

N° d'ordre : 2952

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

Par **Sarah HUYGHE**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Electronique

FIABILITE DES AMPLIFICATEURS OPTIQUES A

SEMICONDUCTEUR 1,55 μm POUR DES APPLICATIONS DE

TELECOMMUNICATION : Etude expérimentale et modélisation physique

Soutenue le 13 Janvier 2005

Après avis de :

MM.	O. Bonnaud	Professeur	Université Rennes 1	Rapporteur
	J. M. Dumas	Professeur	Université Limoges	Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

MM..	L. Bechou	Maître de Conférences	Université Bordeaux 1	Examineur
	O. Bonnaud	Professeur	Université Rennes 1	Examineur
	Y. Danto	Professeur	Université Bordeaux 1	Examineur
	J. M. Dumas	Professeur	Université Limoges	Examineur
	P. Fouillat	Professeur	Université Bordeaux 1	Président
	D. Laffitte	Ingénieur	AVANEX France	Examineur
	P. Richin	Ingénieur	Direction Générale de l'Armement	Membre invité
	D. Sauvage	Ingénieur	AVANEX France	Membre invité

*pour mes Parents,
à **MOR** mon éternel amour,
à **Flo et Déb**,
à ma grande famille,
et à Véro.*

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés à ALCATEL Optronics au sein du service Qualité Fiabilité dirigé par Madame **D. Laffitte** en collaboration avec le Laboratoire de microélectronique IXL de l'Université de Bordeaux 1 dirigé par Monsieur le Professeur **A. Touboul**.

Je suis infiniment reconnaissante à Madame **D. Laffitte** pour la confiance et le soutien qu'elle m'a témoigné tout au long de ces travaux de recherche. Je lui serai éternellement redevable... Mes remerciements s'adressent également à Monsieur le Professeur **A. Touboul**, qui m'a permis d'inscrire mon travail dans les meilleures conditions possibles dans le laboratoire IXL.

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.

Je suis particulièrement reconnaissante à Monsieur **P. Fouillat**, Professeur à l'Université Bordeaux 1, pour l'intérêt qu'il a porté à ces travaux et pour avoir accepté d'être président de ce jury.

Qu'il me soit permis d'exprimer ma sincère gratitude à Monsieur **O. Bonnaud**, Professeur à IETR de Rennes, 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 méthode et le sens du travail précis sont les qualités qui m'ont été transmises par Monsieur **L. Béchou**, codirecteur de cette thèse. Je lui adresse mes remerciements pour la confiance qu'il me témoigne, sa patience et pour sa participation à ce jury.

Je tiens à remercier Madame **M. Renaud**, Madame **P. Volto**, Madame **A. Panascot**, Monsieur **J. L. Goudard**, Monsieur **J. Y. Emery**, Monsieur **D. Keller**, Monsieur **J. Van de Cassel**, Monsieur **J. Coquet**, et Monsieur **M. Pommies**, et l'ensemble des personnes d'ALCATEL pour leur précieuse collaboration et leur intérêt pour mes travaux de recherche.

La totalité de ces travaux n'aurait pu aboutir sans l'aide et la volonté de Madame **Catherine Ollivier** et Madame **A. Denolle** qui m'ont continuellement soutenu. Qu'elles soient sûr de ma profonde reconnaissance et qu'elles soient assurées de ma sincère amitié.

Un grand merci à Messieurs **Y. Deshayes** et **L. Mendizabal** pour leur bonne humeur, leur soutien moral et leur appui technique tant au niveau théorique qu'expérimental.

Notre étude a été menée en collaboration avec ALCATEL Optronics, ALCATEL R&I et le Laboratoire IXL. Néanmoins, les divisions ALCATEL Optronics et ALCATEL R&I de l'entreprise ALCATEL CIT sont aujourd'hui regroupées sous une même entité AVANEX-France de l'entreprise AVANEX-USA.

Sommaire

Présentation générale	1
Chapitre 1 – Principe et architecture de l'amplificateur optique à semiconducteur –	
Contexte général et justification de l'étude.....	3
1/ CONTEXTE GENERAL.....	4
2/ TECHNIQUES D'AMPLIFICATION OPTIQUE.....	7
2.1/ Configuration générale des réseaux de transmission.....	7
2.2/ Composants pour l'amplification optique.....	11
2.3/ Comparaison entre les technologies d'amplificateur à fibre et d'amplificateur à semiconducteur.....	14
3/ CHAMP D'APPLICATIONS DE L'AMPLIFICATEUR OPTIQUE A SEMICONDUCTEUR.....	16
3.1/ Applications en régime linéaire.....	16
3.1.1/ Fonctionnement en amplification.....	16
3.1.2/ Fonctionnement en commutation.....	17
3.2/ Applications en régime non-linéaire.....	18
4/ PRINCIPE DE L'AMPLIFICATEUR OPTIQUE A SEMICONDUCTEUR.....	19
4.1/ Principe général de l'amplification à semiconducteur.....	19
4.2/ Rappels sur les propriétés physiques de l'émission des composés III-V.....	20
4.2.1/ Transitions radiatives.....	21
4.2.2/ Transitions non-radiatives.....	23
4.3/ Architecture générale du composant AOS.....	27
4.3.1/ Structure verticale : double hétérostructure.....	28
4.3.2/ Structure transversale : à ruban enterré.....	30
4.3.3/ Particularités structurelles d'un AOS.....	31
4.4/ Synthèse.....	35
5/ ELEMENTS GENERAUX DE FIABILITE - MODELES DE DEGRADATION.....	35
5.1/ Méthodes d'étude.....	35
5.2/ Cinétiques de dégradation.....	39
5.2.1/ Modèle d'Eyring.....	39
5.2.2/ Modèle d'Arrhénius.....	40
5.3/ Rappels sur les définitions de base.....	41
5.3.1/ Fonctions de fiabilité.....	41
5.3.2/ Lois de survie.....	44

5.4/ Approches d'estimation de la fiabilité en optoélectronique.....	45
5.5/ Synthèse.....	53
6/ CONCLUSION-OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	53

Chapitre 2 - Paramètres électriques et optiques d'un AOS – Description des moyens de

caractérisation.....	57
1/ INTRODUCTION.....	58
2/ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET PARAMETRES ELECTRO-OPTIQUES D'UN AOS..	58
2.1/ Caractéristiques physiques et principe de fonctionnement d'un AOS : comparaison avec une diode laser.....	59
2.1.1/ Rappels sur la diode laser.....	59
2.1.2/ Amplificateur optique à semiconducteur.....	63
2.2/ Caractéristiques électro-optiques d'un AOS.....	64
2.2.1/ Gain optique et gain fibre à fibre.....	65
2.2.2/ Saturation du gain fibre à fibre.....	70
2.2.3/ Figure de bruit.....	71
2.2.4/ Puissance de saturation.....	72
2.2.5/ Puissance optique ou puissance ASE.....	74
2.2.6/Courant-tension bas niveau.....	75
2.2.7/ Pseudo courant de seuil.....	76
2.2.8/ Spectre optique d'un AOS.....	76
3/ DESCRIPTION DES BANCS D'ANALYSE ELECTRO-OPTIQUE.....	80
3.1/ Description du banc de mesure TP057.....	81
3.1.1/ Schéma de principe de l'ensemble.....	81
3.1.2/ Description des véhicules de test utilisés.....	82
3.1.3/ Domaines d'application et caractéristiques d' analyse.....	82
3.1.4/ Fichier de mesure du TP057.....	83
3.2/ Description du banc de mesure TP082.....	84
3.2.1/ Schéma de principe de l'ensemble et spécifications.....	84
3.2.2/ Description du matériel.....	85
3.2.3/ Chronologie générale d'une mesure.....	86
3.3/ Description du banc de mesure GRC.....	89
3.4/ Etude des performances des bancs d'analyse électro-optique.....	91
3.4.1/ Résultats des mesures croisées.....	91
3.4.2/ Résultats des mesures de reproductibilité et de répétabilité (R&R).....	93
4/ CONCLUSION.....	95

Chapitre 3 - Etude des limites de la robustesse de l'amplificateur optique à semiconducteur

1,55 μm – Signatures de défaillance.....	97
1/ INTRODUCTION.....	98
2/ DEFAILLANCES DES DIODES LASER DE TECHNOLOGIE BRS : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	98
2.1/ Contexte et justification de la synthèse bibliographique.....	98
2.2/ Description des paramètres analysés sur les diodes laser BRS.....	102
2.3/ Résultats expérimentaux marquants issus de la synthèse bibliographique.....	106
2.3.1/ Etude structurelle de diodes laser BRS : apport de la modélisation physique.....	106
2.3.2/ Classification des modes de défaillance.....	108
2.3.3/ Apport de l'étude de la caractéristique I(V)–Intérêt du modèle électrique équivalent..	112
2.4/ Localisation des zones de dégradation.....	114
2.5/ Conclusion.....	115
3/ ANALYSE DES VIEILLISSEMENTS ACCELERES DES AOSs.....	116
3.1/ Chronologie et description générale de l'étude expérimentale.....	116
3.2/ Analyse des résultats expérimentaux.....	119
3.2.1/ Détermination des limites de robustesse de la technologie : résultats du lot 1.....	119
3.2.2/ Détermination des conditions optimales de déverminage : résultats du lot 2.....	125
3.2.3/ Tests de vieillissement accéléré : résultats du lot 3.....	130
3.2.4/ Synthèse des résultats obtenus : lot 1, lot 2 et lot 3.....	143
3.3/ Résultats expérimentaux du plan de qualification.....	144
3.3.1/ Caractéristiques des composants testés et paramètres suivis.....	144
3.3.2/ Conditions de test accéléré.....	145
3.3.3/ Analyse et discussion.....	146
4/ METHODOLOGIE DE PREVISION DE DUREE DE VIE.....	151
4.1/ Contexte de l'étude.....	151
4.2/ Principe de la méthode.....	152
4.3/ Résultats obtenus.....	153
5/ CONCLUSION.....	158

Chapitre 4 - Contribution des simulations physiques 2D à l'analyse des dégradations d'un

AOS.....	163
1/ INTRODUCTION.....	164
2/ DESCRIPTION ET RESULTATS DES ANALYSES DE DEFAILLANCE.....	165
2.1/ Contexte des techniques d'analyse utilisées.....	165
2.2/ Description des techniques d'analyse utilisées.....	166

2.2.1/ Electrolumiscence.....	166
2.2.2/ Cathodolumiscence.....	166
2.2.3/ Spectre d'électrolumiscence.....	167
2.3/ Résultats des analyses de défaillance.....	168
2.4/ Synthèse.....	180
3/ MODELISATION PHYSIQUE BI-DIMENSIONNELLE D'UN AOS.....	181
3.1/ Limitations des modélisations électriques sous IC-CAP.....	182
3.2/ Modélisation physique de l'AOS.....	184
3.2.1/ Méthode d'étude retenue pour la modélisation de l'AOS.....	185
3.2.2/ Hypothèses sur les modèles de transport.....	186
3.2.3/ Conditions optimales du maillage : Homojonction sur Silicium.....	187
3.2.4/ Validation des paramètres physiques : Homojonction InP(P)/InP(N).....	189
3.3/ Modélisation physique 2D de l'AOS transféré.....	191
3.3.1/ Conditions de simulation.....	191
3.3.2/ Résultats de modélisation.....	193
3.4/ Modélisation physique 2D de l'AOS transféré dégradé après vieillissement.....	202
3.4.1/ Méthode d'étude pour la modélisation de l'AOS dégradé.....	202
3.4.2/ Conditions de simulation.....	203
3.4.3/ Résultats de modélisation.....	204
3.4.4/ Synthèse des résultats de modélisation.....	204
3.4.5/ Synthèse des résultats de modélisation.....	206
4/ PROPOSITION D'UN PLAN DE TESTS EXPERIMENTAL COMPLEMENTAIRE.....	206
5/ CONCLUSION.....	207
Conclusion générale.....	209
Annexe A : Compléments de la caractérisation électro-optique de l'AOS.....	215
Annexe B : Compléments de la caractérisation électro-optique de l'AOS.....	217

Présentation générale

Depuis une vingtaine d'années, la très forte croissance du multimédia et des systèmes de communication à haut débit montrent que les moyens de transmission par fibre optique sont devenus indispensables. En effet, compte tenu de la bande passante et des pertes d'un câble cuivre, l'utilisation des câbles coaxiaux devient rédhibitoire. En effet, l'atténuation intrinsèque dans la bande 0,3 à 1,8 μ m, est bien plus faible pour la fibre optique. De plus, la fenêtre de transmission d'une fibre est très large ; plusieurs dizaines de THz répartis autour de 1,3 et 1,55 μ m, correspondant à un minimum d'atténuation pour une fibre en silice dopée à l'oxyde de germanium. Cette extraordinaire bande passante fait de la fibre optique un vecteur idéal pour les besoins multimédia. Cette tendance s'accroît chaque année (le débit quadruple tous les 4 ans) afin de mettre en place des liaisons intra et inter-systèmes à haut débit.

Deux avancées technologiques majeures sont à l'origine de la formidable progression en terme de rapidité des systèmes optiques : le multiplexage en longueur d'onde (WDM ou "Wavelength Division Multiplexing") et les amplificateurs optiques à fibre dopée Erbium (EDFA).

La technique de multiplexage WDM repose sur la propriété des fibres de supporter plusieurs longueurs d'onde, porteuse chacune de signaux indépendants. Cette technique est à l'origine de l'obtention d'un débit global (actuellement >Tb/s) dans une fibre unique. Ce signal est obtenu à partir de 40 canaux à 10Gb/s, où chacun est porté par une longueur d'onde différente espacée de 0,4nm.

Les EDFAs ont, quant à eux, permis de surmonter les limitations des régénérateurs électro-optiques en terme de débit. En raison de la complexité de l'électronique à mettre en œuvre, le coût de ces derniers devenait prohibitif pour des débits supérieurs à 5Gb/s. Une diode de pompage à 980nm est néanmoins indispensable pour créer le phénomène d'inversion de population des ions Erbium. De plus, le signal de pompe et le signal utile sont combinés dans la fibre par un multiplexeur en longueur d'onde.

La recherche permanente de gain optique supérieur à 20dB et une diversité fonctionnelle (applications en régime non-linéaire), parallèlement à une densité d'intégration croissante utilisant des procédés d'ingénierie épitaxiale stabilisés pour des dispositifs laser sur InP, ont conduit au développement *d'amplificateurs optiques à semiconducteur (AOSs)* de structure "bulk" ou à multi-puits quantiques (MQW). Ils sont identiques aux oscillateurs laser à semiconducteur excepté que les miroirs sont traités anti-réflexion afin de réduire les oscillations tout en conservant le gain optique du matériau de la zone active. La lumière incidente est amplifiée par le phénomène d'émission stimulé propre à une cavité laser résonante.

Compte tenu des avantages présentés par l'AOS, ALCATEL Optronics et ALCATEL R&I ont souhaité intégrer celui-ci, dans le cadre du projet TIPOR, dans les systèmes de transmission haut débit pour des applications d'amplification "booster" en ligne, commutation ou sélection "tout optique" et

conversion en longueur d'onde. La première phase du projet (RDR1) a naturellement consisté en la réalisation technologique d'amplificateurs et l'optimisation des procédés de fabrication associés. En 2001, une deuxième étape (RDR2) a pris le relais afin de développer puis fabriquer l'AOS à l'échelle d'un système de production. Cette dernière phase a nécessité, une évaluation de la fiabilité et des mécanismes de dégradation des AOS transférés du centre de recherche vers le site de production.

C'est dans ce cadre qu'une thèse a été entreprise, sous la forme d'un contrat CIFRE, concernant l'étude de la fiabilité d'amplificateurs optiques $1,55 \mu\text{m}$ sur composés semiconducteurs InGaAsP/InP, intégrant un guide passif et des adaptateurs de modes, reporté sur embase AlN. Les objectifs de notre étude ont été élaborés en collaboration entre ALCATEL Optronics, ALCATEL R&I et le Laboratoire IXL pour définir et optimiser le plan de qualification de l'AOS en vue d'une future commercialisation.

Le travail, mené dans le cadre de cette thèse, s'est articulé autour de quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** procède à un rappel des propriétés physiques de l'émission optique dans les semiconducteurs et détaille les principes physiques et les spécificités relatives à l'architecture technologique d'un AOS en comparaison d'une diode laser. Différents dispositifs d'amplification optique sont présentés en s'attachant à comparer les performances d'un AOS avec celles d'un EDFA. Les modèles physiques à la base de l'étude de la fiabilité des composants sont rappelés.
- **Le second chapitre** présente les mécanismes physiques mis en jeu dans un AOS et les résultats des caractérisations électriques et optiques expérimentales. Les bancs de caractérisation associés, développés par ALCATEL Optronics, ALCATEL R&I et le Laboratoire IXL, ainsi que les performances de chacun d'eux sont également précisés.
- **L'objectif du troisième chapitre** réside en l'étude de la qualification et des marges de robustesse technologique d'un AOS. Ce chapitre s'articule autour de deux axes. La première partie propose une synthèse bibliographique sur les mécanismes de dégradation de diode laser à ruban enterrée (BRS) $1,55 \mu\text{m}$, technologie proche de celle de l'AOS. La seconde partie consiste en l'extraction expérimentale de signatures de défaillance, à partir de l'application de contraintes échelonnées en température et en courant lors des tests de vieillissement accéléré sur différents lots. La constitution d'hypothèses, relatives à l'identification des paramètres électriques et optiques pertinents des AOSs et des mécanismes de dégradation observés, est réalisée. A partir de l'extrapolation de lois de dégradation sur les composants issus des tests de qualification, une distribution du taux de défaillance et de durées de vie des AOSs sera estimée à partir d'une approche originale basée sur la méthode Monte-Carlo.
- **Le dernier chapitre** synthétise les résultats relatifs aux analyses de défaillance des AOSs dégradés des différents lots et il prolonge l'analyse des mécanismes de défaillance, détectés dans le chapitre 3, par une étude basée sur la simulation physique 2D prenant en compte les étapes de fabrication de l'AOS. L'apport des simulations permet de quantifier et de corrélérer l'impact de la dégradation de paramètres physiques sur l'évolution des courbes I(V) des AOSs, observées dans le chapitre 3.

Chapitre 1

Principe et architecture générale d'un
amplificateur optique à semiconducteur –
Contexte général et justification de l'étude

1/ CONTEXTE GENERAL

Malgré la conjoncture de crise économique apparue après une croissance sans précédent depuis 1996, le secteur de l'optoélectronique reste un secteur clé pour des applications de la microélectronique. Concernant les télécommunications par fibre optique, les investissements réalisés, ces dernières années, ont doté ce secteur d'une base technologique très forte conduisant même à un surdimensionnement en bande passante. Néanmoins au niveau mondial, les activités de recherche et de développement (R&D) se poursuivent linéairement sur des thématiques fortes comme l'accordabilité, le haut-débit (40 Gbits/s), les sources (VCSELs), l'amplification, la commutation, l'assemblage et l'encapsulation. L'apparition, en 1962, de la première source Laser à semiconducteur reste la première innovation majeure dans la progression continue des technologies associées à ce domaine. Ces dix dernières années, les réseaux de télécommunications ont particulièrement permis le développement des technologies multimédia. Par conséquent, de par l'architecture spécifique des réseaux de télécommunication, dont un synoptique très schématique est présenté en figure 1, la demande d'approvisionnement du marché en fibres optiques et en composants optoélectroniques, a fortement augmenté de manière constante au cours des dix dernières années [1, 2].

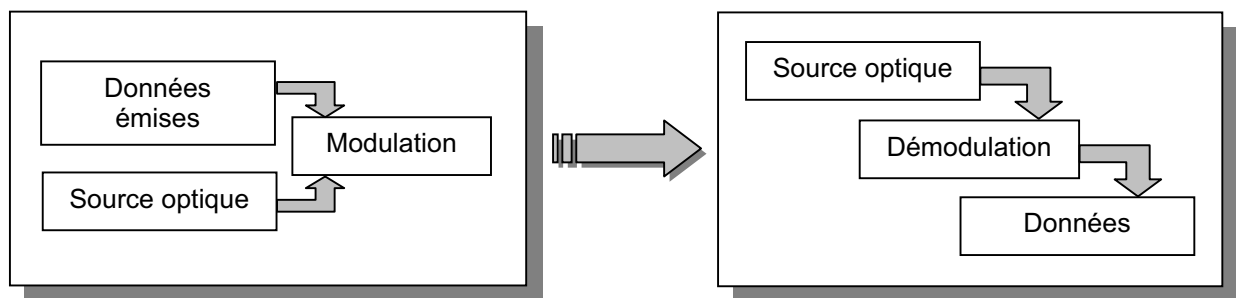


Figure 1 : Synoptique général d'un système de communications à longue distance par fibre optique

La R&D dans les télécommunications s'est particulièrement focalisée sur deux sujets de préoccupation majeure : l'augmentation possible du débit d'informations transmises (par des techniques de multiplexage de données) et l'extension de la distance de transmission des signaux optiques avec une recherche de solutions bas coûts [3, 4]. Afin de pouvoir augmenter le débit de transmission et d'atténuer les principales limitations de l'extension des distances entre un émetteur et un récepteur, conjointement représentées par les phénomènes de dispersion et d'atténuation et les phénomènes non-linéaires apparaissant à haut débit dans les fibres optiques, plusieurs types de répéteurs sont apparus. En effet, ces composants, placés dans une ligne de transmission, permettent de ré-amplifier le signal optique en ligne quand celui-ci devient trop faible lorsque la distance parcourue de ce signal est supérieure à 80km. De plus, lorsqu'ils sont placés en parallèle, en début et en fin de ligne de transmission, ils autorisent la faisabilité d'un débit plus important d'informations acheminées.

