusions de dopants proche à 550 K (+277°C) pour un coefficient $D= 10^{-23} \text{ cm}^2.\text{s}$.

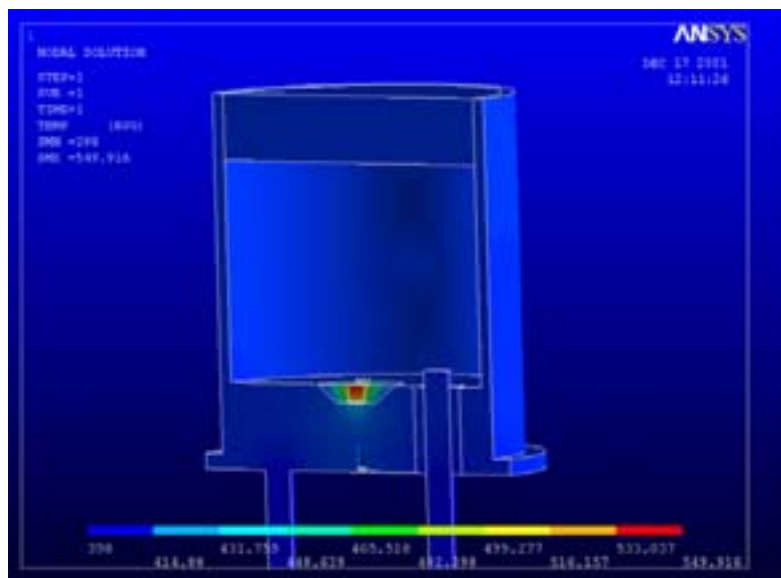


Figure 203 - Cartographie des températures pour une condition de température extérieure à 398 K (+125°C)

Annexe C / Compléments des simulations ANSYS

C.1. Systèmes mécaniques – notion de liaison

Dans cette partie, nous allons préciser les termes spécifiques isostatique et hyperstatique. Ces notions sont fondamentales pour comprendre le problème de la liaison palette laser / porte-lentille1 exposé dans le chapitre IV.

C.1.1. Notion de liaison

Une liaison mécanique entre deux ou plusieurs pièces détermine le nombre de degré de liberté entre ces pièces mécaniques. Pour simplifier la présentation, nous traiterons du cas de deux pièces. Un système mécanique contient au plus 6 degrés de liberté : 3 rotations et 3 translations.

Notre étude va traiter d'un cas théorique répondant à un certain nombre d'hypothèses :

- ❑ les pièces sont modélisées par des solides indéformables,
- ❑ les liaisons sont parfaites (sans frottement),
- ❑ les contacts sont bilatéraux,
- ❑ les masses sont négligées.

Ces différentes hypothèses s'appliquent au système palette laser / porte-lentille1 d'un point de vue liaison mécanique seulement. Nous ne considérons pas les tirs laser Nd : YAG qui prennent en considération des propriétés thermomécaniques.

Le système est composé de deux pièces et la liaison entre ces deux pièces possède deux torseurs mécaniques différents.

Dans un premier temps, on considère le torseur des efforts transmissibles par la liaison entre les deux pièces.

$$\left\{ \mathcal{F}_{\text{pièce1 / pièce2}} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \mathbf{X}_s, \mathbf{Y}_s, \mathbf{Z}_s \\ \mathbf{L}_s, \mathbf{M}_s, \mathbf{N}_s \end{matrix} \right\} \quad \text{E -V-17}$$

Les éléments \mathbf{X}_s , \mathbf{Y}_s , \mathbf{Z}_s , \mathbf{L}_s , \mathbf{M}_s et \mathbf{N}_s sont des inconnues statiques introduites par la liaison. Le nombre d'inconnues statiques n_s sera inférieures ou égales à 6.

Considérons, à présent, le torseur cinématique de la liaison traduisant la distribution des vitesses de la pièce 1 par rapport à la pièce 2.

$$\left\{ \mathbf{V}_{\text{pièce1 / pièce2}} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \alpha_c, \beta_c, \gamma_c \\ \mathbf{u}_c, \mathbf{v}_c, \mathbf{w}_c \end{matrix} \right\} \quad \text{E -V-18}$$

Les éléments α_s , β_s , γ_s , \mathbf{u}_s , \mathbf{v}_s et \mathbf{w}_s sont les inconnues cinématiques introduites par la liaison. Le nombre d'inconnues cinématiques n_c est égal au degré de liberté de la liaison.

Dans le cas où la liaison est parfaite, le système répond au critère suivant :

$$\text{Nombre d'inconnues statiques} + \text{nombre d'inconnues cinématiques} = 6 \quad \text{E -V-19}$$

Considérons un système composé de deux pièces mécanique indépendantes. Généralement le nombre de liaisons entre ces deux pièces est supérieur à 2. Nous allons déterminer dans quelles

mesures le système considéré est isostatique ou hyperstatatique. Nous débuterons, tout d'abord, par la définition d'un système isostatique.

C.1.2. Système isostatique

Dans cette section, nous gardons l'hypothèse d'un système contenant deux pièces. On considère que ce dernier possède i liaisons en parallèles. Nous considérons que chacune des liaisons ne sont pas équivalentes, c'est à dire que les torseurs statiques et cinématiques ne sont pas identiques. Nous pouvons déterminer le nombre total d'inconnues statiques :

$$N_s = \sum_i n_{si} \quad \text{E -V-20}$$

On observe que le nombre d'inconnues statiques apportées par l'ensemble des liaisons peut être supérieur à 6.

Dans le cas des inconnues dynamiques, on trouve :

$$N_c = \sum_i n_{ci} \quad \text{E -V-21}$$

En considérant le système dans son ensemble, le nombre E_s d'équations statiques apportées est de 6. Pour qu'un système soit isostatique il est nécessaire que le nombre d'inconnues statiques N_s soit inférieur ou égale à 6. Dans ce cas, chaque élément est défini pour résoudre le système et permet de donner des tolérances de coaxialité, de perpendicularité, de planéité, de rugosité... Dans le cas contraire, le système est considéré comme hyperstatatique.

C.1.3. Système hyperstatatique

Pour cette partie, nous devons considérer un système général constitué de plus de deux pièces. Un système hyperstatatique est un système contenant des liaisons parallèles dont la somme des inconnues statiques est supérieur à 6. On définit le degré d'hyperstatisme par la relation suivante :

$$h = N_s - 6 \quad \text{E -V-22}$$

On définit aussi le degré de mobilité du système mécanique considéré. Nous avons deux types de degré de mobilité :

- Degré théorique de mobilité : $\delta_{th} = 6(nbdepièce - 1) - N_s$,
- Degré de mobilité vrai : $\delta_v = 6 - R_s$

où R_s représente le nombre de relations statiques. On en déduit le degré d'hyperstatisme par la relation :

$$h = \delta_v - \delta_{th} \quad \text{E -V-23}$$

Afin de représenter les différentes considérations évoquées jusqu'ici, nous allons donner un exemple simple d'un système hyperstatatique. Considérons un axe de moteur asynchrone monté à l'aide de deux roulements à billes sur le stator fixe par rapport au sol. Le montage des roulements est tel que l'on a deux liaisons pivots. Les roulements sont des pièces à part entière et ils sont en liaison rotule avec le stator du moteur. On peut représenter ce cas par le schéma suivant :

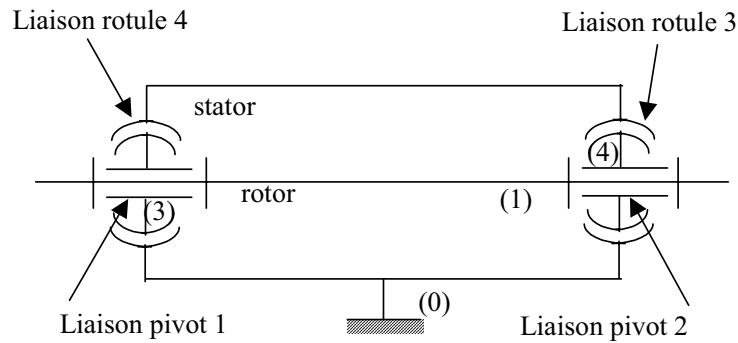


Figure 204 – Graphe de liaison d'un moteur asynchrone

Nous avons quatre liaisons élémentaires :

- ☞ liaison pivot n°1 : $n_{s1} = 5$,
- ☞ liaison pivot n°2 : $n_{s2} = 5$,
- ☞ liaison rotule n°3 : $n_{s3} = 3$,
- ☞ liaison rotule n°4 : $n_{s4} = 3$.

Le système comporte des mobilités internes. En effet, les roulements peuvent tourner autour de leur axe car l'ajustement est glissant. Dans ce cas, le degré de mobilité vrai change et prend en compte les degrés de mobilité interne : $\delta_v = \delta_{vu} + \delta_i$

où δ_{vu} est le degré de mobilité utile et δ_i est le degré de mobilité interne. On détermine alors le degré d'hyperstatisme du système par :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{h} &= \delta_v - \delta_{th} \\
 \delta_v &= \delta_{vu} + \delta_i = 3 \\
 \delta_{th} &= 6(4 - 1) - 16 = 2 \\
 \mathbf{h} &= 3 - 2 = 1
 \end{aligned}
 \tag{E -V-24}$$

On trouve finalement que le système est hyperstatique d'ordre 1. Afin de résoudre le problème on monte les roulements de manière à obtenir une liaison pivot pour L1 et une liaison pivot glissant pour L2. Les liaisons définies par les roulements dépendent du type de roulement utilisé. Dans le cas d'un moteur asynchrone, les roulements utilisés sont des roulements à billes équivalent à une liaison rotule.

C.2. Etude thermique des tirs laser Nd : YAG

Cette deuxième partie permet de développer les aspects de conduction thermique pendant un tir YAG au sein du sous-ensemble palette laser/ porte lentille, utilisé au chapitre IV. Nous démontrons, en particulier, que les extrémités de la palette laser et du porte lentille restent à la même température.

C.2.1. Etude de la répartition thermique au sein de la structure palette laser – porte-lentille1

Le calcul présenté ci-dessous permet de quantifier et de comparer la constante de temps thermique de diffusion après l'impulsion du tir laser Nd : YAG. Dans le cas où la différence est de plusieurs décades, nous pourrions considérer que l'approximation d'un échauffement local est justifiée.

Cette étude nécessite de prendre en compte la constante de temps thermique de diffusion

associée au volume de la palette laser définie par :

$$\tau_{th} = R_{th} \times C_{th} = \left(\frac{e}{\sigma_{th} S} \right) \times MC_p$$

Considérons, tout d'abord, un parallélépipède représentant les colonnes de la palette laser (lieu géométrique de résistance thermique la plus importante). Dans la figure 205, on détermine $S1 = 0,9 \times 1,1 = 0,99 \text{ mm}^2$ et $e1 = 3,365 \text{ mm}$, paramètres nécessaires au calcul de τ_{th} . La constante de temps thermique de diffusion est évalué à **2,417s** pour le Kovar. Enfin prenons en compte la partie de l'embase de la palette $S2 = 1,47 \times 3 = 4,41 \text{ mm}^2$ et $e2 = 6 \text{ mm}$, on trouve une constante de temps de **7,637s**.

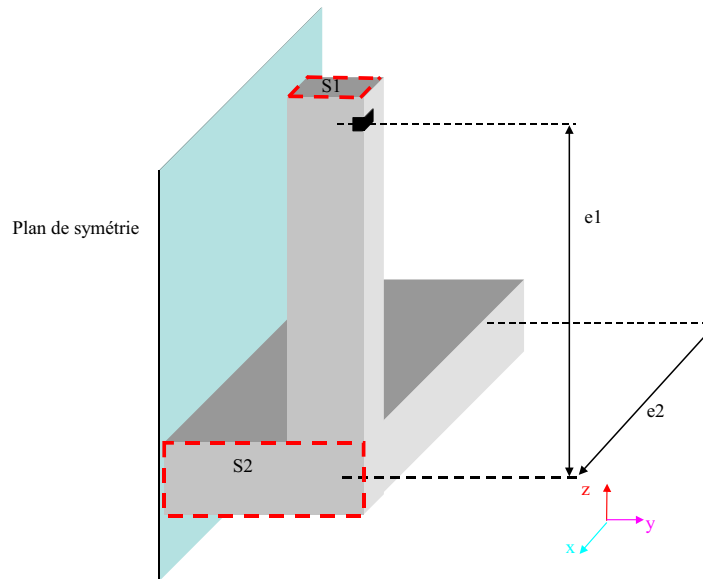


Figure 205– Définition des volumes pris en compte pour le calcul de la constante de temps thermique

D'autre part, on sait que l'impulsion laser, permettant le tir, est définie de la manière suivante (figure 206) :

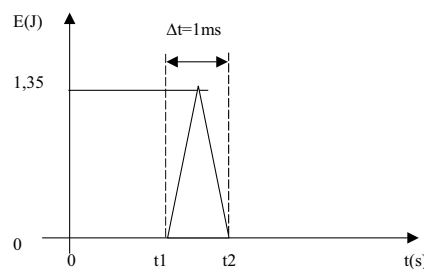


Figure 206– Définition temporelle de l'impulsion laser appliquée pour un tir YAG

La constante de temps thermique du système palette laser/porte lentille est d'environ **7s** et donc très supérieure à la durée de l'impulsion laser. On peut donc considérer que la température s'élève très rapidement dans le volume de soudure du tir laser Nd : YAG. L'énergie accumulée dans ce volume est suffisamment importante pour qu'au sein de ce dernier la température de fusion soit atteinte. Cependant, le volume de l'ensemble palette laser/porte lentille est beaucoup plus important que le

volume de soudure. Au final, la température du sous-ensemble palette laser/porte lentille est proche de la température ambiante. Le gradient de température est de quelques degrés et permet de considérer que le retour à l'équilibre est très long devant l'impulsion du tir. Ceci nous amène à dire que le système est adiabatique, c'est à dire que le système n'échange pas d'énergie avec le milieu extérieur.

C.3. Déformation élastique induite par la force de pression

Cette dernière partie développe un calcul analytique, utilisé au chapitre IV, de la déformation de la colonnette soumise à la force de pression avant les tirs YAG.

C.3.1. Résultats des simulations effectuées sous ANSYS

Nous avons effectué une simulation modélisant uniquement la palette laser (figure 207). Le système est soumis à la force de pression $F = 5\text{N}$ permettant le maintien en contact de la palette laser et du porte-lentille¹. Le contact entre la palette laser et le porte-lentille¹ est constitué de quatre surfaces identiques dont la force élémentaire est : $F_e = 1,25\text{N}$.

La figure 207 représente le schéma de la palette laser avec la définition des efforts et maintiens extérieurs. On note F_1 la force élémentaire supérieure et F_2 la force élémentaire inférieure dont la norme est égale à 1,25 N.

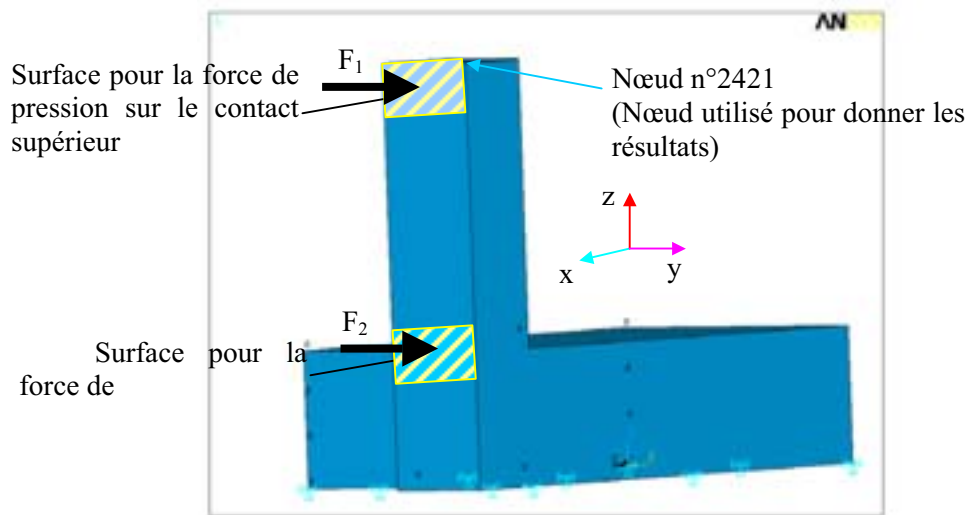


Figure 207 – Visualisation des conditions de simulation en régime élastique

n°step	Température	Pression	Déplacement
1	298,15 K		Aucun déplacement de la base de la palette
2	298,15 K	1,25 N \Leftrightarrow $P_e = 1,42\text{ MPa}$	
3	298,15 K		

Tableau 42 – Conditions de simulation

Nous allons donner les résultats de simulation sous forme d'une courbe, représentant le déplacement d'un point situé près de la ligne moyenne de la colonnette (Nœud n°2421).