Dans les années 80, la première ligne de télécommunication sous-marine, très longue distance, par fibre optique a été expérimentée. La première liaison commerciale est, quant à elle, mise en œuvre durant l'année 1986. Les premiers répéteurs sont alors principalement constitués de circuits électroniques nécessitant la conversion optique/électronique en entrée puis la régénération électronique/optique en sortie du signal optique transmis. Ces répéteurs sont responsables de l'introduction d'un bruit non négligeable dans les transmissions des signaux optiques constituant une limitation de la distance de transmission, sans répéteur, due à la sensibilité du récepteur au rapport signal/bruit. De plus, les circuits électroniques utilisés, par la nécessité de la conversion des informations transmises, limitent nécessairement le débit de transmission possible.

L'évolution technologique, dans les années 90, a permis l'avènement des répéteurs ou amplificateurs de seconde génération "tout optique". La transmission du signal ne nécessite donc plus aucune conversion électronique-optique favorisant ainsi l'évolution vers un routage "tout optique" du signal incident. Ce type de transmission a largement bouleversé le domaine des télécommunications car celle-ci permet d'envisager des débits et des distances de transmission jusque-là difficilement accessibles. L'évolution des techniques d'amplification des signaux optiques dans le domaine des télécommunications est résumée dans le tableau 1. De plus, l'évolution globale des capacités de transmission à travers une fibre optique, qui se mesurent en [débit d'information] x [distance de transmission] permet d'étendre l'ensemble des réseaux de télécommunication par fibre optique. En effet, la figure 2 montre que, depuis 30 ans, la capacité de transmission a été multipliée par 10 tous les 4 ans.

Années	1980-1990	1990-1999	>2000
Techniques d'amplification	Electronique	Electronique/Optique	Optique

Tableau 1 : Evolution générale des techniques d'amplification de signaux optiques

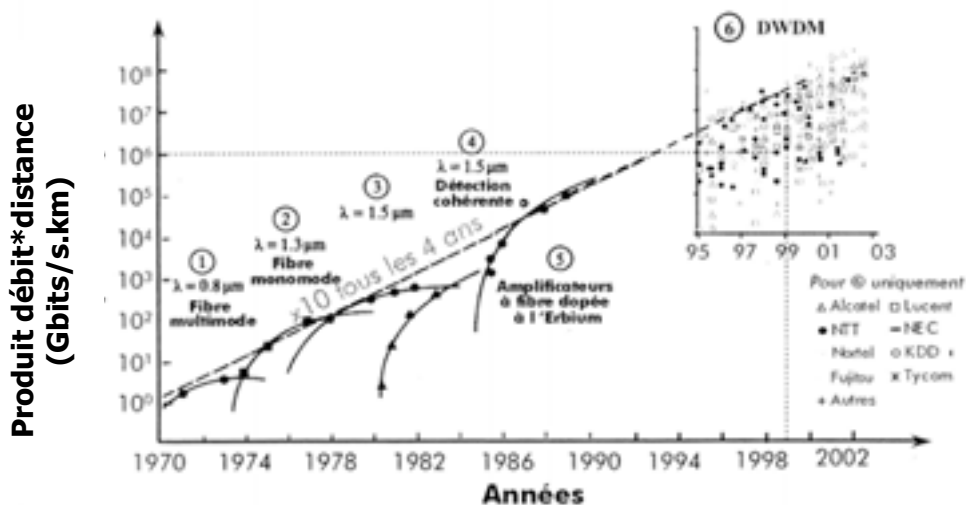


Figure 2 : Evolution de la capacité des transmissions optiques [66]

Il existe différentes technologies, présentées dans le prochain paragraphe, mises en œuvre dans le cadre d'un processus d'amplification "tout" optique et l'augmentation de débit de données transmissibles dans un contexte de multiplexage des données de la source :

- les amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA, "Erbium Doped Fiber Amplifier") [5, 6],
- l'amplification Raman et les EDWAs (EDWA, "Erbium Doped Waveguide Amplifier") [7, 8],
- les amplificateurs optiques à semiconducteur (AOS ou SOA, "Semiconductor Optical Amplifier") [9, 10].

La diversité des composants existants est liée au fait que ces amplificateurs optiques doivent répondre à plusieurs critères dont trois exemples sont cités ci-dessous :

- un débit disponible supérieur ou égal au Gbits/s,
- une large bande spectrale afin de pouvoir augmenter si nécessaire le débit de données transmissibles,
- des composants à forte densité d'intégration dans le but d'une fabrication de composants hybrides, notamment pour des applications sous-marines.

L'ensemble des critères précédents sera détaillé par la suite montrant que les caractéristiques des différents moyens d'amplification optique correspondent ou non à ces critères. Deux composants seront plus particulièrement développés dans le prochain paragraphe : l'EDFA et l'AOS. En effet, de par leurs performances, l'EDFA (faible figure de bruit, fort gain ou puissance de sortie) et l'AOS (réalisation de fonctions linéaires ou non-linéaires à forte densité d'intégration), occupent une place importante dans le marché des composants pour les télécommunications [11, 12]. Ce premier chapitre situe, tout d'abord, le contexte actuel du marché de l'amplification optique et donne une description, relativement exhaustive, du champ d'applications d'un AOS. Dans une seconde partie, la technologie de l'AOS transféré du Centre de Recherche d'ALCATEL CIT vers le site de production (ALCATEL Optronics) est présentée de manière détaillée et les phénomènes physiques associés à ce composant sont rappelés. En effet, l'objectif principal de ces travaux de thèse consiste en l'analyse des mécanismes de dégradation et l'évaluation de la fiabilité de l'amplificateur optique à semiconducteur unitaire reporté par brasure sur son embase AIN ; l'étude de son principe de fonctionnement reste donc primordiale. Des éléments généraux de fiabilité, tels que les modèles génériques de dégradation, sur lesquels repose l'interprétation de l'impact des vieillissements accélérés, la détermination du facteur d'accélération et l'estimation de la durée de vie des composants sont ensuite décrits. Les principales fonctions mathématiques utilisées pour l'évaluation de la fiabilité en conditions opérationnelles (validation des profils de mission et d'un critère de défaillance pertinent) d'un composant électronique sont également rappelées [13, 14].

En fin de chapitre, la gestion actuelle de la fiabilité de composants dans un cadre industriel (processus de qualification) et son lien avec l'étude des mécanismes de dégradation de ces composants, ainsi que le contexte et les objectifs de ces travaux de recherche, sont développés.

2/ TECHNIQUES D'AMPLIFICATION OPTIQUE

2.1/ Configuration générale des réseaux de transmission

En raison de la progression constante de l'étendue géographique des transmissions optiques dans les réseaux de télécommunications, ceux-ci ont été classés en trois types distincts. La distance de transmission les caractérise. On distingue, pour le réseau européen de télécommunications :

- le réseau local dont la distance de transmission est inférieure à 10km, nommé : Accès ("Short Haul"),
- le réseau métropolitain avec une distance de transmission comprise entre 10km et 80km, nommé Métro ("Long Haul"),
- le réseau de transmission structurant basé sur une distance de transmission est supérieure à 80km, nommé : structurant ("Long Haul" et "Ultra-long Haul").

L'ensemble de la communauté des télécommunications s'accorde avec la globalité de ces définitions. Par contre, les limites de ces trois réseaux peuvent varier en fonction des applications considérées et selon les critères de sélection considérés : connexions ou actions réalisées dans le réseau considéré ou encore distances de transmission.

Néanmoins, les réseaux de transmission existants sont définis, universellement, par la juxtaposition de deux technologies numériques plésiochrone et synchrone (PDH "Plesiochronous Digital Hierarchy" et SDH "Synchronous Digital Hierarchy"). Pour les télécommunications optiques, le débit de transmission de données par fibre optique, dont les niveaux sont organisés hiérarchiquement en STM-n ("Synchronous Transport Module"), a imposé l'utilisation des recommandations du standard SDH.

SDH	Débit
STM-1	155Mbits/s
STM-4	622Mbits/s
STM-16	2,5Gbits/s
STM-64	10Gbits/s
STM-256	40Gbits/s

Tableau 2 : Débits normalisés du standard SDH [67, 68]

➤ Réseau local

Le réseau local, nommé réseau d'accès est constitué d'éléments compris entre le réseau métropolitain et le terminal de l'utilisateur. Pour ce réseau, une question technologique principale se pose : faut-il équiper tout ce réseau uniquement en fibre optique ?

En effet, la diminution du coût de la fibre optique et des composants optoélectroniques conjuguée à l'accroissement des exigences d'un réseau moderne, capable d'assurer disponibilité, qualité, évolutivité et réactivité, justifient l'introduction de la fibre optique dans ce réseau.

Néanmoins, le choix technologique entre la fibre optique et la technologie cuivre reste d'actualité. En effet, ce dernier est en exploitation depuis des années pour les liaisons téléphoniques et permet également la transmission de données pour les réseaux d'accès. Il ne nécessite donc pas, contrairement à la fibre optique, de frais d'installation supplémentaires.

➤ Réseau métropolitain

Pour le réseau métropolitain, la préoccupation majeure est différente : augmenter les débits de transmission possibles. En effet, les systèmes actuels implantés travaillent essentiellement à la longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$ avec des débits de transmission de l'ordre de 2,5Gbits/s. L'objectif visé est d'atteindre 40Gbits/s pour des boucles de transmission de l'ordre de 10km. La figure 3 illustre le système de transmission par fibre optique des réseaux locaux et métropolitains.

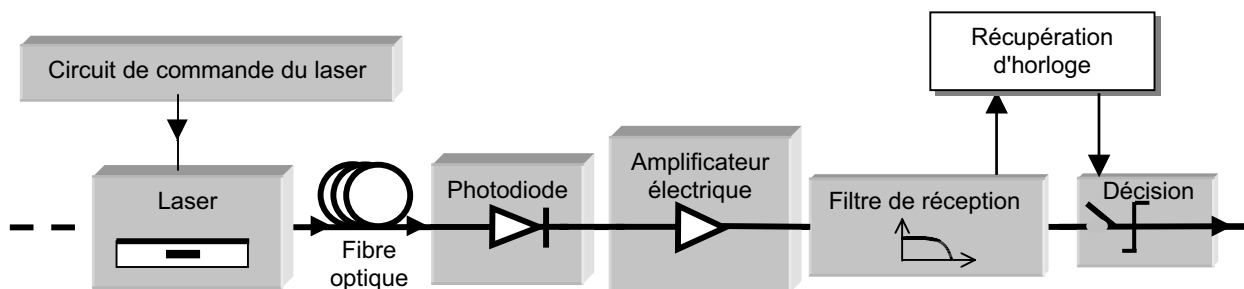


Figure 3 : Synoptique d'un système de télécommunications des réseaux locaux et métropolitains [15]

➤ Réseau structurant : apport de la technologie WDM

Le lien entre le réseau métropolitain national et les réseaux internationaux est le réseau structurant. L'ossature du réseau structurant est constituée par les réseaux dits d'interconnexion dont les nœuds sont les très grands centres urbains ainsi que les points de contact avec le réseau international. Dans le but d'augmenter les débits de transmission du réseau structurant, différentes techniques de multiplexage des signaux optiques ont été développées :

- Multiplexage temporel

Jusqu'au début des années 90, le réseau structurant reposait sur les systèmes de transmission utilisant le multiplexage temporel (TDM, "Time Division Multiplexing") pour un débit de transmission maximum de 40Gbits/s sur une seule longueur d'onde.

Cette technique consiste à intercaler entre eux plusieurs trains de signaux numériques de fréquence moins élevée que le signal principal transmis. Cette technique requiert alors la synchronisation de ces différents signaux qui est difficile à gérer pour des très hauts débits.

- Multiplexage de longueurs d'onde

Aujourd'hui, tous les nœuds, constituant le réseau structurant, sont reliés entre eux par des systèmes de transmission de nouvelle génération WDM (Wavelength Division Multiplexing) ou DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), mettant en œuvre le multiplexage de longueurs d'onde [4, 23, 25]. En effet, les technologies WDM et DWDM consistent à injecter, dans une fibre optique, plusieurs trains de signaux numériques (ou canaux) à la même vitesse de modulation mais à différentes longueurs d'onde. Chaque signal optique étant une porteuse, la capacité d'informations transmise sur la liaison est alors d'autant plus grande que le nombre de canaux est important. Dans une liaison, n canaux à la fréquence de modulation F issus des sources d'émission sont multiplexés et injectés simultanément dans une fibre optique. Après propagation et amplification dans la fibre, le signal optique global au débit $n \times F$ sortant de la fibre est démultiplexé en ses n canaux initiaux. Le démultiplexage est nécessaire car les récepteurs travaillent en large bande et sont, par conséquent, incapables d'isoler un canal parmi n (figure 4). La norme internationale ITU-T G 692 a défini l'espacement minimum entre deux longueurs d'onde transmises. La technique de transmission WDM est utilisée dans le cas d'un encombrement spectral limité à 100GHz et composé de 32 canaux optiques. En revanche, la technique de transmission DWDM est privilégiée dans le cas d'un encombrement spectral plus restreint (de 100GHz à 50GHz) mais composé de 196 canaux optiques.

- Multiplexage de sous porteuses

Une autre technique de multiplexage de longueurs d'onde est le multiplexage de sous porteuses (SCM, "Subcarrier Multiplexing"). Celui-ci consiste en un multiplexage en deux étapes. Les messages générés par des grappes d'utilisateurs géographiquement proches sont d'abord multiplexés en fréquence (FDM, "Frequency Division Multiplexing") dans le domaine hyperfréquence. Le spectre ainsi obtenu vient alors moduler les diodes laser émettant à la longueur λ_i . Les systèmes de transmission optique opèrent actuellement à la longueur d'onde de 1,55 μ m avec des fibres optiques dont le débit varie de 2,5Gbits/s à 200Gbits/s. Le réseau structurant a pu être ainsi déployé grâce à la naissance des amplificateurs optiques pour pallier à la dispersion et l'atténuation dans les fibres optiques. Ces amplificateurs sont placés à des pas de 40km pour des débits de 10Gbits/s et à des pas de 80km à 100km pour des débits de 2,5Gbits/s. Ceux-ci permettent donc d'augmenter les distances de transmission [15, 16]. La figure 4 illustre le système de transmission par fibre optique des réseaux structurants.

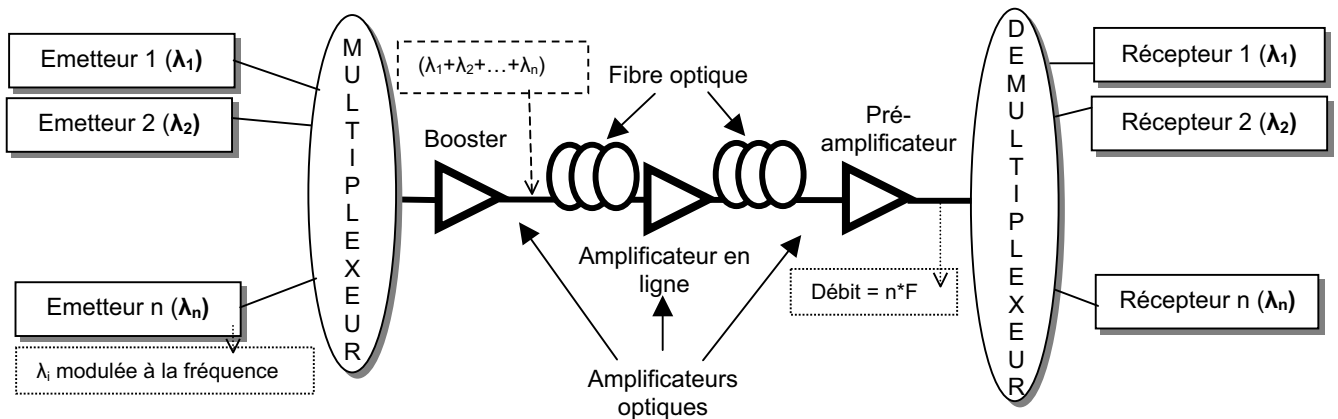


Figure 4 : Synoptique général d'un système de télécommunications optiques pour un réseau structurant (Technique WDM)

Afin d'améliorer les performances du réseau structurant, quatre techniques d'amplification optique, ont donc été développées : les EDFAs, l'amplification Raman, les EDWAs et les AOSs [5, 7, 8, 9].

Suite à leurs avènements, de nombreuses recherches concernant les applications possibles de toutes ces technologies ont été menées. Une étude du marché, réalisée en 2000, concernant ces technologies, révèle clairement l'essor de ce marché avec un chiffre de vente de 15,5 milliards de dollars pour l'année 2000. Suite à la crise dans le domaine des télécommunications, ce chiffre a nettement chuté, par la suite, pour se stabiliser à 1,2 milliards de dollars au cours de l'année 2003 pour la généralité des composants optoélectroniques [1]. Cependant, aujourd'hui, même si ce chiffre fait partie de la réalité économique actuelle, la demande constante des consommateurs de l'augmentation de la capacité de transmission (figure 2) montre que l'ensemble des technologies des réseaux de télécommunications par fibre optique reste le plus compétitif entraînant ainsi le développement nécessaire des amplificateurs optiques. Dans ce marché, parmi les principaux fabricants de l'ensemble de ces technologies, on peut citer, à titre d'exemple : Avanex et JDSU qui commercialisent des EDFAs, Nortell, Avanex et JDSU commercialisent des modules Raman et les AOSs sont actuellement commercialisés par Avanex, Genoa et Kamelian.

Dans le but de situer l'AOS dans le cadre des télécommunications "tout optique", une synthèse des méthodes d'amplification optique ainsi qu'une comparaison entre ce composant et le composant EDFA, composant le plus utilisé, car le plus mature technologiquement dans le domaine de l'amplification optique, sont présentées dans ce paragraphe et permettront donc de conclure quant à l'intérêt de l'utilisation des AOSs dans ce domaine [17].

2.2/ Composants pour l'amplification optique

Les différents moyens d'amplification optique, dans le cadre des télécommunications autour de $1,55\mu\text{m}$ cités ci-dessus, ont été développés dans l'objectif de garantir une amplification optique du signal incident en ligne optimale. Cet objectif est atteint lorsque les systèmes autorisent :

- un fort gain d'amplification (supérieur à 20dB),
- un fort rapport signal sur bruit transmis (proche de 8dB),
- une possibilité d'amplification sur une large bande spectrale (supérieure à 30nm).

Cependant, les études menées sur ces technologies (EDFA, Raman, EDWA et AOS) ont montré qu'elles diffèrent dans leurs modes de fonctionnement et leurs performances [5, 7, 8, 9]. Suivant l'application envisagée, le choix du composant employé sera donc fonction de l'adéquation entre ses performances et celles nécessaires à l'application considérée. Le principe de fonctionnement et les performances des technologies EDFA, EDWA, Raman et AOS sont respectivement décrits ci-dessous.

➤ Composant EDFA

Le support d'amplification de la technologie EDFA est une fibre dopée par une petite quantité d'ions terre rare Erbium. Elle utilise un laser de pompe pour apporter l'énergie nécessaire et exciter les ions Erbium (inversion de population ou pompage optique) de la fibre.

Après pompage, l'ion terre rare dans la fibre se trouvant dans un niveau d'énergie élevé tend à revenir vers un état d'énergie plus faible en restituant cette énergie sous forme de photons. Ces photons sont émis de manière stimulée à une longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$: le cœur de la fibre devient alors un milieu amplificateur, et génère ainsi l'amplification "tout optique" du signal d'entrée [18, 19]. Cette technologie, fabriquée et implantée dans les lignes de transmission depuis plus de 10 ans, est un produit technologiquement mature. La figure 5 illustre la technologie EDFA dont les éléments associés à la fibre dopée Erbium (isolateurs, coupleurs, et laser de pompe) sont identiques à ceux associés aux technologies EDWAs et à effet Raman.

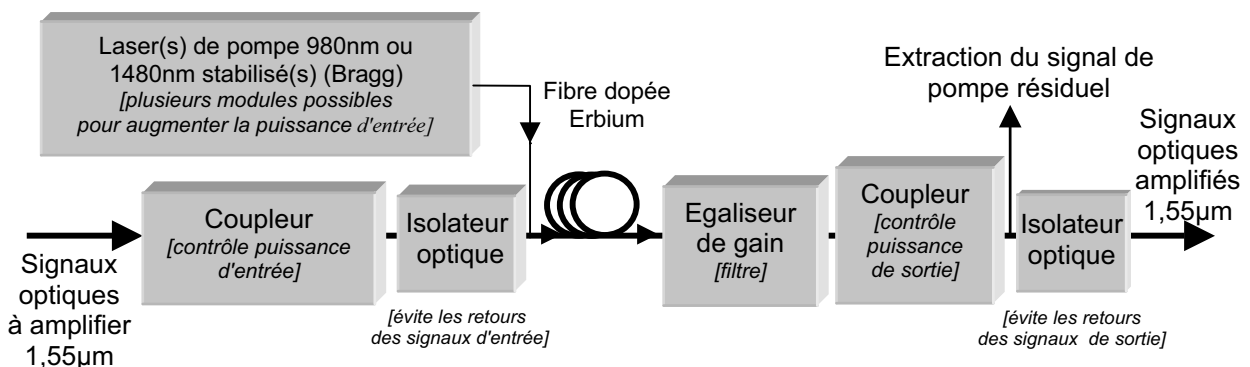


Figure 5 : Schématisation du fonctionnement d'un amplificateur EDFA

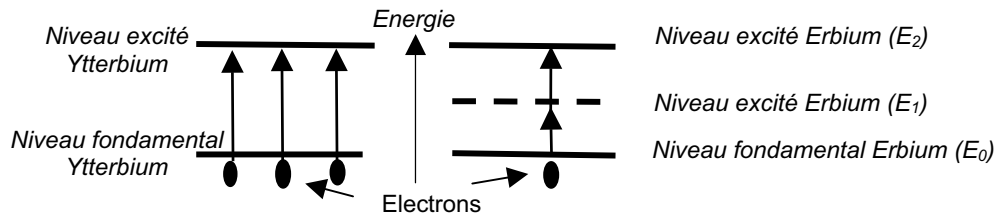
➤ *Composant EDWA*

La technologie EDWA correspond à une appellation déposée par le fabricant Teem Photonics. La technologie EDWA présente un mode de fonctionnement dont le support d'amplification est la fibre optique et elle dérive de la technologie EDFA. Celle-ci est constituée d'un guide d'onde, dopé à l'Erbium et à l'Ytterbium. En l'absence de toute excitation extérieure, les ions Erbium et Ytterbium se trouvent sur leurs niveaux fondamentaux. Lors du processus d'amplification optique, le pompage électrique (absorption d'énergie extérieure) conduit les ions Ytterbium à un niveau d'énergie supérieure. Ce niveau correspond également au niveau d'énergie supérieure dans lequel se situe l'ion Erbium également excité. Les ions Ytterbium et Erbium se trouvent alors dans un état instable. Ceux-ci tendent donc à revenir vers un état d'énergie plus faible en se désexcitant sur le niveau d'énergie inférieur des ions erbiums : phénomène de relaxation sans émission d'un photon. Le retour à l'état stable se fait sous forme d'émission stimulée sous l'action de photons incidents [8, 18]. Le cœur de la fibre constitue alors un milieu amplificateur de lumière. La figure 6 présente le principe de l'amplification optique de la technologie EDWA. Cette technologie a donc été développée à partir de la technologie EDFA avec pour objectif principal de réduire la taille du module EDWA par rapport à celle du module EDFA. Cet objectif est atteint car la taille de ce composant est cinq fois inférieure à celle d'un EDFA. En effet, leur réalisation à partir de substrat de verre permet l'intégration dans un seul module des éléments nécessaires à son fonctionnement : laser de pompe, multiplexeur, coupleur, filtre... Cette technologie présente un autre avantage : elle permet de réduire les coûts par rapport à une technologie silicium nécessitant la mise en place d'un procédé de fabrication plus lourd.

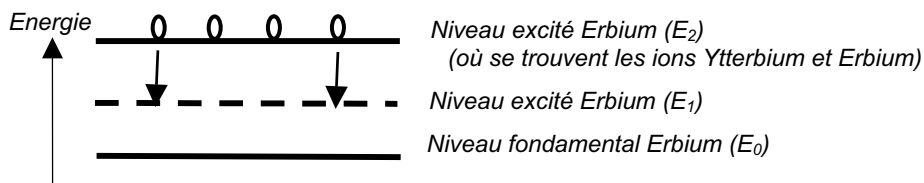
Toutefois, cette technologie a les mêmes inconvénients que celle d'un EDFA : elle ne possède pas une large bande spectrale (de l'ordre de 30nm), nécessaire à l'augmentation des débits de données transmissibles [18, 20].

De plus, la solution technologique EDWA n'ayant pas été développée pour des applications industrielles visées, elle est donc peu implantée dans les réseaux de télécommunications. De ce fait, la technologie EDWA n'est, d'un point de vue technologique, pas complètement mature.

Etape 1 : Pompage électrique (apport d'énergie par laser de pompe)



Etape 2 : Relaxation non-radiative



Etape 3 : Emission stimulée

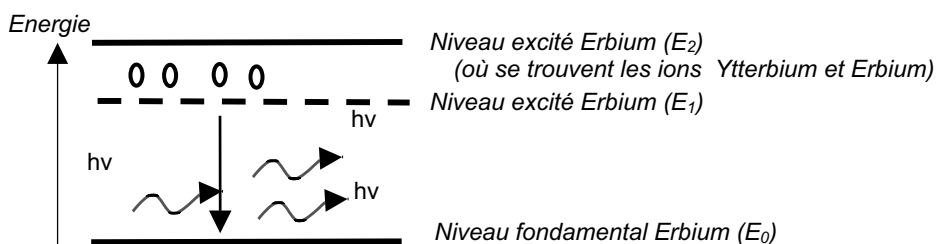


Figure 6 : Schématisation du fonctionnement de la technologie EDWA

➤ **Module d'amplification Raman**

Le processus d'amplification Raman utilise les propriétés intrinsèques d'une fibre en silice pour amplifier le signal optique incident. En effet, lors du processus d'amplification optique, le pompage optique (laser de pompe de longueur d'onde de 1480nm) conduit les électrons de la fibre à un niveau d'énergie supérieure : état de transition. Les électrons se trouvent alors dans un état instable. Ceux-ci tendent donc à revenir vers un état d'énergie plus faible en se désexcitant sur le niveau d'énergie inférieure : état de vibration où l'émission stimulée a lieu grâce aux photons incidents émis par le laser de pompe. Puis, le retour à l'état fondamental se fait sous la forme d'émission d'un phonon appelé phénomène de relaxation. Le cœur de la fibre constitue alors un milieu amplificateur [7, 18]. La figure 7 schématise le principe de l'amplification optique par le processus d'amplification Raman.

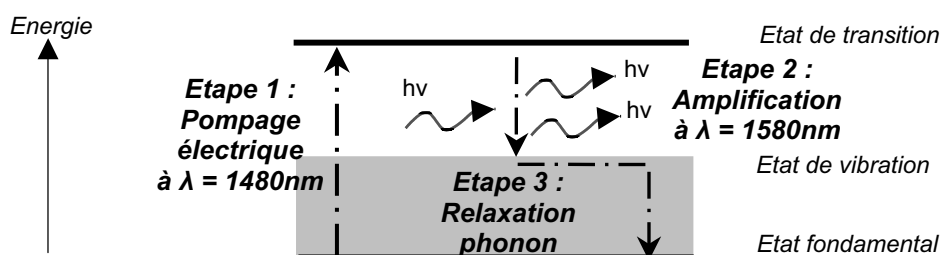


Figure 7 : Schématisation du fonctionnement de l'amplification Raman

L'inconvénient de cette amplification réside dans le fait que le gain de la fibre dépend fortement de la puissance du laser de pompe ; pour obtenir un gain élevé, une importante puissance de laser de pompe est alors nécessaire [18]. De plus, les modules d'amplification Raman nécessitent l'utilisation de composants actifs et passifs (laser de pompage, filtre...) ne favorisant pas une intégration accrue.

⇒ *Amplificateur optique à semiconducteur (AOS)*

Un AOS est un composant qui permet l'amplification de la lumière incidente par émission stimulée dans un matériau semiconducteur. La figure 8 présente le schéma simplifié d'un AOS. Pour se placer dans les conditions d'amplification optique, un pompage électrique est nécessaire et il est réalisé grâce à une jonction PN (hétérostructure), brique de base d'un AOS, polarisée en direct permettant alors l'inversion de population au sein de ce composant [21, 22]. La technologie AOS ressemble donc fortement à celle des diodes laser. L'ensemble de ces notions sera détaillé dans la suite de ce chapitre (cf paragraphe 4). La comparaison entre un AOS et l'EDFA, effectuée ci-dessous, va permettre d'achever la description de ces deux composants mais également de constater les avantages et les inconvénients de chacun d'eux.

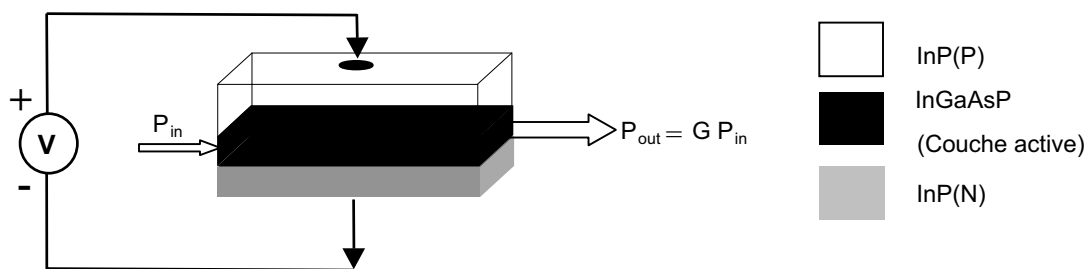


Figure 8 : Schématisation du fonctionnement de la technologie AOS

2.3/ Comparaison entre les technologies d'amplificateur à fibre et d'amplificateurs à semiconducteur

Aujourd'hui, la technologie EDFA étant la plus utilisée des technologies, en terme d'applications, par rapport aux technologies EDWA et Raman, on procède alors, dans le cadre de ces travaux de recherche, uniquement à la comparaison entre les technologies EDFA et AOS.

Deux constats s'imposent : les EDFAs sont considérés comme les composants les plus adaptés pour la régénération en ligne des signaux transmis par fibre optique car ils possèdent de nombreux avantages [18, 20] :

- leur gain est très important (de l'ordre de 35dB) : généralement équivalent au double du gain d'un AOS, permettant une amplification du signal incident beaucoup plus forte,
- leur puissance de saturation est beaucoup plus élevée : environ deux fois plus élevée pour un EDFA que pour un AOS, le régime de saturation et ses effets non-linéaires de l'EDFA ne se produisent donc qu'à très forts niveaux de courant,

- leur figure de bruit est moindre : deux fois moins importante pour un EDFA que pour un AOS, permettant une transmission du signal incident moins bruitée.

Cependant, les EDFAs révèlent une faible densité d'intégration (150mm×250mm) contre (10mm×15mm) pour les AOSs. Les AOSs ont donc une plus haute densité d'intégration lors de la fabrication de systèmes hybrides, atout certain dans le domaine des télécommunications comme, par exemple, dans les applications sous-marines.

De plus, la grande largeur spectrale de gain d'un AOS (jusqu'à 60nm pour un AOS et seulement 30nm pour un EDFA), autorise, par exemple, du multiplexage en longueur d'onde à 8 canaux avec des débits de transmission de 40Gbits/s [23, 24].

Afin de conclure quant aux performances de chacune des technologies permettant l'amplification optique et dans l'objectif de lister les avantages et les inconvénients de celles-ci, le tableau 3, présenté ci-dessous, dresse une comparaison de ces quatre techniques d'amplification optique différentes. Les grandeurs moyennes recensées dans ce tableau sont données à titre indicatif pour des conditions de fonctionnement optimums. Elles sont également susceptibles d'évoluer suivant les fabricants de ces modules et les applications pour lesquelles ils sont utilisés. De plus, les technologies Raman, EDWA et AOS étant récentes, des améliorations possibles de leurs performances sont à envisager dans un proche avenir.

Le tableau 3 permet de constater que les performances des EDFAs et EDWAs sont généralement supérieures à celles des AOSs et des modules Raman. Il paraît aujourd'hui difficile, pour les AOSs, malgré la forte densité d'intégration qu'ils présentent, de remplacer totalement les EDFAs [18, 25]. Néanmoins, par son comportement non-linéaire et sa densité d'intégration inégalée, l'AOS trouve sa spécificité dans la commutation optique à haut débit, notamment comme porte optique ou modulateur de gain.

	RAMAN	EDFA	EDWA	AOS
<i>Taille moyenne [par rapport à celle de l'AOS]</i>	×200	×100	×20	×1
<i>Gain maximum</i>	11dB	35dB	35dB	20dB
<i>Rapport signal/bruit</i>	4dB	4dB	4dB	8dB
<i>Puissance de saturation en sortie</i>	Egale à la puissance de l'onde de pompe	13dBm	13dBm	10dBm
<i>Bande spectrale</i>	50nm	30nm	30nm	60nm
<i>Densité d'intégration</i>	Faible	Faible	Faible	Très forte

Tableau 3 : Grandeurs caractéristiques associées aux différentes techniques d'amplification optique

Parmi les avantages de l'AOS, nous pouvons citer :

- sa compatibilité avec les autres composants laser à semiconducteur,
- sa réponse rapide lors du pompage optique (en regard de la réponse lente, de l'ordre de la microseconde, d'un amplificateur EDFA), autorise des fonctions logiques dont le temps de commutation est de l'ordre de la nanoseconde,
- sa non-linéarité optique permet d'envisager des applications telles le multiplexage ou la conversion de longueur d'onde.

L'ensemble de ces différentes applications vont être détaillées dans le prochain paragraphe.

3/ CHAMP D'APPLICATIONS DE L'AMPLIFICATEUR OPTIQUE A SEMICONDUCTEUR

Après avoir effectué une étude comparative des technologies Raman, EDFA, EDWA et AOS et mis en évidence les avantages de la technologie sur semiconducteur, une synthèse sur les diverses applications d'un AOS, linéaires ou non linéaires, est maintenant présentée. Quelques exemples de ces applications sont explicités ci-dessous.

3.1/ Applications en régime linéaire

3.1.1/ Fonctionnement en amplification

En régime linéaire, ce composant est exploité pour deux fonctions différentes :

- amplificateur de puissance en entrée d'une fibre optique ("Booster"),
- préamplificateur faible bruit en amont d'un détecteur.

L'application "Booster" permet d'amplifier, à la sortie de l'émetteur, l'onde optique incidente. Alors que le préamplificateur AOS s'utilise dans les systèmes fonctionnant à 1,3 μ m ou 1,55 μ m dans lesquels celui-ci permet l'amplification de l'onde incidente juste avant la détection de celle-ci en entrée du récepteur. Quelle que soit l'une ou l'autre de ces deux applications, illustrées en figure 9, l'AOS, préamplificateur ou "Booster", permet ici d'améliorer le rapport signal sur bruit de la transmission sur le réseau structurant [21, 26].

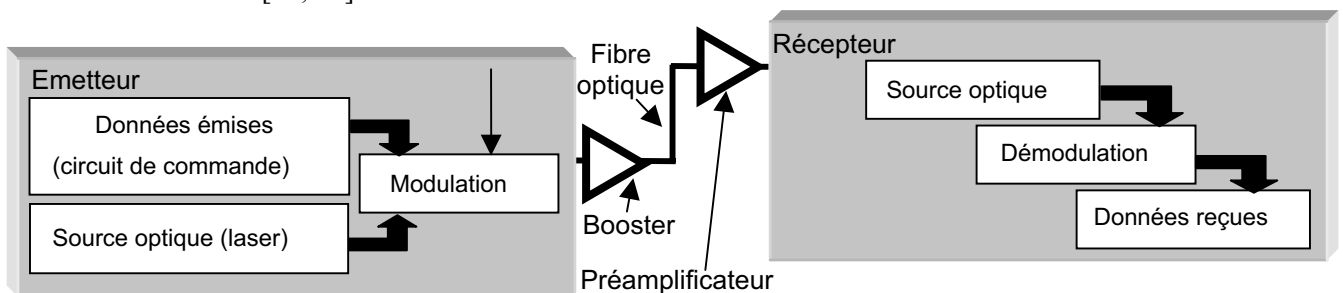


Figure 9 : Applications d'un AOS en "Booster" et en préamplificateur

3.1.2/ Fonctionnement en commutation

Dans un réseau de télécommunication, ce composant peut être utilisé comme porte (ou interrupteur) optique. En effet, avec l'apparition des réseaux optiques métropolitains dont le débit est de 1Gbits/s en moyenne, il devient nécessaire de commuter un train d'informations, constitué d'une seule longueur d'onde, vers le récepteur dans un délai en constante réduction. Les commutateurs optiques sont donc des composants clés, stratégiquement placés aux nœuds des différents réseaux, entre les émetteurs et les récepteurs, afin de rediriger les signaux incidents vers une ou plusieurs fibres en aval du dispositif. Actuellement l'ordre de grandeur de ces délais peut varier de quelques centaines de microsecondes pour les portes optiques MEMs à quelques nanosecondes pour les AOSs [27, 28]. Les temps de réponse optique (\approx ns) des AOSs leur permettent donc de jouer un rôle important en tant que commutateurs optiques. De plus, si l'on assemble en réseau plusieurs de ces portes, il devient alors possible de créer de façon monolithique, sous la forme d'un module AOS constitué de 4 puces, des commutateurs (1 entrée \times N sorties) ou (N entrées \times N sorties), comme présentés en figure 10 [21].

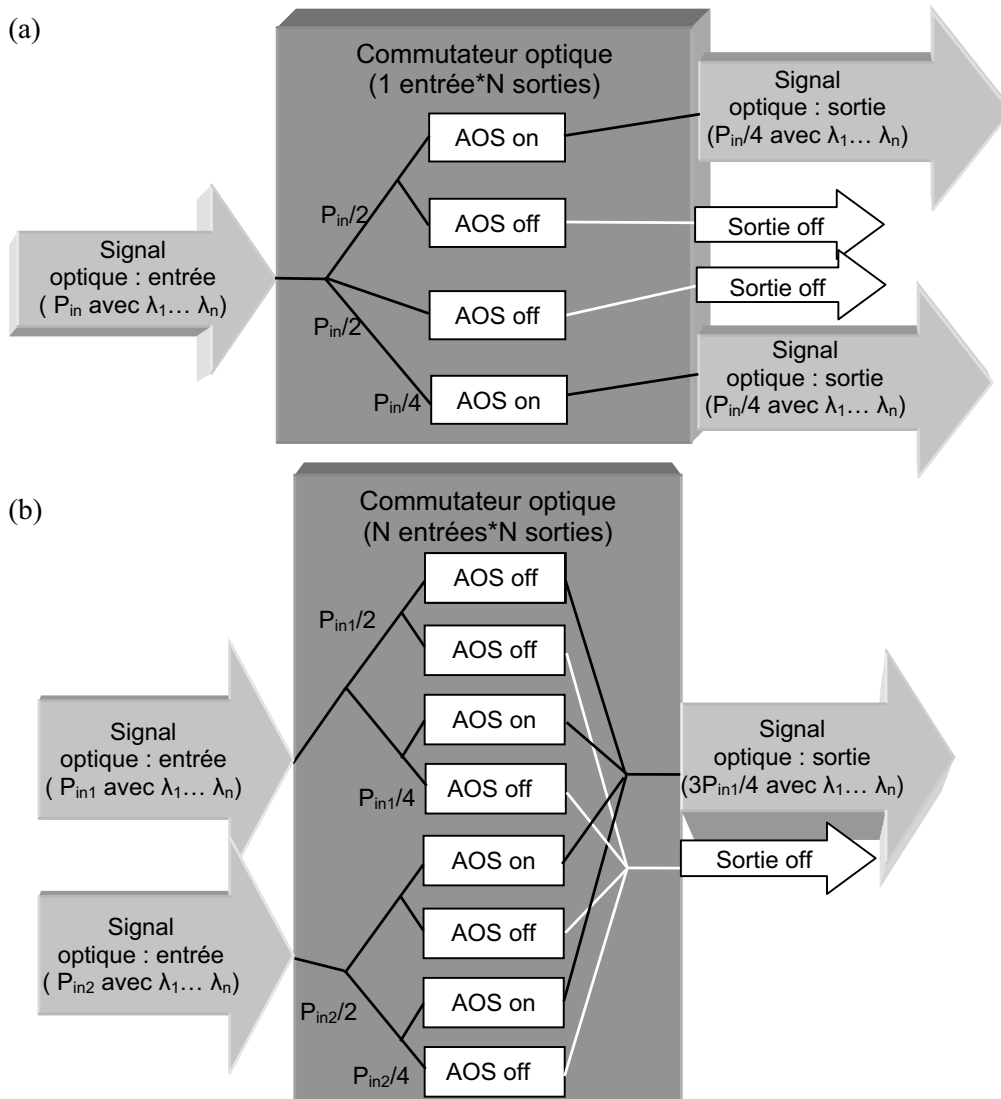


Figure 10 : Applications à la commutation "tout-optique" : 1 entrée vers N sorties (a) et N entrées vers N sorties avec amplification (b)

Placés entre deux multiplexeurs de longueur d'onde, ces mêmes portes permettent également de constituer un sélecteur de longueur d'onde dont un exemple est présenté en figure 11. L'insertion supplémentaire de commutateurs assure, de façon "tout optique" et intégrée, des fonctions d'insertion/extraction sur un multiplexeur de longueurs d'onde [29, 30].