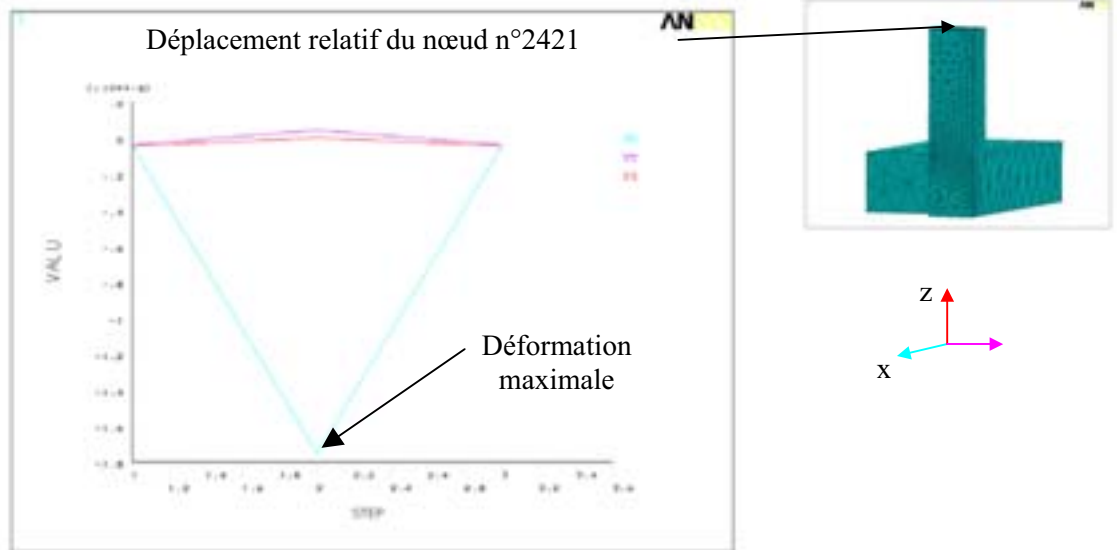


Figure 208 – Déplacement du nœud n°2421 défini en Figure 207

On observe que le système revient à sa position d'origine et que la valeur absolue de la déformation élastique est proche de 1,8 μm .

C.3.2. Vérification théorique par une approche RDM : calcul de la déformation maximale

Considérons une colonnette de la palette laser. Nous pouvons faire l'étude théorique des déformations de cet élément lorsqu'il est soumis à deux forces.

Énumérons les conditions mécaniques appliquées à la colonnette :

- *La liaison encastrement avec l'embase de la palette laser : l'ensemble forme une seule et même pièce.*
- *La force de pression appliquée sur la colonnette : on considère que les contacts sont parfaits et identiques en chaque point. La force de pression est donc divisée en deux pour chaque colonnette puis encore en deux ($F/4$) pour chaque point d'appuis.*
- *On néglige l'effet du poids sur le système.*

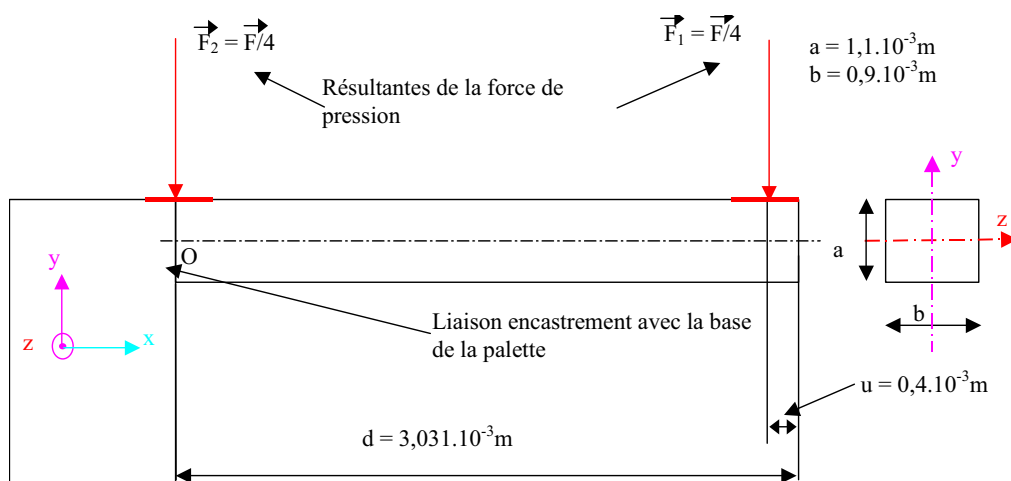


Figure 209 – Représentation schématique de la colonnette avec les différentes conditions mécanique

On peut calculer les contraintes induites dans le plan (Ox, Oy) :

$$\sigma = -\frac{\|\vec{M}_{F/O}\|}{I_{GZ}} \cdot y$$

Nous allons évaluer les différents facteurs de l'expression précédente en donnant, leur expression détaillée et leur valeur présentées dans le tableau 43.

Nom	Expression littérale	Expression numérique
y	y	-b/2 < y < b/2
I _{GZ}	$\iint y^2 \cdot dS = \int_{-b/2}^{b/2} y^2 \cdot dy \cdot \int_{-a/2}^{a/2} dz = \frac{b^3 \cdot a}{12}$	98,825.10 ⁻¹⁵ m ⁴
$\ \vec{M}_{F/O}\ $	$\frac{F}{4} \times (d \cdot u)$	3,2875.10 ⁻³ N.m
σ _Z	$\frac{\ \vec{M}_{F/O}\ }{I_{GZ}} \cdot y$	49,0834.10 ⁹ .y

Tableau 43 – Résultats théoriques et expression de la contrainte de flexion suivant Oz au point O

On peut évaluer la contrainte maximale en valeur absolue à **14,8 MPa**. Cette contrainte est bien inférieure à la limite élastique proche de **345 MPa**. Dans la suite nous allons calculer la déformation associée. Nous donnerons l'équation de la déformée de la ligne moyenne de la colonnette. L'équation de la déformée est donnée par la relation suivante :

$$Y_d'' = \frac{\|\vec{M}_{F/O}\|}{E \cdot I_{GZ}} = Y_d = \frac{\|\vec{M}_{F/O}\|}{2E \cdot I_{GZ}} \cdot x^2$$

Ceci permet d'établir l'équation d'une parabole qui dépend de la position en x. Nous avons représenté cette courbe dans la Figure 210.