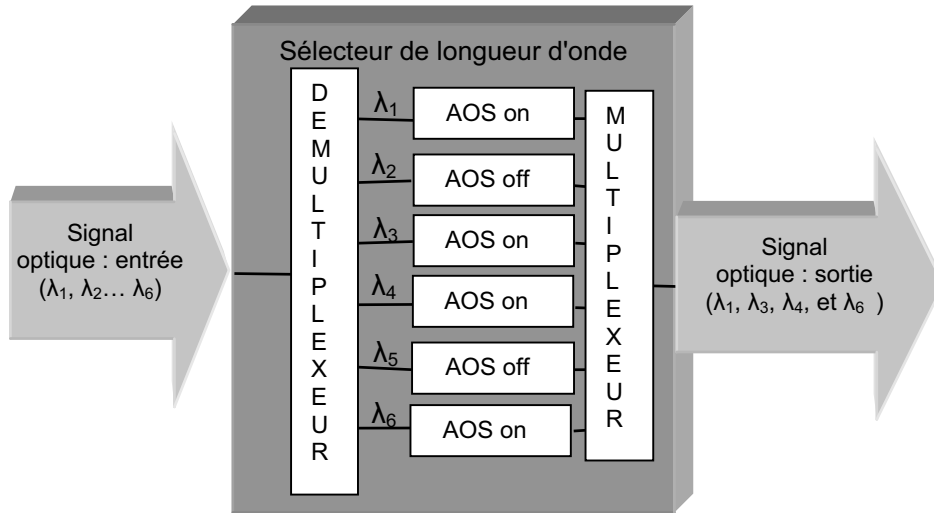


Figure 11 : Application à la sélection de longueurs d'onde "tout-optique"

3.2/ Applications en régime non-linéaire

Les applications potentielles des AOSs résident également, en leurs possibilités d'exploitation en régime non-linéaire. En effet, l'injection de lumière (par un signal de pompe) dans un AOS induit une variation de la densité de porteurs et en conséquence une modification du gain et de l'indice de réfraction de sa structure. Ce phénomène peut être avantageusement utilisé dans des systèmes constitués de AOSs saturés selon deux principes [31, 32, 33, 34] :

- La modulation du gain XGM ("Cross-Gain Modulation") en exploitant la variation du gain où le signal converti est le "complémentaire à 1" du signal d'entrée à la longueur d'onde (λ_2) de l'onde de pompe (figure 12).
- La modulation de la phase XPM ("Cross-Phase Modulation") en exploitant la variation de l'indice de réfraction où le signal converti est égal ou opposé au signal d'entrée à la longueur d'onde (λ_2) de l'onde de pompe (figure 13).

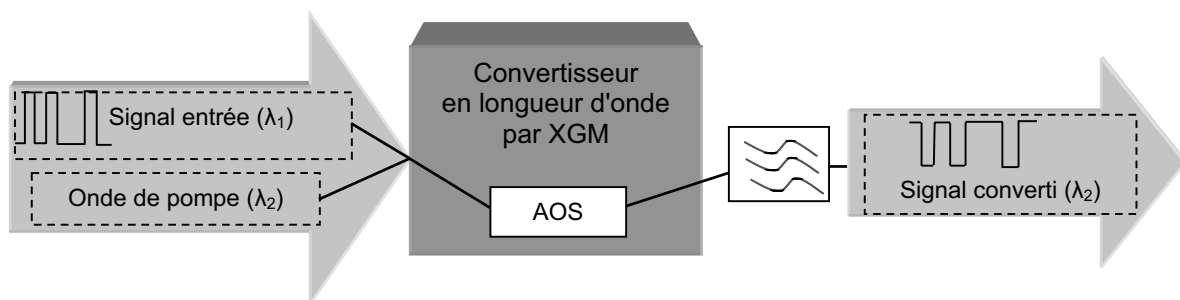


Figure 12 : Conversion de longueur d'onde par modulation de gain (XGM)

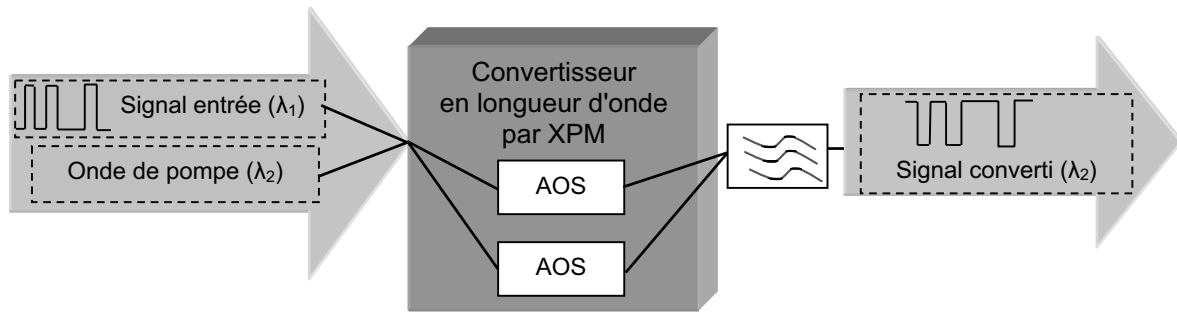


Figure 13 : Conversion de longueur d'onde par modulation de phase (XPM)

La dernière application, utilisée en régime non-linéaire est basée sur l'interférence cohérente réalisée dans le mélange à quatre ondes FWM ("Four Wave Mixing") où une onde de sortie est générée à une longueur d'onde choisie à partir du mélange de quatre ondes [24]. L'intérêt majeur de ces systèmes réside dans le fait qu'ils permettent d'effectuer des conversions de longueur d'onde par transfert de l'information binaire présente sur l'onde de pompe vers le signal d'entrée. Il s'agit donc d'applications de premier rang en télécommunications, où l'on connaît l'importance des techniques de multiplexage fréquentiel (WDM) pour l'augmentation de débit des données transmises au sein des réseaux.

De plus, certains systèmes offrent la possibilité d'applications telles que la régénération de signal transmis : ré-amplification du signal mais aussi remise en forme de celui-ci. Enfin, dans les systèmes hybrides de transmission optique, un AOS permet également de réaliser des opérations de démultiplexage temporel.

En conclusion, l'AOS a été récemment introduit dans les liaisons de télécommunications à haut débit dont le champ d'applications s'élargit et pour lequel il est envisagé d'autres voies d'exploitation telles que la communication "tout optique". En effet, la facilité pour ces composants de réaliser des opérations logiques ou le recalage temporel du signal par récupération du rythme d'horloge ouvre de nombreuses perspectives [35].

Après avoir présenté les principales possibilités d'applications de ce composant, les phénomènes physiques à l'origine de l'amplification et l'architecture technologique d'un AOS sont exposés dans les prochains paragraphes.

4/ PRINCIPE DE L'AMPLIFICATEUR OPTIQUE A SEMICONDUCTEUR

4.1/ Principe général de l'amplification à semiconducteur

L'amplificateur optique à semiconducteur est un composant optoélectronique actif, sa structure élémentaire consiste en une diode de type p-i-n, basée sur une hétérojonction InP(P)/InGaAsP/InP(N), permettant l'amplification de la lumière incidente par émission stimulée à une longueur d'onde à $1,55\mu\text{m}$. Afin d'assurer le meilleur rendement possible de cette diode, il est nécessaire de confiner le maximum de porteurs et de photons dans la zone intrinsèque du composant [36, 37].

Par sa structure, présentée en figure 14, et sa fonction, l'AOS est constitué d'une cavité laser (guide d'onde) terminée par deux miroirs. La description effectuée ci-dessus et la figure 14 montrent que l'AOS et la diode laser ont, en première approximation, une architecture relativement proche.

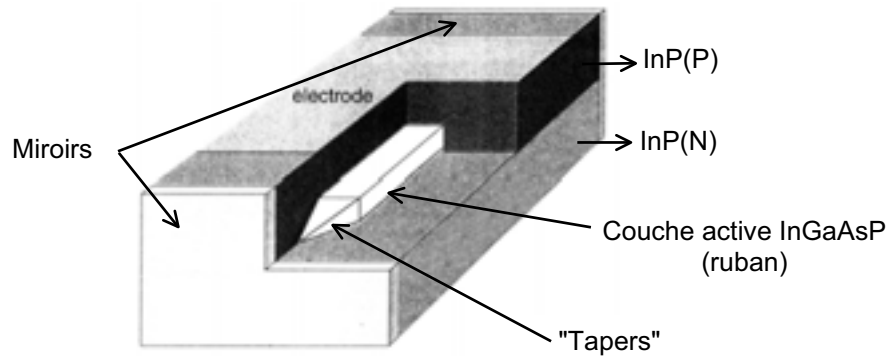


Figure 14 : Structure générale d'un amplificateur optique à semiconducteur (Vue tridimensionnelle)

La principale différence entre ces deux composants réside dans le traitement de la réflectivité des miroirs. En effet, l'objectif d'un AOS étant d'amplifier le signal optique d'entrée et non de le générer, l'effet laser, obtenu après de nombreuses réflexions dans la cavité laser du signal optique incident, est, dans un AOS, non désiré. La géométrie spécifique d'un AOS, dont les deux extrémités de la couche active se terminent en pointes, et les coefficients de réflexion des miroirs minimums servent à réduire les réflexions dans la cavité du signal optique incident dans le but d'éviter les oscillations dans la gamme de l'amplification dynamique.

Les détails, relatifs à ces particularités, seront précisés dans le prochain paragraphe mais en premier lieu, nous rappèlerons les propriétés physiques de l'émission des composés III-V, notions de base de l'émission laser dans le fonctionnement des AOSs [38, 39].

4.2/ Rappels sur les propriétés physiques de l'émission des composés III-V

Deux matériaux composés III-V majeurs, InP et GaAs, se sont particulièrement imposés grâce à leur caractéristique d'émission. En effet, ces matériaux possèdent un gap direct permettant l'émission dans le proche infrarouge et leurs paramètres de maille évoluent très peu avec certains éléments de substitution [38]. De plus, pour les matériaux à base InP, deux longueurs d'onde, $1,3\mu\text{m}$ et $1,55\mu\text{m}$, correspondent au minimum d'absorption optique d'une fibre optique d'où un minimum de pertes du signal transmis et la justification de leurs fréquentes utilisations dans la fabrication de composants émissifs optoélectroniques.

Ces composants, basés sur des matériaux composés III-V, possèdent donc des caractéristiques émissives particulières à l'origine de l'amplification optique, dont :

- l'émission stimulée, phénomène majeur pour l'amplification optique,
- les effets parasites tels que les recombinaisons non-radiatives en particulier.

L'ensemble des phénomènes, régissant le fonctionnement d'un AOS et nécessaire à l'étude des mécanismes de dégradation de ce composant, est décrit dans ce paragraphe.

4.2.1/ Transitions radiatives

Lorsque l'on considère un milieu amplificateur de lumière tel que la diode laser ou l'AOS, on observe deux types d'interaction entre les électrons et les photons : les transitions radiatives, source d'émission de photons, et les non-radiatives, non émissives, toutes décrites ci-dessous [38, 39, 40].

➤ Absorption

Un photon d'énergie suffisante ($h\nu_{12} \geq E_g$) peut induire la transition d'un électron occupant la bande de valence vers la bande de conduction. Cette interaction est le phénomène d'absorption présenté en figure 15.

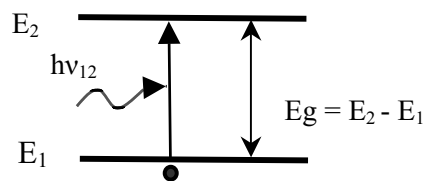


Figure 15 : Phénomène d'absorption

➤ Emission spontanée

Les électrons occupant les niveaux de la bande de conduction (remplis par exemple sous l'effet de la température ou bien par excitation extérieure du matériau) peuvent se recombiner avec les trous de la bande de valence en émettant, de manière spontanée, un photon de direction aléatoire et de polarisation quelconque avec une longueur d'onde λ (figure 16) égale à :

$$\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} \quad (1-1)$$

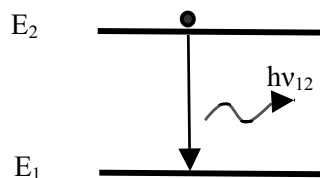


Figure 16 : Phénomène d'émission spontanée

Le taux de recombinaisons spontanées, R_{spont} exprimé en $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, correspond à la somme de toutes les transitions radiatives possibles entre les niveaux occupés de la bande de conduction et les niveaux inoccupés de la bande de valence.

Il a été démontré que le taux de recombinaisons spontanées est proportionnel au produit des concentrations de porteurs [38, 39, 40] :

$$R_{\text{spon}}(n) = Bnp \quad (1-2)$$

$B = B(n)$ est le coefficient d'émission spontanée avec $B(n) = B_0 - B_1 n$, n étant la densité d'électrons et p étant la densité de trous.

Outre la concentration des porteurs, B dépend également du dopage et de la température. Dans les semiconducteurs, la valeur moyenne de B est de l'ordre de $10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à température ambiante.

Une hypothèse simplificatrice, fréquemment utilisée dans le calcul du taux de recombinaisons spontanées, revient à considérer que le dopage dans la jonction est faible devant la densité de porteurs hors équilibre assurant :

$$n \approx p \quad (1-3)$$

On obtient alors le taux de recombinaisons spontanées sous la forme suivante :

$$R_{\text{spon}}(n) = Bn^2 \quad (1-4)$$

➤ Emission stimulée

L'émission stimulée dans les semiconducteurs est le processus par lequel un photon d'énergie $h\nu_{12}$ déclenche la transition électronique d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence (figure 17). Il crée ainsi un photon supplémentaire d'énergie $h\nu_{12}$ en phase avec l'onde incidente (phénomène de cohérence). Le taux de recombinaisons stimulées, à la différence du taux de recombinaisons spontanées, est fortement lié à la densité de photons dans le matériau [38, 39, 40].

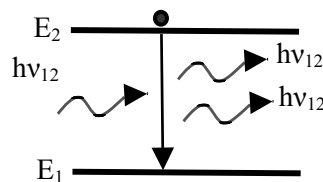


Figure 17 : Phénomène d'émission stimulée

Le taux de recombinaisons stimulées r_{st} s'obtient en considérant une transition stimulée d'un niveau E_2 dans la bande de conduction vers un niveau E_1 dans la bande de valence, soit :

$$r_{\text{st}}(h\nu_{12}) = B_{12} \rho_C(E_2 - E_C) F_C(E_2) \rho_V(E_V - E_1) (1 - F_V(E_1)) \quad (1-5)$$

avec :

- B_{12} représentant la probabilité de transition stimulée du niveau 2 vers le niveau 1,
- $\rho_{V,C}(E)$ les densités d'états respectivement de la bande de valence et de la bande de conduction,
- $F_{V,C}(E)$ les probabilités d'occupation respectivement des états de la bande de valence et de la bande de conduction.

D'après la statistique de Fermi-Dirac, ces fonctions sont classiquement décrites par [40] :

$$F_c(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_{Fn}}{kT}}} \quad \text{et} \quad F_v(E) = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{E-E_{Fp}}{kT}\right)}} \quad (1-6)$$

avec :

- E_{Fn} : pseudo-niveau de Fermi pour les électrons de la bande de conduction,
- E_{Fp} : pseudo-niveau de Fermi pour les trous de la bande de valence.

Pour une densité de n_{ph} photons d'énergie E_{12} , le taux de recombinaisons stimulées R_{st} entre deux niveaux d'énergie E_2 et E_1 est égal à :

$$R_{st}(h\nu_{12}) = B_{12} n_{ph} \rho_C(E_2-E_C) F_C(E_2) \rho_V(E_V-E_1) (1-F_V(E_1)) \quad (1-7)$$

Le processus réciproque est le phénomène d'absorption. Il est régi par l'équation :

$$R_{abs}(h\nu_{12}) = B_{12} n_{ph} \rho_C(E_2-E_C) (1-F_C(E_2)) \rho_V(E_V-E_1) F_V(E_1) \quad (1-8)$$

On définit alors un taux net d'émissions stimulées :

$$R_{stnet}(h\nu_{12}) = R_{st}(h\nu_{12}) - R_{abs}(h\nu_{12}) \quad (1-9)$$

D'après les formules précédentes et la relation d'Einstein montrant que $B_{12} = B_{21}$, la relation (1-9) devient :

$$R_{stnet}(h\nu_{12}) = B_{12} n_{ph} \rho_C(E_2-E_C) (F_C(E_2) - F_V(E_1)) \rho_V(E_V-E_1) \quad (1-10)$$

L'émission stimulée se produit lorsque $R_{stnet} > 0$, c'est-à-dire lorsque le taux net d'émission stimulée est supérieur à l'absorption. Cette situation correspond à la situation dite d'inversion de population (pompage électrique) pour laquelle $F_C(E_2) > F_V(E_1)$. En considérant une approche statistique de Fermi-Dirac, cette relation devient $E_{fn} - E_{fp} > E_g$ (Condition de B. Durafourg) [38, 39, 40]. D'autres transitions radiatives peuvent apparaître comme, la transition excitonique, qui sont très largement décrites dans la bibliographie relative à l'étude des propriétés luminescentes des matériaux semiconducteurs. Ces transitions sont, en général, peu prises en compte dans le cadre de l'étude générale du fonctionnement du composant à semiconducteur et elles ne seront pas décrites dans le cadre de ce mémoire [38, 39, 40].

4.2.2/ Transitions non-radiatives

Les électrons et les trous peuvent également se recombiner via des processus non-radiatifs préjudiciables à la qualité du transport électrique dans le composant divisés en deux catégories [38] :

- les recombinaisons directes bande à bande (recombinaisons Auger),
- les recombinaisons sur les centres profonds localisés à des niveaux différents dans la bande interdite (recombinaisons Schokley-Read-Hall et de surface).

➤ *Recombinaisons de type Schokley-Read-Hall*

Le processus de recombinaisons non radiatives de type Schokley-Read-Hall (SRH) est associé à la présence de défauts cristallins (dislocations, défauts plans, défauts ponctuels, ...) ou d'impuretés (métal, oxygène, ...) dans le matériau considéré. Soit un niveau profond situé dans la bande interdite à l'énergie E_t et de concentration volumique N_t (cm^{-3}), ce niveau peut être un piège à électrons ou à trous ou bien un centre de recombinaisons suivant que les sections efficaces de capture des électrons et des trous sont respectivement très différentes ou très comparables. Le taux de recombinaisons R_{SRH} sur ce niveau (E_t) a été proposé par Schokley-Read-Hall [38, 39, 40] :

$$R_{\text{SRH}} = \frac{\sigma_n \sigma_p \gamma v_{\text{th}} (np - n_i^2) N_t}{\sigma_n (n + n_i e^{\frac{E_t - E_{Fi}}{kT}}) + \sigma_p (p + n_i e^{\frac{-(E_t - E_{Fi})}{kT}})} \quad (1-11)$$

avec :

- $\sigma_{n,p}$ désigne les sections efficaces de capture des électrons et des trous en cm^2 ,
- $v_{\text{th}} = (3kT/m^*)^{1/2}$ est la vitesse thermique des porteurs de masse effective m^* ,
- n_i est la densité de porteurs intrinsèques et E_{Fi} est le niveau de Fermi intrinsèque.

Si l'on considère des centres recombinants plutôt que des pièges, les sections efficaces de capture des électrons et des trous sont proches et en faisant l'hypothèse suivante :

$$\sigma_n = \sigma_p = \sigma \quad (1-12)$$

l'expression (1-11) devient :

$$R_{\text{SRH}} = \frac{\sigma^2 v_{\text{th}} (np - n_i^2) N_t}{(n + p + 2n_i \cosh(\frac{E_t - E_{Fi}}{kT}))} \quad (1-13)$$

A l'équilibre thermique, $n = p = n_i$, donc $R_{\text{SRH}} = 0$. L'expression (1-13) montre que la probabilité d'obtenir des recombinaisons SRH augmente si le niveau d'énergie E_t est proche de E_{Fi} (milieu de la bande interdite). Les niveaux peu profonds sont donc moins favorables à la recombinaison SRH que les niveaux profonds. On définit la durée de vie des trous (τ_p) et des électrons (τ_n) par [38, 39, 40] :

$$\tau_p = \frac{1}{\sigma_p v_{\text{th}} N_t} \quad (1-14)$$

$$\tau_n = \frac{1}{\sigma_n v_{\text{th}} N_t} \quad (1-15)$$

Aux faibles injections de courant, et si on prend l'exemple d'un matériau de type n, la densité d'électrons (majoritaires) est donc beaucoup plus forte que celle des trous (minoritaires) ($n \gg p$). Elle est égale à n_0 , la concentration des porteurs à l'équilibre. Dans ce cas, l'expression (1-13) se simplifie et devient $R_{\text{SRH}} = (p-p_0)/\tau_p$.

A fortes injections, par exemple, en considérant les recombinaisons non radiatives dans la couche active dans une diode laser polarisée en direct au-dessus du courant de seuil, on supposera que $n = p$ et $\tau_p = \tau_n = \tau$. L'expression (1-13) se simplifie et devient :

$$R_{\text{SRH}} = \frac{n}{\tau} = An \quad (A \text{ en } \text{s}^{-1}) \quad (1-16)$$

➤ *Recombinaison Auger*

La recombinaison Auger est la recombinaison directe "bande à bande" pouvant intervenir en même temps que la recombinaison SRH. Ce processus de recombinaisons non-radiatives transfère l'énergie de recombinaison d'une paire électron/trou à une troisième particule (électron ou trou) qui subit elle-même une transition intrabande (Bande de Conduction ou Bande de Valence) [38, 39, 40].

Cette particule revient à un état d'équilibre via les collisions avec le réseau c'est-à-dire par émission de phonons (processus de thermalisation). Suivant le type de porteurs subissant le transfert intrabande vers une plus haute énergie, différents types de recombinaison Auger sont définis. La recombinaison Auger est moins probable que les autres types de recombinaisons non-radiatifs car celle-ci nécessite l'interaction de trois porteurs.

Néanmoins, en effectuant l'hypothèse $n \approx p$, le taux de recombinaisons Auger peut s'écrire [38, 39] :

$$R_{\text{Auger}} = Cn^3 \quad (1-17)$$

avec le coefficient Auger C en cm^6s^{-1} .

Le taux de recombinaison Auger augmente fortement avec la température et il est d'autant plus élevé que la largeur de bande interdite est faible.

➤ *Recombinaison de surface*

La surface d'un composant associée par exemple à un clivage ou à un arrêt d'épitaxie implique la rupture de périodicité du cristal semiconducteur. Cette surface concerne donc une région, d'épaisseur très faible (quelques nanomètres), tout à fait particulière du cristal où de nombreuses liaisons non satisfaites au niveau de la dernière couche atomique interagissent avec le milieu extérieur ou avec la couche immédiatement supérieure. Les zones concernées sont alors très riches en centres recombinants. Ces centres introduisent localement dans la bande interdite une multitude d'états qui vont singulariser et augmenter les phénomènes parasites de génération–recombinaison en surface [38, 39, 40]. Ils sont définis comme des états de surface ou d'interface en fonction de leur localisation géométrique. Les états de surface ont des origines si diverses que leur répartition énergétique peut être considérée comme continue dans la bande interdite.

En considérant que R_{surf} est le taux de recombinaisons des porteurs en surface, on définit, de façon générale, une vitesse de recombinaison de surface pour les électrons v_{sn} et pour les trous v_{sp} par :

$$v_{\text{sn}} = \sigma_{\text{sp}} v_{\text{th}} N_{\text{th}} \quad (\text{matériau de type n}) \quad (1-18)$$

$$v_{\text{sp}} = \sigma_{\text{sn}} S v_{\text{th}} N_{\text{th}} \quad (\text{matériau de type p}) \quad (1-19)$$

avec :

- $\sigma_{\text{sp,sn}}$ désigne les sections efficaces de capture de surface pour les trous et les électrons,
- N_{th} est la densité de pièges (à électrons et à trous) de surface en cm^{-2} .

Dans l'hypothèse où $n \approx p$ à fortes injections, le taux de recombinaisons en surface devient :

$$R_{\text{surf}} = S v_s n \quad (1-20)$$

avec :

- v_s la vitesse de recombinaisons de surface considérée identique pour les électrons et les trous,
- S représente la surface considérée.

La présence d'états de surface dans un composant semiconducteur, favorise considérablement les recombinaisons non-radiatives. Par exemple, elle peut alors être à l'origine de l'apparition de courants de fuite susceptible d'entraîner une diminution de la fonctionnalité du composant.

➤ *Taux de recombinaison global*

Lorsque l'on effectue le bilan des recombinaisons radiatives et non-radiatives dans un composant semiconducteur, on obtient le taux global de recombinaisons, en sommant les taux de recombinaisons associés aux processus radiatifs et non-radiatifs (Auger, SRH, surface) [38, 39, 40] :

$$R(n) = R_{\text{SRH}} + R_{\text{spon}} + R_{\text{Auger}} + R_{\text{surf}} = An + Bn^2 + Cn^3 + S v_s n \quad (1-21)$$

On définit alors la durée de vie des porteurs minoritaires par la relation :

$$R(n) = n/\tau \quad (1-22)$$

Compte tenu de cette définition, il vient :

$$\tau = \frac{1}{(a + S v_s) + bn + cn^2} \quad (1-23)$$

On distingue alors les durées de vie radiative τ_r et non-radiative τ_{nr} en explicitant la relation (1-23) :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} = bn + [(a + S v_s) + cn^2] \quad (1-24)$$

L'efficacité quantique interne η_i est définie par le rapport du taux de recombinaisons radiatives sur celui des recombinaisons totales (radiatives et non radiatives) :

$$\eta_i = \frac{R_{\text{rad}}}{R} = \frac{\tau}{\tau_r} \quad (1-25)$$

Les différents types d'interaction électron/photon radiatives sont donc à l'origine du phénomène d'émission laser dans les composants laser et en particulier dans l'AOS tandis que les recombinaisons non radiatives sont, de par leur nature même, néfastes pour l'émission laser [38, 39, 40]. Les propriétés physiques de l'émission des composés III-V, que nous venons d'aborder, ne déterminent pas entièrement le comportement d'un composant sur semiconducteur à émission laser.

En effet, suivant l'architecture et la structure du composant considéré, les applications envisageables pour celui-ci sont diverses : par exemple diode laser, laser accordable ou encore amplificateur optique. L'architecture générale de l'amplificateur optique à semiconducteur, ainsi que des précisions concernant la structure AOS développée par ALCATEL Optronics, sont donc détaillées dans le prochain paragraphe.

4.3/ Architecture générale du composant AOS

L'architecture d'un AOS est directement liée, comme nous venons de le voir, à la structure de la diode laser à double hétérostructure enterrée InGaAsP/InP. Plus précisément, la structure d'un AOS est comparable à la structure d'un laser BRS, composant pour lequel une synthèse bibliographique sera effectuée dans le chapitre 2, car elle en est directement inspirée [36, 41].

En effet, la structure BRS possède un avantage par rapport à la diode laser à double hétérostructure enterrée. La réalisation, après la gravure du ruban, d'une homojonction P-N latérale dont la barrière de potentiel est plus élevée que celle des jonctions de la couche active permet :

- de privilégier le passage du courant dans la région active par un confinement latéral du courant vers le ruban,
- de diminuer le courant de seuil,
- d'obtenir une linéarité pour de fortes puissances optiques en fonction du courant d'alimentation (jusqu'à 20mW/30mW pour un laser BRS d'une longueur de 500 μ m émettant à 1,3 μ m),
- d'obtenir une puissance optique de sortie élevée (supérieure à 100mW pour un laser BRS d'une longueur de 500 μ m émettant à 1,3 μ m).

L'amplificateur optique à semiconducteur est donc réalisé comme son nom l'indique, à base de semiconducteur III-V. On peut considérer que la structure la plus simple d'un AOS est équivalente à la structure d'une diode p-i-n. Le milieu amplificateur intrinsèque est un quaternaire à gap direct de type $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. En ajustant les valeurs de x et de y, il est possible d'obtenir différentes hauteurs de bande interdite, correspondant notamment, comme nous le verrons dans la suite de ce paragraphe, à la longueur d'onde standard pour les télécommunications : 1,55 μ m [40, 41].

Le substrat et la reprise d'épitaxie sont en InP respectivement dopés N et P, InP étant un des composés le plus largement utilisé dans l'optoélectronique actuelle avec le GaAs. La figure 18 présente un schéma très simplifié de l'amplificateur optique à semiconducteur.

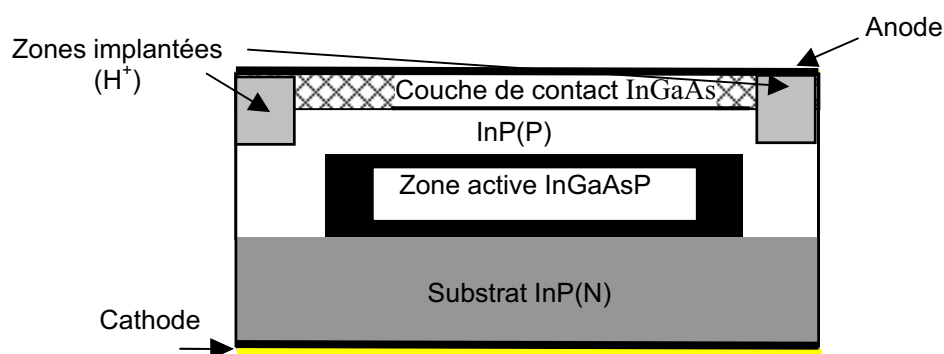


Figure 18 : Schéma structurel simplifié d'un AOS (Vue latérale)

Les électrodes du composant sont en or, plaquées sur une couche d'adaptation épitaxiée d'un composé ternaire GaInAs fortement dopé, à travers laquelle s'effectue le contact avec l'InP. L'isolation électrique du composant est réalisée par injection de protons (H^+) dans les couches d'InP.

Le courant est donc confiné dans la couche supérieure à l'aplomb du guide vers lequel il est canalisé par les implantations de protons et diffuse ensuite dans le substrat. Deux types de configurations, suivant le type de report considéré, existent pour ces composants : le type Pup où le composant est reporté sur son embase avec le guide actif proche de l'électrode supérieure et le type Pdown où le composant est reporté sur son embase avec le guide actif proche de celle-ci. Deux caractéristiques principales permettent de décrire la structure AOS étudiée [36, 41] :

- sa structure verticale permettant le confinement vertical des porteurs et des photons,
- sa structure transversale permettant le confinement transverse des porteurs et des photons.

Ces deux caractéristiques sont détaillées dans les deux paragraphes suivants.

4.3.1/ Structure verticale : double hétérostructure

La structure verticale d'un AOS consiste en un guide d'onde dont le cœur est la couche active appelée ruban. Celle-ci, placée entre deux couches d'InP dopées N et P, forme alors une Double Hétérostructure (DH) [36, 41]. Cette hétérostructure est très largement utilisée dans les lasers à semiconducteur car elle assure un confinement optimum des porteurs et des photons dans la zone active permettant d'obtenir un gain élevé du milieu en favorisant l'émission stimulée et assurant également un coefficient d'absorption faible. La figure 19 présente cette hétérostructure ainsi que son schéma de bandes et la variation de l'indice optique correspondants. De plus, la couche active, étant entourée d'un matériau ayant une bande d'énergie interdite plus grande, a un nombre de porteurs élevés dans sa bande d'énergie. La condition d'inversion de population est alors atteinte plus rapidement en courant, que pour une simple jonction P-N, le courant de seuil de la DH est donc plus faible et son rendement est alors plus élevé que pour la jonction P-N.

Différents types de structures verticales basées sur le principe de la DH ont été développés [9, 41] :

- la structure bulk "DH" (Double Heterostructure) contenant une monocouche de matériau actif massif,
- la structure bulk "SCH" (Separate Confinement Heterostructure) contenant des couches de confinement entre la couche active et les matériaux de reprise d'épitaxie,
- la structure "MQW" (Multi Quantum Well) dont la partie active est constituée par une succession de puits quantiques.

La structure SCH est identique à la structure DH excepté que dans la structure SCH, deux couches de confinement, de même matériau que la couche active, mais de largeur de bande interdite intermédiaire entre celle de la couche active et celle de l'InP, l'entourent. Elles sont situées de part et d'autre de la couche active. Ces couches favorisent l'injection de porteurs dans la couche active et augmentent davantage le confinement optique des photons. La couche active de la structure MQW est constituée de multi-puits quantiques.

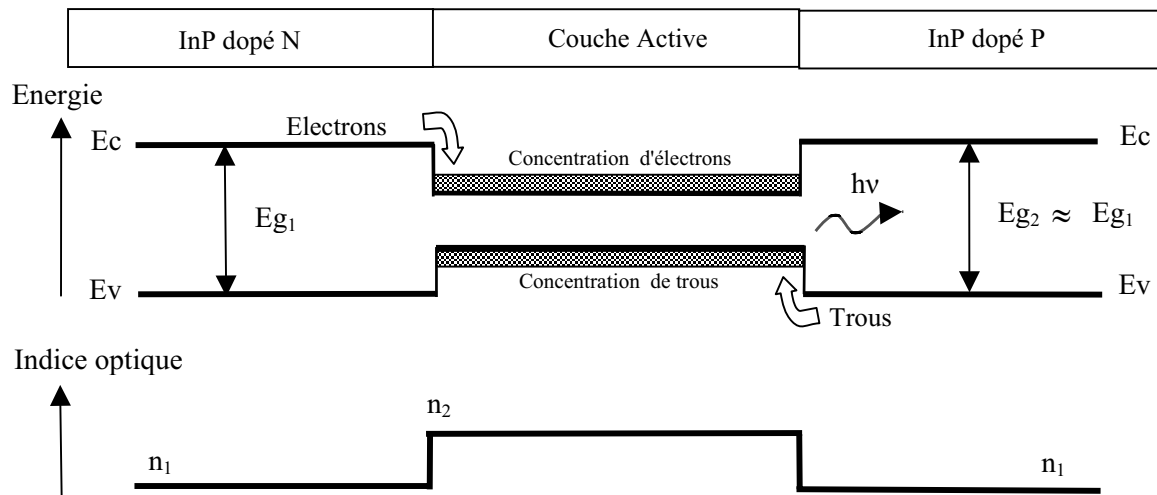


Figure 19 : Structure verticale d'un AOS – Intérêt de la Double Hétérostructure pour le confinement

Dans un puits quantique, les taux de recombinaisons radiatives et non radiatives sont différents de ceux du matériau massif et il en résulte des composants possédant de nombreux avantages :

- courant de seuil plus faible que pour la structure DH,
- ajustement de la longueur d'onde possible,
- gain optique plus élevé.

Cependant, il a été démontré, dans de nombreuses études, que les avantages de cette structure peuvent être égalés par une structure SCH avec un atout supplémentaire : celle-ci est moins contraignante dans le contrôle de l'épitaxie. En effet, les structures MQW nécessitent une très grande précision (contrôle de l'épaisseur des puits, de la contrainte en tension...) dans le processus de fabrication alors défavorable au produit [9].

La structure AOS, étudiée lors de cette étude et développée par ALCATEL R&I, est la structure dite "bulk-SCH". La couche active d'un AOS est constituée de $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{As}_{0,92}\text{P}_{0,08}$ émettant à $1,55\mu\text{m}$ et les couches de confinement émettent à $1,17\mu\text{m}$.

4.3.2/ Structure transversale à ruban enterré

Il a été démontré que de nombreuses structures permettent de confiner les porteurs et les photons latéralement (parallèlement à l'onde incidente). Le confinement latéral des photons répond à une exigence de fonctionnement monomode transverse qui va permettre un couplage optimal avec les fibres optiques. Deux types de guidage sont possibles [36, 41] :

- le guidage de l'onde incidente par le gain de la structure, où l'injection de courant est délimitée au niveau des contacts soit par un diélectrique, soit par bombardement de protons (H^+),
- le guidage par l'indice, où l'onde incidente est guidée par une forte variation d'indice des couches de confinement.

La structure VSBH (structure enterrée clivée, "V-grooved Substrate Buried Heterostructure") et la structure BH (structure enterrée, "Buried Heterostructure") d'une diode laser à double hétérostructure enterrée sont deux exemples de structures à guidage par l'indice donnés en figure 20. De plus, la figure 21 présente la structure BRS (structure à ruban enterrée, "Buried Ridge Structure") la plus proche de celle d'un AOS. Celle-ci est également une structure à guidage par l'indice où l'on a effectué, en plus, un bombardement de protons (H^+) au niveau des couches de confinement avec comme objectif de confiner un plus grand nombre de porteurs dans la couche active que les deux structures précédentes.

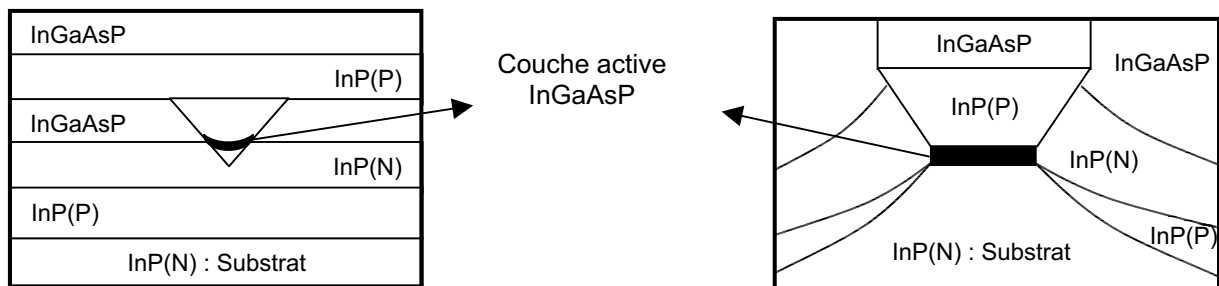


Figure 20 : Structures VSBH et BH d'une diode laser à double hétérostructure enterrée

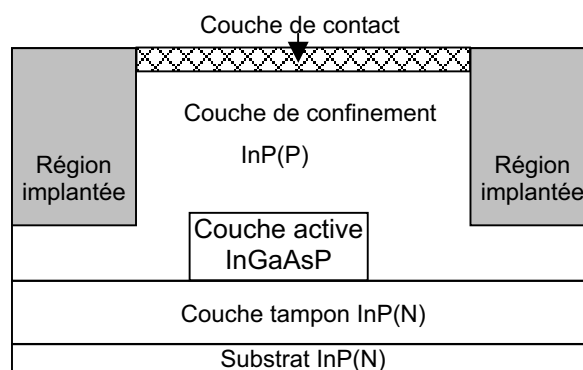


Figure 21 : Structure BRS d'une diode laser à double hétérostructure enterrée

L'AOS a une structure identique aux lasers BRS dans lesquels le confinement optique électrique latéral est obtenu grâce au coefficient de diffusion plus élevé de l'homojonction P-N sur InP que celui de la couche active, formée d'une couche de matériau semiconducteur en quaternaire InGaAsP. Le guide d'onde optique est formé par la couche d'InGaAsP dont l'indice optique est plus élevé que celui de l'InP (respectivement $n = 3,33$ et $n = 3,2$) [21, 22, 37]. L'homojonction n'étant pas parfaitement bloquante, on procède en plus à une implantation du matériau à l'aide de protons (H^+) de façon à augmenter considérablement sa résistance série et à limiter les fuites latérales. Les courants de fuite sont alors fortement réduits et quasiment négligeables (obtention d'un fort confinement des lignes de courant) [37].

Nous n'exposerons, dans la suite du document, que la structure générale de la technologie AOS, étudiée lors des travaux de thèse et développée par ALCATEL R&I ainsi que ses particularités structurelles propres, car ces composants possèdent une spécificité particulière relative à la géométrie de la zone active du composant. Ce détail stratégique, propre à la technologie ALCATEL, est plus particulièrement détaillé ci-dessous.

4.3.3/ Particularités structurelles d'un AOS

⇒ Comparaison diode laser BRS / AOS [42, 43]

Le laser BRS a une structure proche de celle d'un AOS, il a donc été choisi comme élément de référence et de comparaison possible avec notre technologie AOS. La comparaison de ces deux composants est établie dans le tableau 4.

Ce tableau permet de conclure quant à l'existence de nombreuses similitudes entre les deux structures de ces composants [42, 43]. Les différences technologiques existant entre une diode laser et un AOS sont citées ci-dessous. Celles-ci ont trois objectifs différents :

- Le traitement anti-reflet (R_{\min}) des miroirs d'entrée et de sortie, contrairement aux diodes laser dont les coefficients de réflexion des miroirs d'entrée et de sortie sont maximum et minimum (R_{\max}/R_{\min}), favorise un gain simple passage de l'onde incidente et évite les oscillations de l'onde en sortie. La technique, utilisée pour l'AOS, est basée sur le dépôt d'une couche diélectrique transparente anti-réflexion d'épaisseur ($\lambda_{\text{sortie}}/4$) sur les miroirs possédant un indice optique de réfraction correspondant à la moyenne des indices des matériaux voisins de chaque côté. Le traitement consiste en un empilement de couches à fort et faible indice optique, respectivement TiO_2 et SiO_2 , dont la réflectivité est inférieure à 10^{-4} à $1,55\mu m$. Les épaisseurs de l'empilement jouent un rôle essentiel dans la qualité d'une structure anti-reflet.
- De même, l'inclinaison du guide par rapport à la normale des miroirs, contrairement aux diodes lasers où il n'y a pas de tilt, minimise les oscillations (modulation rapide du gain en fonction de la longueur d'onde) et favorise le gain simple passage.

- La spécificité de la géométrie de la zone active : en vue de minimiser les pertes de couplage en entrée et sortie d'un AOS (proches de 3dB environ), de déconfiner le mode optique latéral du guide et de réduire la divergence du faisceau en sortie, la zone active se termine en pointes appelées adaptateurs de modes (ou "tapers"), et une zone dite passive, se situant sous la zone active, sur toute la longueur de la puce, est associée à cette zone active. Cette structure permet également de diminuer la possibilité de recouplage de l'onde réfléchiée dans la cavité guidante.

	LASER BRS	AOS
Structure verticale	Puits Quantiques contraints	Couches contraintes (structure "bulk")
Structure latérale	BRS	BRS
Zone passive et adaptateurs de modes	non	oui
Orientation du ruban	/	Tilt de 7°
Largeur de ruban (µm)	1,5 à 1,7	1 à 1,2
Coefficients de réflexion des miroirs	R / R _{min}	R _{min}

Tableau 4 : Comparaison structurelle entre une diode laser BRS et un AOS

La réalisation d'une telle structure résulte de la succession de nombreuses étapes technologiques. Ces étapes de fabrication seront synthétisées par la suite. Cependant avant d'aborder ces notions et afin de considérer la description de l'architecture d'un AOS comme complète, il est alors nécessaire de présenter le schéma en trois dimensions de la structure de ce composant.

➤ *Vue tridimensionnelle complète*

Comme nous l'avons vu précédemment, un AOS est un composant ayant une géométrie spécifique. En effet, un AOS n'est pas, contrairement aux diodes laser, symétrique : suivant le plan de coupe considéré, l'empilement des couches de matériaux dont il est constitué n'ont pas les mêmes caractéristiques. L'architecture globale d'un AOS est présentée en figure 22.