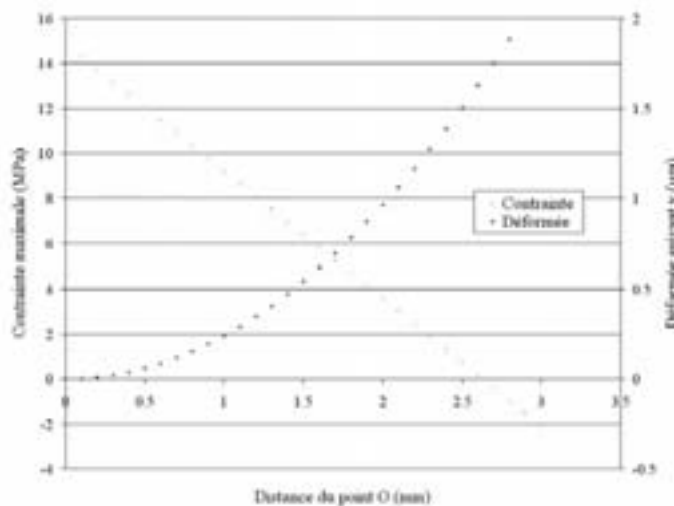


Figure 210 – Représentation des contraintes et de la déformée en fonction de x par rapport au point O

Les calculs menés sont valables dans le cas d'une déformation élastique (Figure 211). On trouve une déformation maximale de $2,5 \mu\text{m}$ suivant l'axe y . Ce calcul est donc en accord avec les simulations présentées dans le chapitre IV.

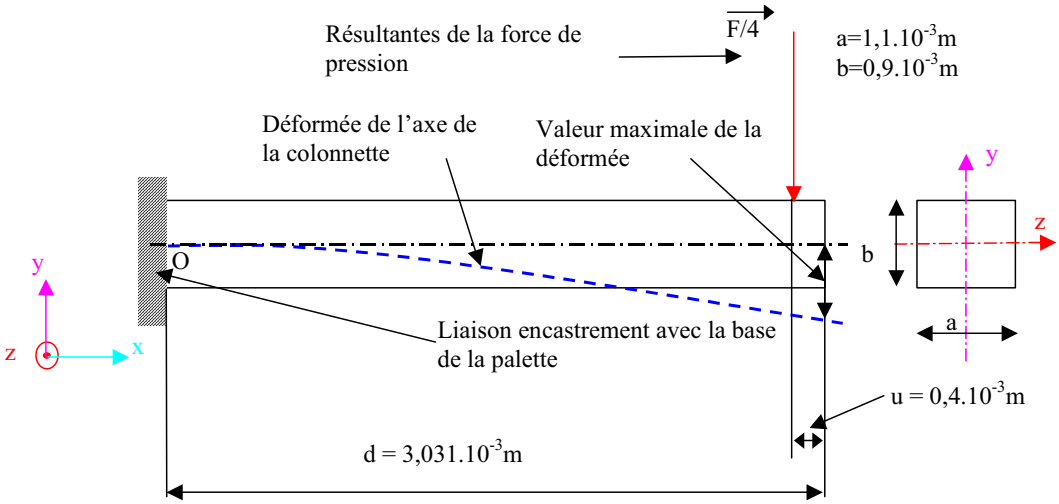


Figure 211 – Représentation schématique de la déformée de l'axe de la colonnette

Références

[1] P. Rey

"Contribution à l'intégration des circuits de puissance adaptée à l'électronique automobile" – *Thèse de doctorat : Electronique : Bordeaux I, 1996, Chapitre IV, n° 1423, 245 pages.*

[2] D. Lewis

"Réalisation d'un banc optique d'imagerie thermique et thermoélastique pour composants électroniques en fonctionnement. Application à l'étude de l'effet Peltier généré aux contacts ohmiques de circuits intégrés et à la caractérisation du comportement thermique de diode laser" – *Thèse de doctorat : Electronique : Bordeaux I, 1996, Chapitre I, n° 1519, 200 pages.*

[3] T. Hayashi and H. Tsunetsugu

"Optical module with MU connector interface using self-alignment technique by solder-bump chip bonding", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931), 1996, pp 13-19.*

[4] W. Hunziker, W. Vogt, H. Melchior, R. Germann and C. Harder

"Low cost packaging of semiconductor laser arrays using passive self-aligned flip-chip technique on Si motherboard", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931), 1996, pp 8-12.*

[5] E. Aperathitis, D. Cengher, M. Kayambaki, M. Androulidaki, G. Deligeorgis, K. Tsagaraki, Z. Hatzopoulos and A. Georgakilas

"Evaluation of reactive ion etching processes for fabrication of integrated GaAs/AlGaAs optoelectronic devices", *Materials Science and Engineering B, Volume 80, Issues 1-3, 22 March 2001, pp 77-80.*

[6] O. Wada

"Optoelectronic integration : physics, technology and application", *Edition - Boston : Kluwer Academic Publisher, 1994, Chapter III & IV, 458 pages.*

[7] J.S. Pereira and J.T. De Jesus

"Multi-wavelength optical source based on amplified spontaneous emission of erbium doped fiber", *1997 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. 'Linking to the Next Generation'. Proceedings (Cat. No.97TH8309), Volume 1, 1997, Page 221-226*

[8] G.P. Agrawal

"Fiber-optic communication systems", *second edition – New York : John Wiley & sons, chapter 3, 555 pages.*

[9] L. Hirsch

"Etudes électriques de l'environnement des ions erbium dans des couches minces de $\text{Ca}_{1-x}\text{Er}_x\text{F}_{2+x}$ épitaxiées sur silicium" – *Thèse de doctorat : Science des matériaux : Bordeaux I, 1996, Chapitre I, n° 1525, 176 pages.*

-
- [10] D. Derickson
"Fiber optic : Test and measurement", *London : Prentice-Hall, chapter 1, 645 pages.*
- [11] E. Rosencher et B. Vinter
"Optoelectronique", *Edition -Paris : Thomson-CSF / Masson, 1998, Chapitre 1, 7 et 13, 558 pages.*
- [12] R.J.Malik
"III-V semiconductor materials and devices" – Material processing – Theory and practice – Volume 7, Edition - Amsterdam : F.F.Y.Wang, 1989, Chapter II, 727 pages.
- [13] G.C. Joo ; S.H. Lee, N. Hwang, K.S. Park, H.M. Kim, M.K. Song and K.E. Pyun
"Fabrication of optical Tx/Rx subscriber modules incorporating passive alignment technique", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931), 1996, pp 37-41.*
- [14] D. G. Ivey
"Microstructural Characterization of Au/Sn Solder for Packaging in Optoelectronic Applications", *Micron, Volume 29, Issue 4, August 1998, pp 281-287.*
- [15] C. Pusarla and A. Christou
"Solder bonding alignment of microlens in hybrid receiver for free space optical interconnections", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931), 1996, pp 42-47.*
- [16] B. Layet and J.F. Snowdon
"Comparison of two approaches for implementing free-space optical interconnection networks", *Optics Communications, Volume 189, Issues 1-3, 1 March 2001, pp 39-46.*
- [17] C. Le Brun
"Développement de la nouvelle bibliothèque de composants optiques COMSIS", *Thèse de doctorat : Electronique, Rennes, 1999, Chapitre I, 182 pages.*
- [18] D. Wood
"Optoelectronic semiconductor devices", *Edition - New York : PRENTICE HALL, 1994, pp 160-248.*
- [19] M. Fukuda
"Reliability and degradation of semiconductor lasers and Leds", *Edition - Norwood MA : Artech house, 1991, Chapitre II, IV and VII, 346 pages.*
- [20] S.Desmond Smith
"Optoelectronic devices", *Edition - New York : PRENTICE HALL, 1995, pp 257-282.*
- [21] O. Ueda
"Reliability and degradation of III-V optical devices", *Edition - Boston London : Artech house, 1996, Chapter I and II, 357 pages.*
- [22] M. Pommies
"Analyse des mécanismes de dégradation des lasers à semiconducteurs pour applications dans les télécommunications", – *Thèse de doctorat : Télécommunication : Limoges, 2002,Chapitre I, 226 pages.*