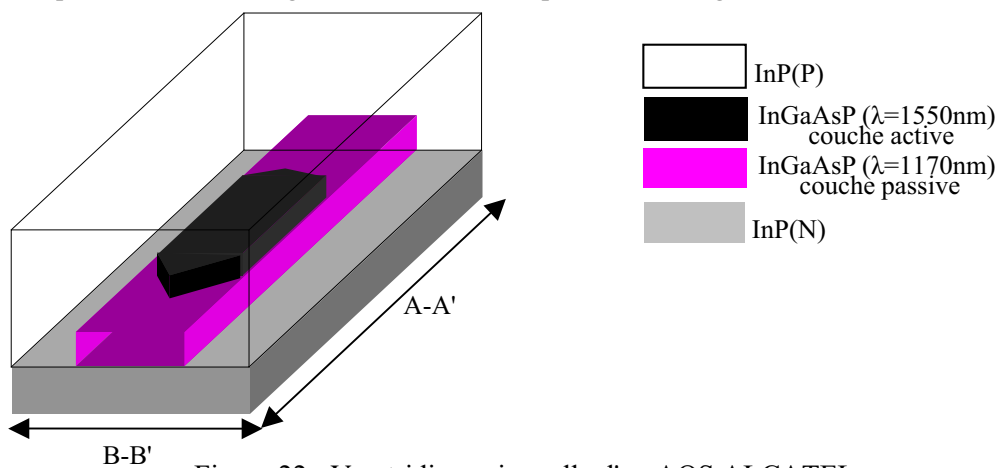


Figure 22 : Vue tridimensionnelle d'un AOS ALCATEL

L'observation de la coupe A-A' d'un AOS permet de constater la géométrie spécifique des "tapers" alors que si l'on considère la coupe B-B', on observe une coupe identique à celle d'une coupe de la structure d'une diode laser BRS. Les figures 23 et 24 présentent les vues en coupe d'un AOS suivant les plans A-A' et B-B'. L'empilement des couches a été volontairement simplifié dans un souci de clarté mais l'empilement réel des couches matériaux est exposé dans le paragraphe suivant.

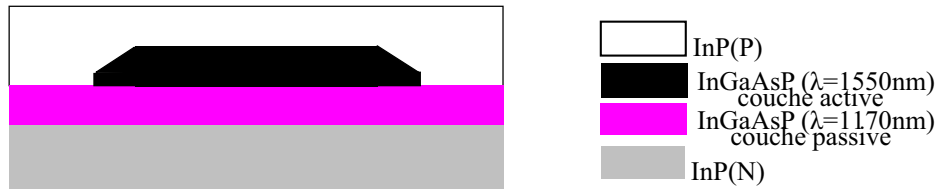


Figure 23 : Vue en coupe suivant le plan A-A' d'un AOS

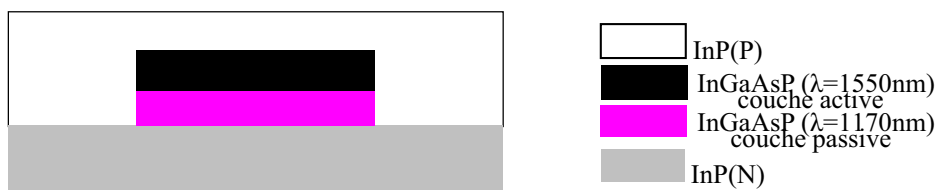


Figure 24 : Vue en coupe suivant le plan B-B' d'un AOS

➤ *Détails de la structure d'un AOS transféré*

La structure, détaillée en figure 25, est la structure définitive d'un AOS, transféré pour ALCATEL Optronics en 2002 [44]. Cette structure permet d'envisager les applications diverses pour la puce unitaire AOS ou pour le module constitué de quatre AOS.

DONNEES CONFIDENTIELLES

Figure 25 : Détails de la structure technologique de la puce AOS transférée

Tableau 5 : Descriptif détaillé des étapes de fabrication de l'AOS transféré

4.4/ Synthèse

Ce premier paragraphe a présenté le principe général de fonctionnement d'un AOS tant du point de vue du fonctionnement physique que du point de vue de l'architecture technologique. Sa structure et les contraintes technologiques de fabrication associées ont également été décrites.

Les objectifs des travaux de recherche portant plus particulièrement sur l'identification des mécanismes de dégradation et l'évaluation de la fiabilité des AOSs transférés, il est donc également nécessaire dans ce premier chapitre, de recenser les modèles de dégradation permettant d'estimer ou de prédire la fiabilité de ces composants. Les méthodes d'estimation ou de prévision requièrent différents outils s'étendant du test en fonctionnement opérationnel ("lifetest") jusqu'à l'étude statistique en passant par les tests accélérés associés à un facteur d'accélération, en général, difficile à estimer ("ageing test"). Le dénominateur commun de tous ces outils reste cependant basé sur l'utilisation de modèles comportementaux déduits d'études de la physique des défaillances à partir de tests expérimentaux. Ces modèles comportementaux sont donc rappelés dans le paragraphe suivant en s'appuyant sur des éléments généraux de fiabilité.

5/ ELEMENTS GENERAUX DE FIABILITE – MODELES DE DEGRADATION

5.1/ Méthodes d'étude

L'évolution de la technologie des composants et notamment l'apparition de nouvelles structures comme les modules hybrides imposent actuellement aux fabricants de ces composants d'accroître la qualité et la fiabilité de leur produit. Ce thème est, depuis les années 1960, une préoccupation majeure dans le monde industriel. En effet, les utilisateurs de ces composants, comme les équipementiers, soucieux de la qualité de leur produit final, se lancent également dans des études exploratoires afin d'estimer ou de prédire la fiabilité de leurs systèmes dans le cadre défini de leurs profils de mission. C'est pourquoi, l'élaboration de diverses méthodes, présentées dans ce paragraphe et notamment la méthode employée dans ces travaux de thèse pour l'évaluation de la fiabilité de composants AOSs, a été effectuée [45, 46].

De manière générale, la prévision ou l'estimation de la fiabilité d'un composant peut être déterminée à partir d'un ensemble de normes fixant les hypothèses de travail (définitions des tests) ou fournissant un ensemble de bases de données recueillies par des industriels, des fabricants, des laboratoires et d'autres organismes. Citons les plus connues :

- Normes Rdf 95 et UEC 80810 (CENT),
- Normes MIL-HDRK-217 (US Army),
- Normes HRD (British Telecom),
- Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques : Guide FIDES 2004 [99].

Dans toutes ces bases de données, un très grand nombre de composants est répertorié, actifs comme passifs, avec non seulement leurs taux de défaillance mais également d'autres informations sur les paramètres intrinsèques de ces composants. Ces normes servent de base à une prévision rapide de la fiabilité et, en particuliers, à une estimation de la durée de vie de l'application considérée en fonction des conditions opérationnelles et du facteur d'accélération utilisé. Dans le domaine de l'optoélectronique pour les télécommunications, les industriels se réfèrent aux normes de qualification Telcordia (GR468, GR 1221...) permettant de définir les tests à réaliser pour la prévision de la durée de vie des composants optoélectroniques.

La défaillance (ou panne) d'un composant est définie à partir d'un certain nombre de critères liés à la fonction de ce composant. La défaillance est atteinte lorsqu'une ou plusieurs caractéristiques du composant dépassent un certain seuil appelé critère de défaillance. Ce seuil, défini de façon précise au niveau industriel, permet d'estimer la durée de vie du composant [45, 46]. Cependant, dans le cas des composants optoélectroniques, l'estimation de la durée de vie n'est pas aisée. En effet, leur composition structurelle, plusieurs matériaux dont les comportements thermiques et mécaniques diffèrent, et la complexité de leur fonctionnement, régime petits signaux ou saturation, introduisent de nombreux modes de défaillance différents et variables au cours du temps. L'évaluation actuelle de la fiabilité est basée sur l'utilisation de différentes méthodes pour l'estimation de la durée de vie de composants. La figure 26 recense ces différentes méthodes qui peuvent être utilisées indépendamment ou conjointement.

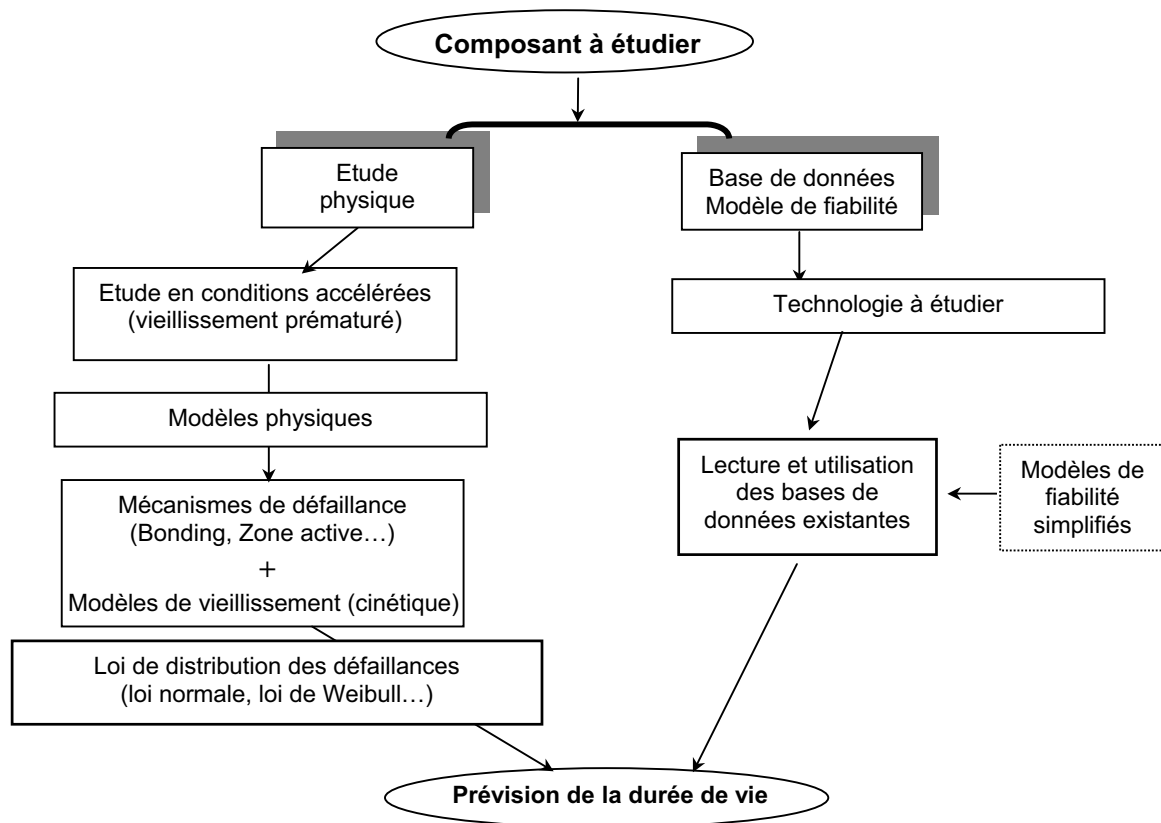


Figure 26 : Méthodologies actuelles de prévision de la durée de vie de composants

➤ Méthodes d'estimation

Les méthodes d'estimation nécessitent, contrairement aux méthodes de prévision, des résultats d'essais expérimentaux.

Etude en conditions opérationnelles ("life test")

Dans le cas de l'étude en conditions opérationnelles, les données, pour l'estimation de la durée de vie, sont issues des composants suivis en fonctionnement nominal et l'analyse, au moyen d'expertises, de ceux-ci à la suite de l'apparition de la défaillance. L'inconvénient majeur de cette méthode est que celle-ci n'est pas prédictive : l'estimation de la durée de vie du composant a lieu après la défaillance de celui-ci. Afin de pallier ce problème, il est possible de procéder à une étude en fonctionnement accéléré après la détermination du facteur d'accélération (par exemple : la température ou le courant pour les composants optoélectroniques).

Etude en conditions accélérées ("ageing test")

Afin de réduire la durée des tests, il est possible de vieillir prématurément le composant en appliquant des contraintes plus sévères que celles appliquées en mode de fonctionnement nominal. Cette méthode est très utilisée pour l'estimation de la durée de vie des composants optoélectroniques et elle sera appliquée aux AOSs. Elle s'effectue suivant un cheminement précis, exposé ci-dessous :

1. Définition d'un critère de défaillance pertinent à partir d'un paramètre caractéristique des composants étudiés.
2. Après avoir mis en œuvre des tests de vieillissement accélérés et établi l'évolution du paramètre suivi, l'extrapolation de celle-ci, grâce à une loi de fiabilité choisie, est effectuée. Une évaluation de la durée de vie de composant est alors envisageable (taux de défaillance par exemple).
3. Puis, avec un modèle mathématique approprié, correspondant à la loi de fiabilité utilisée, une énergie d'activation des mécanismes d'usure est déterminée et elle est associée à un mécanisme de dégradation précis.

A une énergie d'activation donnée, correspond un mécanisme de dégradation précis [13, 14]. Bien que cette valeur puisse être modifiée par des facteurs externes (contrainte mécanique par exemple), la détermination de l'énergie d'activation est un outil qui peut permettre de sélectionner, par référence à la littérature, les mécanismes potentiellement impliqués.

Les notions principales de base présentées ci-dessous concernant les modèles physiques, les modèles mathématiques associés et les lois de survie correspondantes sont celles largement utilisées pour l'estimation de la fiabilité des composants optoélectroniques et sur lesquelles nous nous appuyerons pour ces travaux de recherche [13, 14, 41, 45]. Ces modèles sont les plus adaptés pour décrire le comportement des composants optoélectroniques au cours de tests de vieillissement dont les contraintes sont généralement en température et en courant. Ces notions sont synthétisées et ne reflètent, comme nous l'avons vu précédemment, qu'une faible partie des études menées sur la fiabilité des composants [45, 46]. Cette démarche pour l'estimation de la durée de vie des AOSs sera développée dans le chapitre 3.

➤ *Méthodes de prévision*

Base de données/Modèle de fiabilité

Ce second type d'étude se réfère à l'analyse de bases de données issues de nombreuses campagnes d'essais menées par des fabricants de composants ou des laboratoires, notamment par l'intermédiaire des bases de données précédemment citées [45, 46].

Néanmoins, l'application de cette méthode pour estimer la durée de vie de composants comporte de nombreux inconvénients. En effet, lors de l'exécution de ces calculs fastidieux, la tendance est souvent pessimiste et elle n'est valable que pour des technologies déjà parfaitement connues et recensées dans les bases de données ayant été recueillies lors de précédentes études. De plus, le plus grand inconvénient tient au fait que cette méthode ne peut s'appliquer aux composants de forte puissance (lasers de pompage, 980nm par exemple) puisque leur nombre est trop faible pour être compilable dans une base de données fiable. Il apparaît donc relativement difficile d'appliquer cette démarche aux AOSs, composants de technologie trop récente.

Etude physique

L'étude physique se base sur les modèles physiques et électriques approfondis du composant étudié. L'application de cette méthode nécessite donc de connaître parfaitement les matériaux du composant, et les contraintes thermiques que peuvent subir ces derniers [13, 45]. De plus, les informations concernant l'apparition des défaillances ainsi que les mécanismes de dégradation des composants doivent également être identifiés par avance. Il paraît alors également difficile d'appliquer cette analyse lors de ces travaux de recherche dont le sujet est justement de déterminer les mécanismes de dégradation de ce composant. Cependant, il est à noter que les méthodes d'estimation basées sur le retour d'expérience après défaillance est de moins en moins utilisée. De la même façon, la prévision de durée de vie à partir d'études statistiques avec comme support l'utilisation de données existantes est devenue rétrograde dans le cas de composants en cours de maturité technologique.

Dans le but de définir les deux approches développées pour l'estimation de la fiabilité des composants optoélectroniques, une étude de celles-ci est présentée dans le dernier paragraphe de ce chapitre. En effet, une nouvelle approche de la fiabilité de composants a récemment été mise en place par ALCATEL Optronics. Elle consiste à "évaluer la fiabilité" du produit à chaque étape de sa fabrication et par là même à connaître en fin de chaîne de fabrication la robustesse et les points faibles de celui-ci permettant de réduire le temps de qualification du produit et de diminuer les défauts de celui-ci liés à sa conception [47, 48]. Cette démarche procède donc d'une prise en compte de la complexité croissante des technologies optoélectroniques associée à des taux de défaillance extrêmement bas.

5.2/ Cinétiques générales de dégradation

Comme nous l'avons vu précédemment, un modèle de dégradation est associé à l'évolution physico-chimique d'une zone particulière du composant au cours du vieillissement. Les deux principaux modèles physiques d'Eyring et d'Arrhénius, appliqués aux composants optoélectroniques et présentés ci-dessous, permettent de décrire la cinétique des processus physico-chimiques et par conséquent la cinétique des mécanismes de dégradation de ces composants [14, 41].

5.2.1/ Modèle d'Eyring

Dans ce modèle, la vitesse de réaction r du processus est donnée par [14, 41] :

$$r = B(\sigma_i)T e^{-\left(\frac{E_a}{kT}\right)} \quad (1-26)$$

L'énergie d'activation E_a caractérise la sensibilité à la température T de la réaction physico-chimique, la constante B dépend seulement des contraintes σ_i (non thermiques) appliquées au composant.

Par exemple, considérons C la caractéristique du composant telle que $r=dC/dt$, c'est-à-dire telle que la cinétique du mécanisme de base soit directement traduite par la grandeur macroscopique C du composant alors :

$$C(t) = C(0) \pm B(\sigma_i)tTe^{-\left(\frac{E_a}{kT}\right)} \quad (1-27)$$

L'étude du mode de dégradation revient donc à chercher une caractéristique C du composant telle que $f(C)=B(\sigma_i)tT\exp(-E_a/kT)$. Dans des conditions de stress données (T, σ_i), f(C) évolue linéairement avec le temps.

5.2.2/ Modèle d'Arrhénius

La vitesse de réaction d'un processus arrhéniusien découle directement de l'expression donnée par Eyring en définissant B comme constant non dépendant des contraintes (σ_i) :

$$r = B e^{-\left(\frac{E_a}{kT}\right)} \quad (1-28)$$

Comme dans les mécanismes du modèle d'Eyring, les mécanismes "arrhéniusiens" sont associés à une évolution linéaire dans le temps d'une grandeur caractéristique du composant.

Ces lois cinétiques correspondent aux mécanismes d'usure et permettent de calculer à partir des valeurs d'énergie d'activation E_a et du coefficient B la durée de vie du composant dans des conditions de vieillissement appliquées moins sévères. On décrit correctement de cette façon de nombreux mécanismes de dégradation dans les composants à semiconducteur (diffusion de dopants, formation de composés intermétalliques, oxydation, réarrangements atomiques, ...) [14, 41]. Les mécanismes à forte énergie d'activation ($E_a \approx 0,8\text{eV}$ à 1eV) sont dominants à haute température tandis que les mécanismes à faible énergie d'activation ($E_a \approx 0,2\text{eV}$ à $0,5\text{eV}$) (faible dépendance à la température) sont dominants à basse température.

Cependant, l'extrapolation, de l'évolution des caractéristiques considérées à faible température faite grâce à la détermination des énergies d'activation pour des tests à haute température, nécessite la plus grande prudence. En effet, celle-ci peut éventuellement conduire à une surestimation de la durée de vie du composant [41].

➤ Exemple : calcul de l'énergie d'activation

Par exemple, dans le cas d'un AOS, le paramètre suivi pour déterminer l'énergie d'activation du mécanisme d'usure est la puissance optique P_{opt} pour un courant d'alimentation de 200mA [41]. La variation relative de la puissance optique est supposée suivre une loi en puissance activée thermiquement :

$$\frac{\Delta P_{\text{opt}}}{P_{\text{opt}}} = At^m e^{-\left(\frac{E_a}{kT_j}\right)} \quad (1-29)$$

où T_j désigne la température estimée au niveau de la couche active, A et m étant des constantes établies lors de l'extrapolation de l'évolution de la puissance optique grâce à une loi d'Arrhénius.

Soit $t_{EOL}(T_j)$ la durée de vie du composant à la température T_j . L'énergie d'activation E_a peut donc être déterminée d'après les résultats de deux essais à deux niveaux de température différents T_{j1} et T_{j2} par :

$$t_{EOL}(T_{j1}) = t_{EOL}(T_{j2}) * e^{\frac{E_a}{m} \left(\frac{1}{kT_{j1}} - \frac{1}{kT_{j2}} \right)} \quad (1-30)$$

et par suite

$$\frac{E_a}{m} = \frac{1}{\left(\frac{1}{kT_{j1}} - \frac{1}{kT_{j2}} \right)} \ln \left(\frac{t_{EOL}(T_{j1})}{t_{EOL}(T_{j2})} \right) \quad (1-31)$$

A titre d'exemple, une application numérique de cette étude est effectuée grâce aux résultats de deux tests de vieillissement accéléré dont les conditions sont respectivement, 270mA/80°C et 270mA/100°C pour les AOSs. Pour les températures de test de 80°C et 100°C, les températures estimées de jonction sont respectivement de 442K et 462K au niveau de la couche active. De plus, pour un critère de défaillance défini par la diminution relative de la puissance optique de 20%, les durées de vie des composants considérés sont respectivement de 1651h et de 1016h. L'extrapolation de l'évolution de la puissance optique grâce à une loi d'Arrhénius donne la valeur $m=0,3$. Par suite, l'énergie d'activation des mécanismes de dégradation des composants testés est de 0,7eV. Cet exemple permet de confirmer le résultat relatif aux technologies à double hétérostructure enterrée [41].

5.3/ Rappels sur les définitions de base

Les modèles mathématiques utilisés en fiabilité sont définis grâce aux notions de fonctions de fiabilité apparues en premier lieu [13, 14].

5.3.1/ Fonctions de fiabilité

Nous définissons ici les fonctions de base les plus utilisées pour le traitement de données de fiabilité [13, 14].

➤ *Fiabilité, R(t)*

Soit $R(t)$ la fonction de probabilité qui représente la probabilité de survie à un instant t , elle est définie par :

$$R(t) = \frac{N(t)}{N(0)} \quad (1-32)$$

où $N(t)$ désigne le nombre de composants d'un lot de composants mis en vieillissement. Le complémentaire à 1 de $R(t)$ est appelé probabilité de défaillance.

➤ *Probabilité de défaillance, F(t) et densité de probabilité de défaillance f(t)*

$F(t)$ représente la probabilité d'apparition d'un défaut dans un intervalle $(0, t)$ de temps :

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (1-33)$$

On définit également la densité de probabilité de défaillance $f(t)$ par :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt} \quad (1-34)$$

➤ **Taux de défaillance $\lambda(t)$: courbe "en baignoire"**

Le taux de défaillance instantané $\lambda(t)$ est défini par $\lambda(t)=f(t)/R(t)$, la probabilité de défaillance entre les instant t et $t+dt$ étant alors donnée par $R(t)\lambda(t)dt=f(t)dt$ [13, 14]. Il s'exprime en nombre de pannes par heure et par composant et présente une dépendance en $e^{\frac{-Ea}{kT}}$. Le nombre de FITs ("Failure In Time") est une unité de mesure usuelle du taux de défaillance d'un lot de composants ($h^{-1} \cdot \text{composant}^{-1}$) et 1 FIT correspond à un défaut pour 1 milliard d'heures cumulées de fonctionnement. Par exemple, avec un taux de défaillance moyen de 500FITs, 99,56% des composants d'un même lot survivront la première année de fonctionnement [40, 41]. La durée de vie moyenne MTBF ("Mean Time Between Failure") d'un lot est donnée de manière générale par :

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1-35)$$

Au cours de la vie d'un composant, on peut distinguer trois phases distinctes suivant les défaillances apparues sur le composant. L'évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ au cours du vieillissement est présentée en figure 27 et se caractérise par une courbe en "baignoire" décomposé en trois zones [40, 41]:

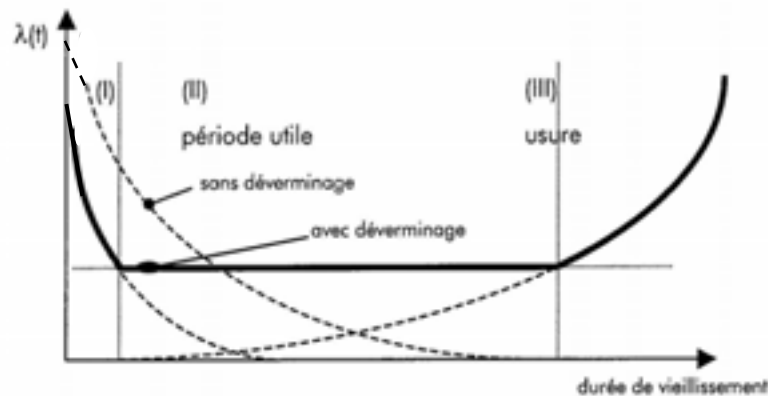


Figure 27 : Evolution du taux de défaillance au cours du temps

Zone I : défaillances intrinsèques

Le taux de défaillance λ est élevé dans les premières heures ou semaines de vieillissement du fait de la défaillance prématurée de composants non représentatifs de l'état moyen d'un lot. Ces composants correspondent souvent à des défauts technologiques (inhomogénéité de la plaque considérée, mauvaise manipulation...) ou à des conditions de mesure ou de vieillissement mal contrôlées (décharges électrostatiques...), on parle dans les deux cas de défauts de jeunesse.

L'énergie d'activation de ces dégradations est faible de l'ordre de 0,2 à 0,4eV [41]. On observe dans cette zone la décroissance rapide de $\lambda(t)$ et celui-ci atteint un pallier qui correspond à la vie utile du composant. Comme la figure 27 le montre, la fiabilité d'un lot de composants est donc améliorée après une phase de déverminage qui consiste à éliminer les composants à mort prématurée.

Zone II : période de vie utile

Un nombre relativement faible de composants atteignent le seuil de défaillance dans la région II : on parle alors de défaillance aléatoire. Ces défaillances aléatoires sont attribuées à des malfaçons ou à une mauvaise maîtrise de la fabrication (le taux de défaillance mesure ici directement la qualité du produit). Le niveau de fiabilité dans cette région doit alors être porté à un niveau acceptable pour le fabricant et l'utilisateur car cette période correspond à la vie utile du produit. La valeur de ce niveau tend actuellement vers 0 pour des composants dont la technologie est mature comme la technologie silicium. Pour ces technologies, il devient alors très difficile d'estimer la durée de vie par les méthodes précédemment citées. Cependant, comme nous l'avons souligné précédemment, l'étude de la récente technologie AOS menée dans cette thèse d'un point de vue de la fiabilité reste étroitement liée à la courbe $\lambda(t)$ dite en baignoire. L'ensemble de ces remarques sera développé dans le chapitre 3.

Zone III : défaillances extrinsèques - vieillissement

Après quelques milliers d'heures de fonctionnement de plus en plus de composants atteignent le seuil de défaillance et la cause principale de dégradation est alors l'usure des composants : $\lambda(t)$ augmente dans la zone (III). L'amélioration de l'usure des composants passe par des modifications de la structure interne de celui-ci, des conditions de vieillissement et des technologies mises en jeu dans sa fabrication. Les modèles mathématiques présentés ci-dessus sont directement reliés aux lois de survie exposées ci-dessous.

⇒ Contraintes actuelles sur le taux de défaillance $\lambda(t)$: "roller-coaster curve"

Les niveaux actuels de fiabilité des composants optoélectroniques doivent répondre à une problématique particulière, illustrée en figure 28. En effet, la stabilisation des procédés de fabrication (épitaxie) et de report (brasure) entraîne des taux de défaillance extrêmement faibles ($\lambda \approx 0$) dans la zone de vie utile du composant (15 ou 25 ans) rendant très difficile l'évaluation expérimentale des paramètres caractéristiques de la fiabilité tels que, par exemple, la durée de vie moyenne des composants étudiés. Afin de résoudre cette difficulté, des outils statistiques de prévision de la fiabilité, fortement détaillés dans la suite de ce paragraphe, ont alors été mis en œuvre.

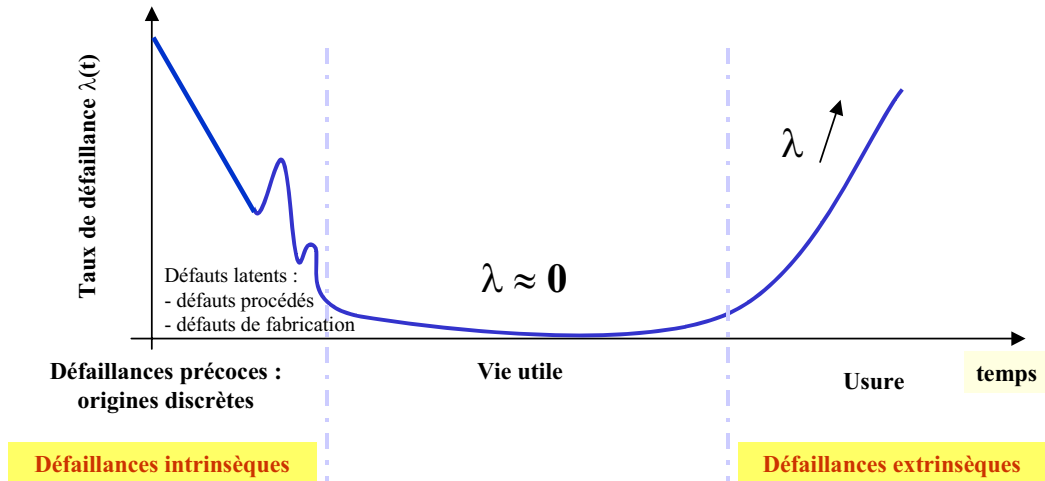


Figure 28 : Evolution du taux de défaillance en fonction du temps de vie d'un composant électronique actuel

5.3.2/ Lois de survie

Les lois statistiques les plus utilisées permettant de rendre compte du comportement en vieillissement d'un lot de composants sont les suivantes, où la variable t désigne un instant t donné de la vie du composant [14, 41] :

- La loi **exponentielle** qui rend compte du cas où $\lambda(t)$, est constant, avec une loi de type :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1-36)$$

- La loi de **Weibull** s'applique aux dispositifs ayant plus d'un mode de défaillance avec une loi de type :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (1-37)$$

avec :

- η désigne un paramètre appelé pente de Weibull.

β correspond à un paramètre traduisant le vieillissement :

avec :

- $\beta < 1$: défaut de jeunesse,
- $\beta = 1$: pas de vieillissement,
- $\beta > 1$: défaut d'usure.

- La loi **normale** s'applique pour un mode principal de défaillance par usure :

$$F(\mu, \sigma) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (1-38)$$

avec :

- μ désigne la moyenne de la variable t de Weibull,
- σ désigne l'écart type de la variable t .

- La loi **log-normale** est la plus utilisée pour les composants à semiconducteur.

Dans la région d'usure, le logarithme de la durée de vie évolue selon une distribution normale :

$$F(m,s) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln t - m}{\sqrt{2s}} \right) \right] \quad (1-39)$$

avec :

- m et s sont obtenus par : $\mu = e^{m + \frac{s^2}{2}}$ et $\sigma = \mu \sqrt{(e^{s^2} - 1)}$.

5.4/ Approches d'évaluation de la fiabilité en optoélectronique

L'évolution de la technologie des composants optoélectroniques et notamment l'apparition de nouvelles structures comme les modules hybrides formés d'un nombre important de matériaux hétérogènes (matériaux III-V, brasure...), d'une connectique filaire dense avec une intégration de puissance toujours plus grande, poussent les fabricants de ces composants à accroître la qualité et donc la fiabilité de leur produit [46, 47, 48]. Dans ce paragraphe, les deux principales approches, pour mener une étude de fiabilité des composants optoélectroniques et en particulier estimer leur durée de vie, sont synthétisées. La première méthode d'étude de fiabilité effectuée sur ces composants est basée sur la méthode d'estimation associée à une étude en fonctionnement accéléré. La seconde méthode permet d'envisager une nouvelle approche de la fiabilité. Ces deux approches d'estimation de la fiabilité en optoélectronique, ainsi que les résultats expérimentaux de celles-ci, sont développées ci-dessous [46, 47, 48].

➤ *Approche par la méthode d'estimation associée à une étude en vieillissement accéléré*

Afin de répondre aux exigences des différents réseaux de télécommunications optiques, les normes Telcordia (GR 468, GR1221...) ont été établies, permettant de définir les différents tests de qualification (tests mécaniques et thermiques) et les objectifs en terme de durée de vie que doivent tenir les composants optoélectroniques, pour les télécommunications [46]. En effet, afin de garantir la fiabilité d'un réseau de transmission optique, il faut estimer la fiabilité de chacun de ses éléments tout en conservant à l'esprit que la durée de vie du système ne résulte pas du produit des durées de vie relatives aux différents éléments mais d'un calcul plus complexe. Ce calcul prend en compte la durée de vie de chacun des éléments du système, associée à un facteur de pondération ; celui-ci représentant l'importance du composant par rapport à l'ensemble du système considéré. Il est donc nécessaire de qualifier et certifier les composants optoélectroniques suivant leur type pour les recommandations des normes Telcordia (tableau 6).

Normes Telcordia	Champs d'application
GR-1221-CORE E	Fibre optique Fibre optique
GR-1221-CORE GR-468-CORE GR-1312-CORE	Composants passifs Composants passifs Amplificateurs optiques (EDFA, SOA)

Tableau 6 : Champs d'application relatifs aux normes Telcordia [69, 70, 71]

Comme nous l'avons vu précédemment, un réseau de transmission optique est constitué de trois éléments essentiels : l'émetteur, les amplificateurs optiques et le récepteur. Chacun de ces éléments doit donc répondre à différentes exigences :

- L'émetteur doit transmettre un débit de données dont l'ordre de grandeur est de l'ordre de plusieurs dizaines de Gbits/s au minimum, tout en maintenant une puissance optique stable à sa sortie de 10% minimum, par rapport à son entrée, et une longueur d'onde stable de 1550nm avec une incertitude de 100pm autour de celle-ci.
- Les amplificateurs optiques doivent avoir un gain stable d'environ 25dB avec une incertitude maximum de 0,5dB. Ils doivent également être indépendants de la longueur d'onde pour une longueur d'onde de 1550nm et leur comportement ne doit pas dépendre de la température.
- Le récepteur doit convertir le signal optique en signal électrique avec un débit de données transmises identique à celui de l'émetteur.

De plus, dans les applications terrestres, en terme de fiabilité sur 15 ans, le nombre de FITs pour l'émetteur doit être inférieur à 500 (applications DWDM) et à 300 (applications WDM). Pour l'amplificateur optique, le nombre de FITs doit être inférieur à 1000 et pour le récepteur, inférieur à 100. Pour les applications sous-marines, étant donné la difficulté et le prix de la mise en œuvre de la maintenance des trois types d'éléments (émetteur, amplificateur et récepteur), le nombre de FITs pour ces trois éléments doit être inférieur à 100 sur une durée de 25 ans. Dans le but de qualifier et de certifier, vis à vis des normes Telcordia, les composants commercialisés, ALCATEL Optronics procède à la comparaison, présentée ci-dessous, entre les exigences des recommandations des normes Telcordia et les résultats expérimentaux obtenus après l'application de la méthode d'estimation de la fiabilité effectuée pour les trois types d'éléments constituant un réseau de télécommunication optique (émetteur, amplificateurs optiques et récepteur) [46]. Cependant, la durée de vie du système estimée, par ALCATEL Optronics, est évaluée en effectuant la somme des durées de vie de chaque élément constituant ce système. Le choix de ce calcul a été effectué car il permet de prendre en compte le cas le plus pessimiste pour l'estimation de la durée de vie d'un système (notion reprise dans le chapitre 3).

Emetteur optoélectronique

Afin d'estimer la fiabilité de l'émetteur, il faut étudier celle de chacun de ses éléments [46]. En effet, quel que soit le réseau de télécommunication considéré, l'émetteur est constitué de plusieurs éléments :

- un circuit électronique,
- une diode laser,
- des coupleurs fibrés,
- un régulateur en température et une thermistance.

En premier lieu, la fiabilité de l'ensemble, constitué par le circuit électronique, le régulateur en température et la thermistance, n'est, en général, pas prise en compte lors de l'estimation de la durée de vie de l'émetteur. En effet, les technologies associées à ces composants étant actuellement matures, l'adéquation, entre les exigences de leurs normes et les résultats expérimentaux obtenus, est une réalité. Au contraire pour le composant laser et le coupleur, il est nécessaire de faire une étude approfondie de leurs mécanismes de dégradation afin de pouvoir estimer leurs durées de vie. Pour cela, le service de qualification d'ALCATEL Optronics effectue des tests de vieillissement accéléré sur de nombreux lasers durant des milliers d'heures. Les résultats de cette étude montrent deux types de mécanismes de dégradation pour ces deux composants (diode laser et coupleur) : une dégradation due à l'usure des composants et une dégradation soudaine non prévisible [46]. Le tableau 7 synthétise les résultats expérimentaux obtenus après l'étude des mécanismes d'usure de la diode laser.

Critère d'usure : Perte de la stabilité	Facteur de dégradation	Modèle d'estimation du taux de défaillance	Energie d'activation du mécanisme de dégradation (en eV)	Type de distribution de la défaillance
Sur la puissance de la diode laser	Courant de seuil	Arrhénius	$0,6 < E_a < 0,9$	Log-normale
Sur la longueur d'onde	Longueur d'onde	Arrhénius	$0,5 < E_a < 1$	Log-normale
Électrode (diffusion métallique)	Courant de fuite	Arrhénius	$0,4 < E_a < 1$	Log-normale ou Weibull
Report (Electromigration/intermétallique/ fatigue thermique)	Courant de fuite	Arrhénius	$0,4 < E_a < 1$	Log-normale

Tableau 7 : Synthèse des mécanismes d'usure d'un composant laser

Les mécanismes de dégradation soudains du composant laser sont, quant à eux, difficiles à évaluer. En effet, ceux-ci étant directement liés au procédé de fabrication, ils dépendent donc entièrement de celui-ci. Les principales étapes de fabrication, pouvant être à l'origine de ces dégradations, sont le traitement des miroirs ou le montage de la puce sur son embase.

Par exemple, lors du montage de la puce sur son embase, une diffusion du métal de l'électrode vers le composant peut être constatée et donner lieu à une dégradation catastrophique du composant. Ces composants sont également très sensibles aux ESDs. Cependant, chacune de ces dégradations a une solution technologique adaptée. Par exemple, pour réduire les dégradations de ces composants dues aux ESD, il suffit que l'opérateur soit relié à la masse. Actuellement, la seule de ces dégradations restant critique est l'existence de défauts de surface relatifs aux différentes étapes d'épithaxie lors de la fabrication de la puce. Ces défauts donnent lieu à un mécanisme de dégradation soudain difficile à accélérer, car son énergie d'activation est très basse. Néanmoins malgré celui-ci, l'étude a montré, pour les composants laser, des résultats inférieurs à 100FITs sur une statistique de 1000 lasers. Ces composants correspondent aux exigences des recommandations des normes Telcordia.

L'étude, des mécanismes d'usure des coupleurs, met en évidence que les origines de ces mécanismes sont de type mécanique ou thermomécanique. En effet, ils sont reliés aux contraintes mécaniques et à la relaxation des contraintes thermomécaniques lors des différentes étapes de l'assemblage de l'ensemble émetteur mais aussi lors du couplage de celui-ci avec la fibre optique (éléments passifs de couplage) [46]. En général, ces dégradations se traduisent par une dérive de la puissance optique graduelle ou catastrophique décrite par une loi exponentielle. Néanmoins, lors de tests de vieillissement accéléré, peu de défaillances sont observées. Ceci ne permet donc pas d'évaluer la loi de distribution de la dégradation. Mais si les différentes techniques de l'assemblage sont maîtrisées, on considère alors que la contribution au taux de défaillance de l'émetteur est négligeable. De même, les mécanismes de dégradation soudains des coupleurs ayant leur taux de défaillance très bas, ils sont alors également considérés comme négligeables. Après cette analyse, nous pouvons donc conclure que l'ensemble émetteur d'ALCATEL Optronics répond aux exigences des recommandations des normes Telcordia [46].

Amplificateurs optiques

L'étude de l'estimation de la fiabilité des amplificateurs optiques est basée sur l'étude du module, actuellement le plus utilisé en tant qu'amplificateur en ligne pour une longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$: le module EDFA. Afin d'estimer la fiabilité de ce module, il faut étudier celle de chacun de ses éléments [46]. En effet, quel que soit le réseau de télécommunications considéré, un module EDFA est constitué de plusieurs éléments différents assemblés :

- fibre dopée Erbium,
- la diode laser de pompe,
- les composants passifs (isolateurs optiques fibrés, coupleurs optiques fibrés, multiplexeurs optiques fibrés, filtres optiques fibrés) et des photodiodes fibrées.

Pour étudier la fiabilité du module EDFA, il faut donc considérer les mécanismes de dégradations :

- de la diode laser de pompe identiques à ceux du composant laser, élément de l'émetteur, déjà décrits dans le paragraphe précédent,
- des isolateurs optiques, des coupleurs optiques, des multiplexeurs optiques, des filtres optiques, tous fibrés, qui sont des mécanismes de dégradation soudains décrits ci-dessous,
- des photodiodes décrits dans la suite de ce paragraphe lors de la description du récepteur,
- de l'assemblage des différents composants de ce module.

Quelle que soit la technologie des composants optiques passifs, leurs dégradations sont engendrées par des contraintes mécaniques comme, par exemple, le déplacement ou la casse de la fibre optique dans la fêrle. Ces mécanismes de dégradation se distinguent par un taux de défaillance constant et moyenné en fonction de la configuration technologique. Ils ne nécessitent donc pas d'étude spécifique pour l'estimation de leurs durées de vie [46]. De plus l'assemblage mécanique, dont le risque de dégradation est dû aux chocs, aux vibrations et aux contraintes thermiques, n'est également pas pris en compte dans l'estimation de la fiabilité du module EDFA. En effet, il est, en général, testé lors de l'étude spécifique des chocs et vibrations auquel est soumis l'amplificateur optique dans son ensemble [46]. Les résultats expérimentaux de l'estimation de la fiabilité de l'amplificateur optique sont de l'ordre de 1000 FITs pour une durée de 15 ans dans les conditions du profil de mission (applications terrestres). Après cette analyse, nous pouvons donc conclure que l'amplificateur optique **EDFA**, solution technologique actuellement utilisée pour l'amplification optique, d'ALCATEL Optronics répond également aux exigences des recommandations des normes Telcordia.

Récepteur optoélectronique

Comme nous l'avons vu précédemment, afin d'estimer la fiabilité du récepteur, il faut étudier celle de chacun de ses éléments [46]. En effet, quel que soit le réseau de télécommunication considéré, le récepteur est constitué de plusieurs éléments :

- une photodiode,
- un circuit électronique de resynchronisation et de remise en forme de l'information.

Les mécanismes de dégradation de la photodiode sont identiques à ceux de la diode laser de l'émetteur. Le principal mécanisme de dégradation est donc celui observé lors d'une fuite de courant dans la diode. L'origine de celle-ci est liée aux défauts de surface qui apparaissent lors de la passivation du composant. Cette dégradation est étudiée uniquement par rapport aux résultats expérimentaux car elle ne peut être décrite par un modèle de dégradation. Les résultats expérimentaux ont montré que sa distribution évolue selon une tendance log-normale et son énergie d'activation est comprise entre 0,4eV et 0,6eV. Aujourd'hui, la qualité de la surface de passivation atteinte tend à donner de bons résultats de fiabilité. Après cette analyse, nous pouvons donc conclure que l'ensemble récepteur d'ALCATEL Optronics répond aux exigences des recommandations des normes Telcordia [46].