-
- [23] Y. G. Zhang, A. Z. Li, Y. L. Zheng, C. Lin and G. Z. Jian
"MBE grown 2.0 μm InGaAsSb/AlGaAsSb MQW Ridge waveguide laser diodes", *Journal of Crystal Growth*, Volumes 227-228, July 2001, pp 582-585.
- [24] V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, N. A. Maleev, A. R. Kovsh, S. S. Mikhrin, B. V. Volovik, Yu. G. Musikhin, Yu. M. Shernyakov, M. V. Maximov, A. F. Tsatsul'nikov and *al.*
"1.3 μm InAs/GaAs quantum dot lasers and VCSELs grown by molecular beam epitaxy", *Journal of Crystal Growth*, Volumes 227-228, July 2001, pp 1155-1161.
- [25] J.I. Chyi
"MBE growth and characterisation of InGaAs quantum dot lasers", *Materials Science and Engineering B*, Volume 75, Issues 2-3, 1 June 2000, pp 121-125.
- [26] S. Hinooda, S. Loualiche, B.Lambert, N. Bertru, M. Paillard, X. Marie and T.Amand
"Wetting layer carrier dynamics in InAs/InP quantum dots", *Applied Physics Letters*, Volume 78, Issue 20, 2001, pp 3052-3054.
- [27] Zh.I. Alferov, A.F Ioffe
"Quantum wells and superlattices come of age", *III-V's Reviews*, Volume 10, Issue 7, 1997, pp 26-31.
- [28] N. Chand, J.W. Osenbach, T.L. Evansky, R.B. Comizzoli and W.T. Tsang
"High-reliability 1.3 - μm InP-based uncooled lasers in nonhermetic packages", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Volume 32, Issue 9, 1996, pp 1606-1614.
- [29] M. Gotoda, H. Sugimoto, T. Isu and M. Nunoshita
"Grown mirrors of InP formed by dry etching and selective CBE regrowth for short cavity lasers", *Journal of Crystal Growth*, Volume 164, Issues 1-4, July 1996, pp 308-313.
- [30] , H. Sugimoto, M. Gotoda, T. Isu and M. Nunoshita
"Fabrication of crystal-facet mirrors for short cavity lasers by selective InP epitaxy on etched sidewalls", *Conference Proceedings. Seventh International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (Cat. No.95CH35720)*, 1995, pp 65-67.
- [31] Y. Qu, B. Baoxue, Z. Baoshun, G. Xin, Z. Xingde and S. Jiawei
"High-power, low-beam-divergence 980 nm laser arrays with nonabsorbing facets", *Journal of Crystal Growth*, Volumes 227-228, July 2001, pp 202-205.
- [32] I.P. Hall
"Non-hermetic encapsulation and assembly techniques for optoelectronic applications", *Microelectronics International*, Issue 39, 1996, pp 6-10.
- [33] M. Itoh, J. Sasaki, A. Uda, I. Yoneda, H. Honmou and K. Fukushima
"Use of AuSn solder bumps in three-dimensional passive aligned packaging of LD/PD arrays on Si optical benches", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931)*, 1996, pp 1-7.

[34] K. Ennsner, R.I. Laming and M.N. Zervas

"Evaluation of RZ- and NRZ-format 40 Gb/s transmission over embedded standard fibre employing chirped fibre grating dispersion compensators", 1997 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. 'Linking to the Next Generation'. Proceedings (Cat. No.97TH8309), Volume 2, 1997, pp 457-460.

[35] P. Boscolo, S.Reneault and S. Susini

"Réseau urbain de fibres optiques eperimental pour l'université de Florence" - INIST CNRS, 1998, pp 263-270.

[36] D. Sauvage, D.Laffitte, J.Perinet, Ph. Berthier and J.L. Goudard

"Reliability of optoelectronic components for telecommunications", Microelectronics Reliability, Volume 40, Issue 8-10, 2000, pp 1701-1708.

[37] A. Bjarklev, M.O. Berendt, J. Broeng, J. Philipsen and M.S. Pedersen

"Progress on erbium-doped waveguide components", 1997 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. 'Linking to the Next Generation'. Proceedings (Cat. No.97TH8309), Volume 1, 1997, Page 317-322.

[38] C.R. Giles, C. Doerr, M. Zirngibl, C. Joyner, U. Koren, K.F. Dryer, J. Zyskind, J. Sulhoff, L. Stulz *et al.*

"1.8 Petabit/s downstream capacity WDM passive optical network", Electronics Letters, Volume 33, Issue 14, 1997, pp 1231-1232.

[39] K. Rehm, W. Dütting, N. Kaiser, P. Vetter, C. Artigue and B. Fernie

"Interconnexions optiques : la clé des échanges à haut debit au sein des équipements de télécommunication" - INIST CNRS, Volume 70, Issue 6, 1998, pp 65-73.

[40] M. Nakamura, and N. Sugiura

"High-speed signal transmission evaluation for a multi-interface rack system", Proceedings of the 1995 International Electronics Packaging Conference, 1995, pp 711-720.

[41] J. Bristow, Y. Liu, T. Marta, S. Bounnak, K. Johnson, Y. Liu and H. Cole

"Cost effective optoelectronic packaging for multichip modules and backplane level optical interconnects", *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 2400, 1995, pp 61-73.*

[42] S. Valette, G. Nicolas and C. Massit

"The challenge of optoelectronic hybridisation", 10th European Microelectronics Conference. Proceedings, 1995, pp 574-579.

[43] P. Chavel

"L'optique dans les interconnexions-panorama", *L'onde électrique, 1990, pp 6-10.*

[44] J.I. Hashimoto, I. Yoshida, M. Murata and T. Katsuyama

"Time dependence of catastrophic optical damage (COD) of 0.98 μm GaInAs/GaInP strained quantum well laser", *Conference Proceedings. Seventh International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (Cat. No.95CH35720), 1995, pp 472-475.*

-
- [45] U. Menzel, R. Puchert, A. Bärwolff and A. Lau
"Facet heating and axial temperature profiles in high-power GaAlAs/GaAs laser diodes", *Microelectronics and Reliability*, Volume 38, Issue 5, May 1998, pp 821-825.
- [46] G. Beister, J. Maege, G. Erbert and G. Tränkle
"Non-radiative current in InGaAs/AlGaAs laser diodes as a measure of facet stability", *Solid-State Electronics*, Volume 42, Issue 11, November 1998, pp 1939-1945.
- [47] L. Ching-Ting, S. Hung-Pin, Y. Nien-Tze, T. Chang-Da, L. Yen-Tang and T. Yuan-Kuang
"Thermal reliability and characterization of InGaP Schottky contact with Ti/Pt/Au metals", *Solid-State Electronics*, Volume 41, Issue 1, January 1997, pp 1-5.
- [48] C. Yan, Y.W. Mai, Q. Yuan, L. Ye and J. Sun
"Effects of substrate materials on fracture toughness measurement in adhesive joints", *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 43, Issue 9, September 2001, pp 2091-2102.
- [49] L. Béchou
"Conception et réalisation d'un système ultrasonore à balayage appliqué au diagnostic de défauts dans les micro-assemblages. Contribution à l'aide à l'interprétation par traitement de l'image et du signal" – *Thèse de doctorat : Electronique : Bordeaux I, 1998, n° 1853, Chapitre I, 250 pages.*
- [50] Z. Tang, R. Zhang and F. G. Shi
"Effects of angular misalignments on fiber-optic alignment automation", *Optics Communications*, Volume 196, Issues 1-6, 1 September 2001, pp 173-180.
- [51] H. Mathieu
"Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 3^{ème} Edition, Paris : Masson, 1996, Chapitre 2, 9 et 10, 580 pages.
- [52] G. Chiorboli, M. Vanzi, M.C. Ronchini and F. Fantini
"Electrical characterization for failure analysis of DHBC InGaAsP/InP laser diodes", *ISTFA 92, 1992, pp 237-240.*
- [53] P.D. Wright, W.B Joyce and D.C. Craft
"Electrical derivative characteristics of InGaAsP buried heterostructure lasers", *Journal of apply physics*, 1982, pp 1364-1372.
- [54] M. Ciappa, A. Naitana and M. Vanzi
"Transient stressing and characterization of thin tunnel oxides", *Microelectronics and Reliability*, Volume 37, Issue 10-11, 1997, pp 1525-1528.
- [55] A.D. Sarmiento
"Modulation characteristics of multiple quantum-well lasers including coupling effects between wells", *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 2610, 1996, pp 23-33.
- [56] Y. G. Zhang, A. Z. Li, Y. L. Zheng, C. Lin and G. Z. Jian
"MBE grown 2.0 μm InGaAsSb/AlGaAsSb MQW Ridge waveguide laser diodes", *Journal of Crystal Growth*, Volumes 227-228, July 2001, pp 582-585.

[57] V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, N. A. Maleev, A. R. Kovsh, S. S. Mikhlin, B. V. Volovik, Yu. G. Musikhin, Yu. M. Shernyakov, M. V. Maximov, A. F. Tsatsul'nikov and *al.*

"1.3 μm InAs/GaAs quantum dot lasers and VCSELs grown by molecular beam epitaxy", *Journal of Crystal Growth, Volumes 227-228, July 2001, pp 1155-1161.*

[58] Jen-Inn Chyi

"MBE growth and characterisation of InGaAs quantum dot lasers", *Materials Science and Engineering B, Volume 75, Issues 2-3, 1 June 2000, pp 121-125.*

[59] M. Vanzi, G. Martines, A. Bonfiglio, M. Licheri, R. D'Arco, G. Salmini and R. De Palo

"A simpler method for life-testing laser diodes", *Microelectronics Reliability, Volume 39, Issue 6-7, 1999, pp 1067-1071.*

[60] S. A. Bashar

"Study of indium tin oxide (ITO) for novel optoelectronic devices", Thèse de doctorat : Electronic, University of London, 1998, 150 pages.

[61] B.B. Elenkrig, S. Smetona, J.G. Simmons, B. Takasaki, J.D. Evans and T. Makino

"Series resistance and its effect on the maximum output power of 1.5 μm strained-layer multiple-quantum-well Ridge waveguide InGaAsP lasers", *Journal of Applied Physics, Volume 87, Issue 1, 2000, pp 1-4.*

[62] A. Bonfiglio, M.B. Casu, F. Magistrali, M. Maini, G. Salmini and M. Vanzi

"A different approach to the analysis of data in life-tests of laser diodes", *Microelectronics Reliability, Volume 38, Issue 5, 1998, pp 767-77.*

[63] F. Magistrali, D. Sala, G. Salmini, M. Vanzi, F. Fantini, M. Giansante and L. Zazzetti

"ESD induced degradation mechanisms of InGaAsP/InP lasers", *Quality and Reliability Engineering International, Volume 8, Issue 3, 1992, pp 287-293.*

[64] F. Magistrali, G. Salmini, M. Maini, W. Matta and M. Vanzi

"Electrical failure modes of 980 nm SL InGaAs QW lasers", *ESREF 91, pages 409-414.*

[65] A.M. Ojeda, E. Redondo, G. Gonzalez Diaz and I. Martil

"Analysis of light-emission processes in light-emitting diodes and semiconductor lasers", *European Journal of Physics, Volume 18, Issue 2, 1997, Pages 63-67.*

[66] M. Schwob et G. Peyrache

"Traité de fiabilité", Edition Masson- Paris , 1969, Chapitre II, 411 pages.

[67] J.M. Dumas and M. Quilec

"Les matériaux pour l'optoélectronique", *Journées électroniques, Club EEA, Montpellier, 1997, présentation orale.*

[68] O. Pursiainen, N. Linder, A. Jaeger, R. Oberschmid and K. Streubel

"Identification of aging mechanisms in the optical and electrical characteristics of light-emitting diodes", *Applied Physics Letters, Volume 79, Issue 18, 2001, pp 2895-2897.*

[69] O. Ueda

"Degradation of III-V optoelectronic devices", *J.Electrochem.Soc.*, January 1988, pp 11-22.

[70] M. Fukuda

"Historical overview and future of optoelectronics reliability for optical fiber communication systems", *Microelectronics Reliability*, Volume 40, 2000, pp 25-35.

[71] J.D.G. Lacey, D.V. Morgan, Y.H. Aliyu and H. Thomas

"The reliability of $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ visible light-emitting diodes", *Quality and Reliability Engineering International*, Volume 16, Issue 1, 2000, pp 45-49.

[72] M. Vanzi, G. Salmini, R. De Palo

"New FIB/TEM evidence for a REDR mechanism in sudden failures of 980 nm SL SQW InGaAs/AlGaAs pump laser diodes", *Microelectronics Reliability*, Volume 40, Issue 8-10, 2000, pp 1753-1757.

[73] S.M. Sze

"Physics of semiconductor devices", 2nd Edition – New York : John Wiley & Son, 1981, Part 2, 868 pages.

[74] G. Sarkar, S. Mridha, T.T. Chong, W. Yuen Tuck and S. Chi Kwan.

"Flip chip interconnect using anisotropic conductive adhesive", *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 89-90, 19 May 1999, pp 484-490.

[75] M. G. Périchaud, J. Y. Delétage, H. Frémont, Y. Danto and C. Faure

"Reliability evaluation of adhesive bonded SMT components in industrial applications", *Microelectronics Reliability*, Volume 40, Issue 7, July 2000, pp 1227-1234.

[76] E. Nicewarner

"Interconnect resistance characteristics of several flip-chip bumping and assembly techniques", *Microelectronics and Reliability*, Volume 39, Issue 1, January 1999, pp 113-121.

[77] J.W. Lim, J.K. Mun, M.H. Kwak and J.J. Lee

"Performance of Pd/Ge/Au/Pd/Au ohmic contacts and its application to GaAs metal-semiconductor field-effect transistors", *Solid-State Electronics*, Volume 43, Issue 10, October 1999, pp 1893-1900.

[78] F. Magistrali, A. Righetti, G. Salmini and W.J. Cignac

"Reliability results on 980 nm high power lasers", *ESREF '94. Proceedings of the 5th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis*, 1994, pp 335-340.

[79] A. HawkRidge and A. Carter

"Reliability assessment of a 1480 nm pump laser diode for EDFA", *ESREF '94. Proceedings of the 5th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis*, 1994, pp 231-235.

[80] A.R. Mickelson

"Techniques for optoelectronic packaging", *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 2524, 1995, pp 164-171.

-
- [81] G. Rainer Dohle, J.J. Callahan, T.J. Drabik and K.P. Martin
"A new cost effective packaging technique for optoelectronic devices", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931)*, 1996, pp 1301-1307.
- [82] M.S. Cohen, G.W. Johnson, J.M. Trehwella, D.L. Lacey, M.M. Oprysko, D.L. Karst, S.M. DeFoster, W.K. Hogan, M.D. Peterson and Weirick.
"Low-cost fabrication of optical subassemblies", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931)*, 1996, pp 1093-1100.
- [83] Q. Tan and Y.C. Lee
"Soldering technology for optoelectronic packaging", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931)*, 1996, pp 26-36.
- [84] M. Itoh, J. Sasaki, A. Uda, I. Yoneda, H. Honmou, K. Fukushima
"Use of AuSn solder bumps in three-dimensional passive aligned packaging of LD/PD arrays on Si optical benches", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931)*, 1996, pp 1-7.
- [85] A. Bonfiglio, M.B. Casu, M. Vanzi, R. De Palo, F. Magistrali and G. Salmini
"Early signatures for REDR-based laser degradations", *Microelectronics Reliability, Volume 38, Issues 6-8, 1998, pp 1215-1220.*
- [86] T. Uchida, H. Kurakake, H. Soda and S. Yamazaki
"CW operation of a 1.3- μm strained quantum well laser on a graded InGaAs buffer with a GaAs substrate", *Conference Proceedings. Seventh International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (Cat. No.95CH35720)*, 1995, pp 22-25.
- [87] T. Munakata, Y. Kashima, S. Kusumoto, A. Matoba and H. Takano
"High power InGaAsP/InP 1.625 μm strained quantum well lasers", *Conference Proceedings. Seventh International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (Cat. No.95CH35720)*, 1995, pp 496-499.
- [88] Y. Kashima, T. Nozawa and T. Munakata
"Metalorganic vapor-phase epitaxy (MOVPE) growth of InGaAsP multiple-quantum-well distributed feedback lasers on InP corrugated substrate", *Journal of Crystal Growth, Volume 204, Issue 4, August 1999, pp 429-433.*
- [89] Wiley, John & Sons
"GaInAsP alloy semiconductors", *Edition - Murray Hill : T.P. Pearsall, 1982, Part I and III, 468 p.*
- [90] K. Otsubo, Y. Nishijima, T. Uchida, H. Shoji, K. Nakajima and H. Ishikawa
"1.3 μm InGaAs/InAlGaAs strained quantum well lasers on InGaAs ternary substrates", *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2 (Letters), Volume 38, Issue 3B, 1999, pp L312-L314.*
- [91] K. Kojima, M.W. Focht, J.M. Freund, J.M. Geary, K.G. Glogovsky, G.D. Guth, R.F. Karlicek, L.C. Luther, G.J. Przybylek and *al.*
"High power, high efficiency, and highly uniform 1.3 μm uncooled InGaAsP/InP strained multi-quantum well lasers", *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 2610, 1996, pp 76-82.*

[92] K.Uomi

"Extremely low threshold 1.3- μm strained-MQW lasers for parallel high-speed optical interconnections", *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 2610, 1996, pp 83-93.*

[93] M. Kito, S. Kimura, N. Otsuka, K. Fujihara, M. Ishino and Y. Matsui

"High output power operation of 1.3- μm strained MQW lasers with low threshold currents at high temperature", *Optical and Quantum Electronics, Volume 28, Issue 5, 1996, pp 503-511.*

[94] Marie Morin, Jean-Pierre Defars and Pascal Devoldère

"Coupling technology impact on low-cost laser modules performances and reliability", *Microelectronics and Reliability, Volume 38, Issues 6-8, 8 June 1998, pp 1221-1226.*

[95] M. Morimoto and M. Takusagawa

"Accelerated facet degradation of InGaAsP/InP double-heterostructure lasers in water", *Journal of Applied Physics, Volume 53, Issue 6, 1982, pp 4028-4037.*

[96] T. Takeshita, M. Sugo, T. Nishiya, R. Iga, M. Fukuda and Y. Itaya

"Degradation Behavior in InGaAs/GaAs Strained-Quantum Well lasers", *Microelectronics and Reliability, Volume 38, Issues 6-8, 8 June 1998, pp 1211-1214.*

[97] M. Vanzi, A. Bonfiglio, P. Salaris, P. Deplano, E.F. Trogu, A. Serpe, G. Salmini and R. De Palo

"Gold removal in failure analysis of GaAs-based laser diodes", *Microelectronics Reliability, Volume 39, Issues 6-7, 1999, pp 1043-1047.*

[98] B. Bauduin, J. Wallon, D. Riviere, J.Y. Boulaire

"Highlighting of two types of defects in 1300 nm PBC laser diodes", *Quality and Reliability Engineering International, Volume 12, Issue 4, 1996, pp 317-320.*

[99] J. Wallon and P. Devoldere

"Spectral behaviour and ageing tests of InGaAs/AlGaAs and Al-free 980 nm pump laser diodes", *ESREF 95, pp 415-420.*

[100] X. Y. Chen, A. Pedersen, and A. D. Van Rheenen

"Effect of electrical and thermal stress on low-frequency noise characteristics of laser diodes", *Microelectronics Reliability, Volume 41, Issue 1, January 2001, pp 105-110.*

[101] Z.L. Miao, W. Lu, P.P. Chen, Z.F. Li, W.Y. Cai, X.Z. Yuan, P. Liu, G.L. Shi, W.L. Xu, X. C. Shen and *al.*

"Modification of GaAs/AlGaAs asymmetrically coupled double quantum well characteristics by proton implantation induced intermixing", *Journal of Crystal Growth, Volumes 227-228, July 2001, pp 132-137.*

[102] F. Magistrali, E. Mariani, G. Salmini and M. Vanzi

"Failure analysis of 980 nm high power lasers", *ISTFA '94. Proceedings of the 20th International Symposium for Testing and Failure Analysis, 1994, pp 335-340.*

[103] J. Sutherland, G. George, S. Van Der Green and J.P. Krusius

"Alignment tolerance measurements and optical coupling modeling for optoelectronic array interface assemblies", *1996 Proceedings. 46th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.96CH35931), 1996, pp 480-486.*

-
- [104] P. Montangero, L. Serra, P. Devoldere and N. Garnier
"Quality and reliability of III-V optoelectronic devices: Field experiences and laboratory results", *CSELT Technical Reports, Volume 22, Issue 4, 1994, pp 513-533.*
- [105] G. Nakagawa, K. Miura, K. Tanaka and M. Yano
"Lens-coupled laser-diode module integrated on silicon platform" Proceedings-of-the-SPIE, The-International-Society-for-Optical-Engineering, vol.2610; 1996, pp 59-64
- [106] M.R. Matthews; B.M. Macdonald and K.P. Preston
"Optical components-the new challenge in packaging", *40th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.90CH2893-6). IEEE, New York, NY, USA, Volume 1. 1990, pp 206-13.*
- [107] M.K. Song, S.G. Kang, N. Hwang, H.T. Lee, S.S. Park and K.E. Pyun
"laser weldability analysis of high-speed optical transmission device packaging", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part B: Advanced Packaging, Volume 19, Issue 4, 1996, pp 758-763.*
- [108] Ali Hijazi
"Etude du comportement thermomécanique et de la fiabilité d'assemblages de composants montés en surface, utilisés en environnement automobile sévère." – *Thèse de doctorat : Electronique : Bordeaux I, 1993, n° 900, Chapitre IV et V, 225 pages.*
- [109] **"Analyse par microsection de l'ensemble pigtail"**, *Alcatel Optronics, Rapport interne.*
- [110] The online materials information resource, "<http://www.matweb.com>".
- [111] ASM international
"ASM engineered materials reference book", *2^{ème} Edition - ASM international, 1994, 580 pages.*
- [112] W.M. Sherry, C. Gaebe, T.J. Miller and R.C. Schweizer
"High performance optoelectronic packaging for 2.5 and 10 Gb/s laser modules", *Electronic components and technology conference, 1996, pp 620-627.*
- [113] M. Von Allmen and A. Blatter.
"laser-beam interactions with materials : Physical principles and applications", *Edition – Paris : Springer , 1994, Chapters, 196 pages.*
- [114] S. Jang
"Packaging of photonic devices using laser welding", *Proceeding of Spie, Volume 2610, 1996, pp 138-149*
- [115] B. Dabezies, A. Culoma, L.Gauthier and J.M.Signamarcheix
"Soudage par faisceau laser de forte puissance. Estimation du bilan énergétique et transformation métallurgiques induites par le soudage laser." - *Opto89, 1989, pp 615-623.*
- [116] D.H. Kang, K.J. Son and Y.S. Yang
"Analysis of laser weldment distortion in the EDFA LD pump packaging", *Finite Elements in Analysis and Design, Volume 37, Issue 9, September 2001, pp 749-760.*

[117] J.H. Lau

"Thermal stress and strain in microelectronics packaging", Edition -New York : Van Nosrand Reinhold, 1993, Chapters 2 and 5, 883 pages

[118] L. Xinbo, Z. Fubao and Z. Zhiliang

"Determination of metal material flow stress by the method of C-FEM", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 120, Issues 1-3, 15 January 2002, pp 144-150.

[119] A.Bazergui, T.Bui-Quoc, A.Biron, G.McIntyre and C.Laberge

"Résistance des matériaux" – 2ième Edition, Montréal : Ecole polytechnique de Montréal, 1993, Chapitre 5, 9, 10 et 12.

[120] W.H. Cheng, Y.D. Yang, T.C. Liang, G.L. Wang, M.T. Sheen, J.H. Kuang

"Thermal stresses in box-type laser packages", *Optical and Quantum Electronics*, Volume 31, Issue 4, 1999, pp 293-302.

[121] Baurele Dieter

"laser processing and chimestry", 2^{ème} Edition, BERLIN ; NEW YORK : SPRINGER, COP. 1996, Chapters . 650 pages.

[122] J. Zhang, P. Dong, F.W. Brust, W.J. Shack, M.E. Mayfield and M. McNeil

"Modeling of weld residual stresses in core shroud structures", *Nuclear Engineering and Design*, Volume 195, Issue 2, 1 February 2000, pp 171-187.

[123] T. Asayama and S. Hasebe

"Weld metal creep-fatigue life prediction by modeling the microstructure degradation due to the exposure to high temperature and load", *Nuclear Engineering and Design*, Volume 195, Issue 2, 1 February 2000, pp 197-210.

[124] T. Asayama

"Creep-fatigue evaluation of stainless steel welded joints in FBR class 1 components", *Nuclear Engineering and Design*, Volume 198, Issues 1-2, 2 May 2000, pp 25-40.

[125] A.B. Vannes

"Le soudage laser de faibles et moyennes épaisseurs", monographie du club laser de puissance, CETIM, 1^{ère} Edition, 1990, pp 1-33.

[126] W.H. Cheng, W.H. Wang and J.C. Chen

"Defect formation mechanisms in laser welding techniques for semiconductor laser packaging", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part B: Advanced Packaging*, Volume 19, Issue 4, 1996, pp 764-769.

[127] H.J. Pucher, M. Glasmacher and M. Geiger

"laser beam soldering of fine pitch technology packages with solid solder deposits", *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 2703, 1996, pp 310-321.

[128] O.P. Bobrov, A.T. Kosilov and V.A. Khonik

"Homogeneous flow and strain recovery in metallic glasses as a result of irreversible anisotropic structural relaxation", *Physics of Metals and Metallography*, Volume 81, Issue 3, 1996, Page Numbers: 318-324.

[129] **"Analyse de la microstructure et du comportement mécanique des joints de brasure SnSb et SnPbAg"**, *Alcatel Optronics, Rapport interne*.

[130] Z. Tang, R. Zhang, S. K. Mondal and F. G. Shi

"Optimization of fiber-optic coupling and alignment tolerance for coupling between a laser diode and a wedged single-mode fiber", *Optics Communications, Volume 199, Issues 1-4, 15 November 2001, pp 95-101*.

[131] Z. Tang, R. Zhang and F. G. Shi

"Effects of angular misalignments on fiber-optic alignment automation", *Optics Communications, Volume 196, Issues 1-6, 1 September 2001, pp 173-180*.

[132] **"Plan de test – études briques technologiques -40°C/+85°C"**, *Alcatel Optronics, Rapport interne*.

Production scientifique

Publications

- [1] P. TARDY, Y. DESHAYES, L. HIRSCH, AS. BARRIERE, B. DESBAT, A. ELFAJRI
"Study of Ca_{1-x}Pr_xF_{2+x} solid solution thin films grown on silicon substrates.", *Thin Solid Film*, Vol. 347, (1-2), pp 127-132, 1999.
- [2] P. TARDY, Y. DESHAYES, L. HIRSCH, AS. BARRIERE, A. ELFAJRI, B. DESBAT
"Spatial distribution of Pr³⁺ and ions in Ca_{1-x}Pr_xF_{2+x} luminescent thin films", *Mat. Sci. Forum*, Vol. 315-317, pp 236-242, 1999.
- [3] Y. DESHAYES, L. BECHOU, L. MENDISABAL, Y. DANTO
"Identification of early failure signatures after thermal cycles of 1310 nm laser modules using electrical and optical measurements", Quality and reliability Engineering international (QREI), soumise en mai 2002.

Communications internationales

- [1] P. TARDY, Y. DESHAYES, L. HIRSCH, AS. BARRIERE, A. ELFAJRI, B. DESBAT
"Spatial distribution of Pr³⁺ and ions in Ca_{1-x}Pr_xF_{2+x} luminescent thin films", Rare Earth 98, Mat. Sci. Forum, vol. 236-242, p 387-393, 1999.
- [2] Y. DESHAYES, L. BECHOU, Y. DANTO, D. LAFFITTE, J.L. GOUDARD
" Three-dimensional FEM simulations of thermomechanical stresses in 1.55 μm laser modules"
IPFA 2002 conference in Singapore (8-12 July 2002).

Communications nationales

- [1] Y. DESHAYES
"Etude de la fiabilité de composants et modules optoélectronique", III^{ème} Journées nationales du réseau doctoral de microélectronique, Montpellier 4-5 mai 2000, pp18-20.

Rapports de contrats industriels

- [1] Y. DESHAYES
"Etude thermomécanique des têtes optiques LMI 1550 nm – Evaluation technologique", Rapport 1^{ère} phase - Alcatel Optronics, mars 2001.
- [2] Y. DESHAYES
"Etude thermomécanique des têtes optiques LMI 1550 nm – Validations expérimentales des simulations", Rapport 2^{ème} phase - Alcatel Optronics, juillet 2002.

Résumé

Ce mémoire présente les travaux de conception et de réalisation d'un banc de mesures de paramètres électriques et optiques dédié au diagnostic de défaillances de systèmes optoélectroniques émissifs infrarouge (880 - 1550 nm). Les performances du banc comprenant des mesures courant-tension, puissance optique et spectre optique en température ont permis la discrimination de dégradations relatives au composant ou à l'alignement optique de diodes électroluminescentes ou têtes optiques. Les niveaux de contraintes apportées par des vieillissements, appliquées à des têtes optiques émissives 1310 nm à cavité Fabry-Pérot ont induit une chute de puissance optique de plus de 10% après un nombre réduit de cycles. L'origine de cette diminution de puissance optique peut être initiée par une défaillance au sein de la puce ou une instabilité du couplage avec la fibre optique. Les dérives du courant de seuil et du spectre optique ont confirmé des dégradations de la zone active. En revanche, les analyses électro-optiques ne permettent pas de déterminer l'origine de la défaillance dans le cas d'une dérive du couplage optique. Les tolérances submicroniques des éléments passifs d'alignement optique étant fréquemment à l'origine des défaillances, des simulations physiques non-linéaires par éléments finis ont été également effectuées afin de déterminer la susceptibilité thermomécanique d'un module optoélectronique émissif complet DFB 1550 nm. Cette étude a démontré l'accumulation de contraintes résiduelles après les tirs YAG, utilisés pour souder les sous parties entre elles, susceptibles de provoquer une déviation de l'axe optique théorique de $0,03^\circ$ responsables d'une chute de 15 % de la puissance optique. Un macromodèle, tenant compte des différentes étapes de fabrication et des caractéristiques expérimentales des matériaux en présence, a été développé, en accord avec le fabricant, pour optimiser les règles de conception de nouvelles générations de têtes optiques robustes.

Abstract

This thesis presents work of design and realization of test bench for measurements of electrical and optical parameters dedicated to the diagnosis of failures of infrared emissive optoelectronic systems (880 - 1550 nm). The performances of this test bench including current-voltage, optical power and optical spectrum measurements versus temperature allowing the discrimination of degradations related to the component or the optical alignment of light emitting diodes or laser modules. Ageing tests applied to emissive laser modules 1310 nm with Fabry-Pérot cavity induced an optical power decrease of more than 10% after a short number of cycles. The origin of this drop can be initiated by a failure within the chip or an instability of the optical coupling. The drift of the threshold current and the optical spectrum has confirmed degradations located in the active zone. On the other hand, the electrooptical analyses do not allow to determine the origin of the failure in the case of an optical coupling drift. The submicronic tolerances of passive elements for optical alignment are generally related to the failures. So, non-linear finite elements physical simulations were also carried out in order to determine the thermomechanical susceptibility of an emissive 1550 nm DFB optoelectronic module. This study has showed the accumulation of residual stresses after laser Nd : YAG, used to weld the different parts between them, responsible of theoretical optical axis deviation near $0,03^\circ$ leading to a 15 % optical power decrease. A parametric model, taking into account of the various stages of manufacturing process and experimental characteristics of materials, was developed, in agreement with the manufacturer, to optimize design rules for improvement of robust laser modules.

Mots-clés :

Caractérisation électro-optique
Couplage optique
Simulations par éléments finis
Systèmes optoélectroniques émissifs

Keywords :

Electro-optical characterization
Optical alignment
Thermomechanical simulations
Optoelectronic transmitters