Afin d'achever la comparaison entre l'étude expérimentale de la fiabilité par l'approche de la méthode d'estimation et les exigences des normes Telcordia pour les éléments d'un réseau de télécommunications optiques, la figure 29 présente, les résultats expérimentaux obtenus par ALCATEL Optronics et les exigences des recommandations des normes Telcordia, en terme de FITs sur 15 ans. Cette figure permet de constater que le nombre de FITs le plus important est celui des amplificateurs optiques. Ce résultat montre la fragilité de ces éléments comparés à ceux de l'émetteur et du récepteur dans un réseau de télécommunications optiques. Cependant, le nombre élevé de FITs peut également être expliqué par la constitution de l'amplificateur optique. En effet, quelle que soit la méthode d'estimation utilisée pour la durée de vie, plus il y a de composants, plus le nombre de FITs est élevé. Or l'amplificateur optique est celui qui nécessite le plus grand nombre de composants.

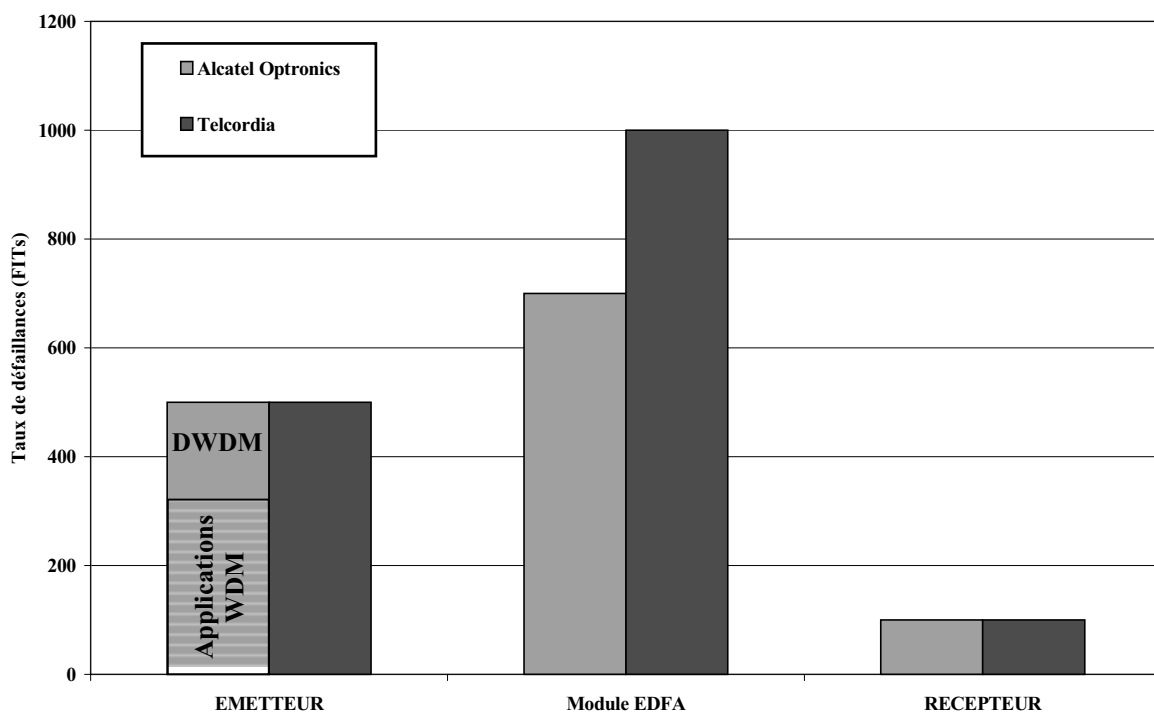


Figure 29 : Comparaison des taux de défaillance (FITs) des éléments de base typiques d'un réseau actuel de télécommunications par fibre optique 1,55 μ m

L'étude de la fiabilité des composants optoélectroniques d'ALCATEL Optronics par la méthode d'estimation associée à une étude en vieillissement accéléré, a été présentée à titre d'illustration et démontre la relative lourdeur d'une telle méthode. Néanmoins, les fabricants de composants optoélectroniques pour les télécommunications procèdent de manière identique pour la qualification de leurs produits. Cette approche a pour principal avantage de faciliter la comparaison des performances de composants commercialisés par différents fabricants et donc d'optimiser et de valider le choix marketing de composant en fonction des applications visées. Cependant, l'utilisation des normes Telcordia suscite, auprès des fabricants de composants, des interrogations soulignées au sein du prochain paragraphe [46].

➤ *Nouvelle approche pour l'estimation de la fiabilité des composants optoélectroniques*

Au travers de différentes communications, l'utilisation des normes Telcordia a été progressivement remise en cause par les fabricants de composants à haute valeur ajoutée et haute fiabilité [47, 48]. En effet, plusieurs inconvénients ont été identifiés, comme :

- la qualification du produit s'effectue de façon générale en fin de conception limitant la réactivité de la chaîne de production et ne permettant donc pas de modification du produit sans engendrer des délais et des coûts supplémentaires,
- des défaillances ont été observées en conditions opérationnelles sur certains produits pourtant qualifiés,
- les tests pré-définis ne sont pas forcément en adéquation avec l'environnement et la fonctionnalité des composants testés.

De plus, les innovations dans le domaine des télécommunications optiques étant toujours plus nombreuses, elles ne peuvent pas être prises en compte par les normes Telcordia. L'utilisation de cette norme apparaît de plus en plus comme obsolète. Afin de répondre aux réelles exigences de la qualification d'un produit actuel de technologie mature, un nouveau processus d'estimation de la fiabilité est donc proposé par ALCATEL Optronics. Ce processus prend naissance dès la première phase de développement du composant et propose la définition de nouvelles phases dans le plan de qualification du composant. Ce nouveau processus de qualification d'un composant est constitué de quatre étapes principales :

- définition des exigences en terme de fiabilité pour le composant considéré,
- analyse de risques technologiques et plan de test associé,
- tests de robustesse,
- tests de qualification.

La première étape de ce processus a pour but d'évaluer les contraintes environnementales et fonctionnelles du composant considéré. En effet, la connaissance de celles-ci permet d'établir les critères de fiabilité de ce dernier, comme par exemple, l'établissement de la durée de vie et du nombre de FITs imposés au composant. La définition de ces critères se fera grâce à un constant dialogue entre le client et le fabricant. Si cet échange donne lieu à une description complète du cycle de vie, alors les objectifs en terme de fiabilité pour ce composant pourront être quantifiés, permettant ainsi au fabricant, d'identifier les étapes technologiques critiques de la conception de ce composant. Après cette identification, la seconde phase de la nouvelle approche de la fiabilité est mise en œuvre. Basée sur les connaissances des contraintes environnementales et fonctionnelles du composant, l'analyse de risques technologiques est effectuée. Pour cela, les différentes équipes intervenant dans le projet de fabrication du composant (concepteurs du produit, ingénieurs de qualification...) sont réunies afin de définir quels sont les risques majeurs de la conception de ce composant.

Puis, en fonction de la classification de ces risques, un plan de test est mis en œuvre (tests mécaniques, tests environnementaux...) sur plusieurs ou la totalité, des composants considérés en vue d'évaluer expérimentalement ces risques. Cette évaluation permettra éventuellement de mettre en place de nouvelles solutions technologiques en vue de minorer les risques majeurs de la fabrication. Ce plan d'expérience peut être associé à une étude par simulation (thermique, mécanique et thermomécanique) pour obtenir un complément d'informations et déterminer ainsi le seuil critique des risques évalués. La troisième étape de ce processus continu de qualification consiste à apprécier la robustesse du composant et à identifier les contraintes des tests de vieillissement à appliquer à celui-ci.

Une première approche consiste en l'application de contraintes échelonnées pour estimer les niveaux de contraintes environnementales maximums à appliquer au composant tandis que les tests de vieillissement appropriés caractérisent les facteurs d'accélération existants (par exemple : la température ou le courant) pour le type de composant considéré. La dernière étape de cette étude consiste en la définition d'une matrice de tests de qualification prenant en compte les données de l'analyse de risques et les résultats expérimentaux obtenus lors des étapes précédentes. Les tests de vieillissement de cette nouvelle approche de la fiabilité sont identiques en tout point à celles de l'approche par la méthode d'estimation associée à une étude en vieillissement accéléré sauf en terme d'envergure, cette différence étant primordiale car elle signifie un gain significatif de délais et de coûts pour le fabricant. De plus, entrepris tout au long du cycle de conception du produit, ce nouveau processus de qualification implique plusieurs adaptations :

- prendre en compte les premiers résultats expérimentaux obtenus après la production du premier lot de composants considérés,
- assurer le suivi des paramètres électro-optiques essentiels à l'observation de l'évolution des composants (courant de seuil, puissance optique...),
- réaliser des tests périodiques pertinents de qualification pour vérifier que les tests initiaux restent en adéquation avec l'évolution du produit et de son environnement,
- développer de nouvelles méthodes de travail afin de pouvoir atteindre les objectifs de ce procédé de qualification.

Cette nouvelle approche est adaptée aux technologies innovantes du domaine optoélectronique (modules) tout en proposant aux équipementiers un haut niveau de fiabilité de ces composants. Néanmoins, cette méthode reste récente et dédiée aux modules OEIC ("Optoelectronic Integrated Circuits") garantissant un couplage optique maximum. Compte tenu du fait que la technologie des AOSs transférés, elle n'a pu être appliquée lors de ces travaux de recherche, mais ces derniers s'inscrivent naturellement dans cette démarche et ils ont contribué à son aboutissement notamment pour l'étude de la fiabilité du composant avec son encapsulation ou des modules (4 AOSs) lors de la qualification finale de ce produit.

L'ensemble de l'étude de la fiabilité d'un AOS fera donc essentiellement référence à la première approche par la méthode d'estimation associée à une étude expérimentale en vieillissement accéléré comme développée dans le paragraphe précédent.

5.5/ Synthèse

Les principes, exposés ci-dessus, sont les éléments de base de l'étude de la fiabilité de composants optoélectroniques et les deux approches d'étude de la fiabilité des composants optoélectroniques (méthode d'estimation associée à une étude en fonctionnement accéléré et la nouvelle approche développée par ALCATEL) ont également été abordées. De plus, comme nous venons de le souligner, l'estimation de la durée de vie de composants n'est garantie qu'à la condition que de nombreux moyens de tests expérimentaux soient mis en œuvre.

Pour cela, le milieu industriel se doit donc d'être particulièrement impliqué dans cette démarche afin de pouvoir garantir la fiabilité de nouveaux composants [47, 48].

Ce dernier point constitue une des raisons pour lesquelles, la Direction du Développement d'ALCATEL Optronics et le Laboratoire IXL ont initié ce sujet d'étude permettant de mettre en pratique des éléments de cette nouvelle démarche sur un composant en cours d'évolution technologique : l'amplificateur optique à semiconducteur.

6/ CONCLUSION – OBJECTIFS DE L'ETUDE

D'un point de vue industriel, la mise sur le marché d'un nouveau composant nécessite la maîtrise du procédé de fabrication dans le but de garantir la fiabilité de ce composant. En effet, celle-ci est un critère de choix important pour les équipementiers car elle permet de connaître le comportement dans le temps des composants qu'ils introduisent dans leurs systèmes pour un profil de mission donné.

L'évaluation générale de la fiabilité des composants, se fait par l'intermédiaire de tests de vieillissement accélérés. Ces derniers ont pour but de garantir le maintien des performances d'un composant sur une période donnée en conditions opérationnelles. Il s'agit de tests réalisés dans des conditions de fonctionnement plus sévères que celles appliquées en conditions opérationnelles. Concernant les composants optoélectroniques pour des applications de télécommunication, les tests les plus répandus utilisent des facteurs d'activation en courant et/ou en température. D'autres types de test consistent à évaluer la robustesse aux décharges électrostatiques (ESD) et aux cycles de température. Une analyse fiabiliste doit permettre de déterminer le mécanisme d'usure aléatoire le plus critique par rapport aux profils de mission du composant et de prédire la distribution des durées de vie.

L'étude des mécanismes d'usure est nécessaire car elle permet d'acquérir la connaissance des mécanismes de dégradation associés aux technologies utilisées. La dégradation d'un composant repose sur une réaction physico-chimique dans une région du composant qui dépend des conditions

extrinsèques de vieillissement appliquées (courant, température de jonction, contrainte mécanique,...) ou d'une faiblesse liée à des défauts technologiques intrinsèques. La localisation et l'identification de cette réaction vont permettre de déterminer l'origine de la dégradation. On peut, à ce stade, essayer de relier le mécanisme de dégradation à une technologie si la dégradation est systématique ou à une fluctuation du procédé de fabrication si la dégradation est aléatoire [41]. On peut également relier la cause de la dégradation à la structure du composant et proposer alors des modifications de celle-ci qui seront ensuite validées par un nouveau test de vieillissement.

La démonstration actuelle de la fiabilité des composants, à partir d'une approche physique, nécessite l'étude et la modélisation des mécanismes de défaillance. Cette démarche procède d'une méthodologie particulière puisque la fiabilité ne résulte pas d'une mesure mais d'une estimation [45, 46]. Cependant si l'on utilise la méthode d'estimation de la fiabilité, il est alors nécessaire de multiplier ces études en terme de composants et en nombre d'heures de vieillissement, signifiant une augmentation des coûts et des délais pour l'Entreprise.

En effet, la figure 30 montre que, par exemple, sous des conditions opérationnelles, la durée pour observer la première défaillance sur un lot de 10 composants est supérieure à 10^7 heures avec un intervalle de confiance de 90%. Si l'on souhaite diminuer ce délai à un mois, il faut alors utiliser 1000 composants pour le test avec des conditions de vieillissement dont le facteur d'accélération peut atteindre 60 en considérant une énergie d'activation des mécanismes de dégradation proche 0,7eV et un intervalle de confiance de 90% sur la détermination des premiers instants de défaillance. Pour pallier cet inconvénient, un outil essentiel peut alors être mis en œuvre : la modélisation des mécanismes de dégradation.

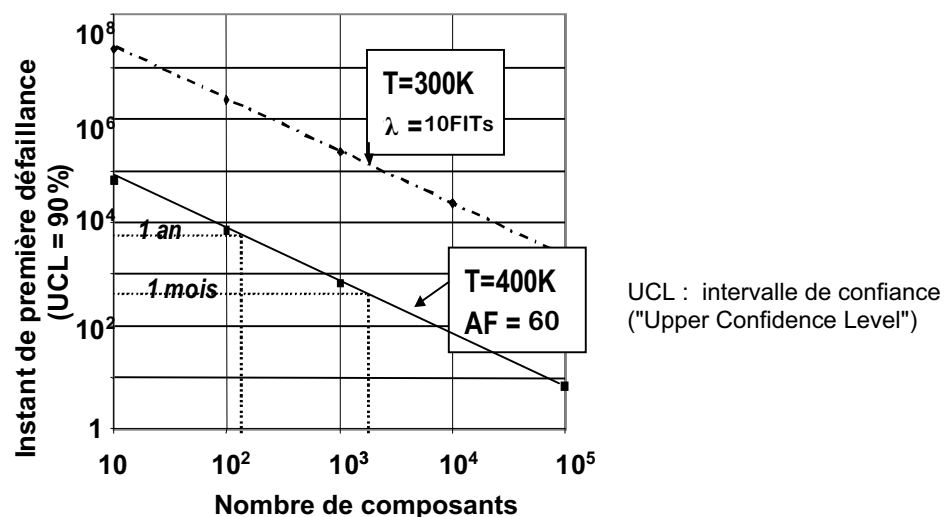


Figure 30 : Illustration du compromis nombre de composants / durée des tests

En effet, l'objectif de la modélisation et de la simulation est double : modéliser un système et caractériser les mécanismes physiques mis en jeu, mais aussi "prédire" grâce à un modèle implanté, le comportement du système sous différents tests (déverminage ou vieillissement).

La modélisation constitue donc une aide importante à l'analyse des mécanismes de dégradation [48, 49]. L'objectif de ces travaux est de s'appuyer sur cette méthodologie d'analyse de défaillance. Cette étude va donc permettre de :

- Définir des contraintes appliquées lors des tests de déverminage et de vieillissement. Prévoir le comportement des composants dans le temps au travers de signatures de défaillance caractéristiques.
- Identifier, localiser et modéliser des mécanismes physiques responsables de la dégradation des AOSs.

Le prochain chapitre va s'attacher à présenter les caractéristiques électro-optiques d'un AOS ainsi que les moyens universitaires et industriels de caractérisation adaptés à l'analyse de ces composants en initial et après l'application d'un champ de contraintes environnementales.

Chapitre 2 :

Paramètres électriques et optiques d'un AOS –
Description des moyens de caractérisation

1/ INTRODUCTION

Le premier chapitre a eu pour objectif de procéder à un rappel des propriétés physiques de l'émission optique dans les semiconducteurs ainsi qu'à une présentation détaillée des principes physiques et de l'architecture technologique d'un AOS 1,55 μ m InGaAsP/InP. Avant d'aborder la description des caractérisations expérimentales de ce composant, les propriétés électro-optiques adjointes au mode de fonctionnement d'un AOS doivent être initialement exposées afin de pouvoir mettre en œuvre la chronologie des expériences menées au cours de ces travaux. Ce deuxième chapitre est donc consacré à l'étude des paramètres électro-optiques de l'AOS transféré 1,55 μ m mais également à celle des bancs d'analyse permettant les mesures de ces paramètres. Pour étudier l'ensemble de ces éléments, trois parties ont été développées dans ce chapitre :

- ⇒ analyse et comparaison des principes de fonctionnement de la diode laser BRS et de l'AOS permettant d'appréhender le comportement de ce dernier en régime linéaire (amplification),
- ⇒ étude des caractéristiques électriques et optiques de l'AOS en fonction des paramètres technologiques menée dans la seconde partie de ce chapitre afin de valider son utilisation dans les différentes applications envisagées dans le chapitre précédent,
- ⇒ description et comparaison des moyens de caractérisation et des procédures mis en place pour mesurer les paramètres électriques et optiques caractéristiques de l'AOS unitaire 1,55 μ m. De plus, les bancs de mesure présentés nécessitant une phase d'étalonnage cruciale, une évaluation de leurs performances, associée à une étude de reproductibilité et de répétabilité, déterminante dans le cadre du processus de qualification d'une nouvelle technologie, sera effectuée en fin de chapitre.

2/ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET PARAMETRES ELECTRO-OPTIQUES D'UN AOS

Compte tenu de la forte similitude structurelle existant entre la diode laser BRS et l'AOS, la description du principe de fonctionnement de ce dernier est, au premier ordre, équivalente à celle de la diode laser BRS. Des rappels sur le fonctionnement physique d'une diode laser sont donc effectués de façon à mettre en lumière les différences clés entre les deux technologies. La théorie de la diode laser a été traitée de façon exhaustive dans un grand nombre de publications et d'ouvrages. Nous rappelons donc ici uniquement quelques notions relatives à son fonctionnement. Néanmoins, comme nous l'avons souligné précédemment, lors du procédé de fabrication de ces deux composants, une étape du procédé de fabrication diffère : le traitement de surface des miroirs (coefficients de réflexion minimums pour le AOS et maximum/minimum pour la diode laser). Les conséquences de cette particularité, déterminantes dans le mode d'utilisation normale de l'AOS, sont ensuite exposées. L'ensemble des paramètres électriques et optiques caractéristiques de la fonctionnalité d'un AOS est ensuite détaillé.

2.1/ Caractéristiques physiques et principe de fonctionnement d'un AOS : comparaison avec une diode laser

2.1.1/ Rappels sur la diode laser

☞ Principe de fonctionnement

La diode laser est un dispositif optoélectronique émettant de la lumière par le phénomène d'émission stimulée de photons dans un matériau semiconducteur à gap direct. Pour se placer dans les conditions à l'origine de l'émission stimulée, il est nécessaire de fortement peupler la bande de conduction du matériau de la zone active appelé phénomène d'inversion de population. Pour accéder à cet état, on a recours à un pompage électrique classique réalisé grâce à une jonction PN polarisée en direct (structure verticale) [22, 36]. Statistiquement, il existe une forte probabilité pour qu'un électron peuplant les niveaux de la bande de conduction se recombine de manière spontanée avec un trou localisé sur les niveaux de la bande de valence donnant lieu à l'émission d'un photon dit spontané. Au passage d'un photon à proximité de la paire électron-trou, un électron peut se recombinaison en émettant un photon dit "stimulé" dont le rayonnement correspond à une longueur d'onde, une phase, un état de polarisation et une directivité spatiale identiques au photon incident [38, 39]. Deux conditions sont alors nécessaires pour favoriser l'émission stimulée et obtenir un effet laser :

- un nombre élevé de paires électron-trou dans un état énergétique supérieur (inversion de population acquise avec le pompage électrique)
- un flux important de photons excitateurs, dont l'origine est l'émission spontanée et pouvant amorcer l'émission stimulée, enfermés dans une cavité résonante par exemple un résonateur de type Fabry-Pérot.

Ce type de résonateur est constitué, dans le cas le plus simple, par deux miroirs plans parallèles et réfléchissants. On considère une cavité optique de longueur L , de type Fabry-Pérot, dont les coefficients de réflexion en amplitude de l'onde aux extrémités sont notés R_1 et R_2 , comme illustrée en figure 31 :

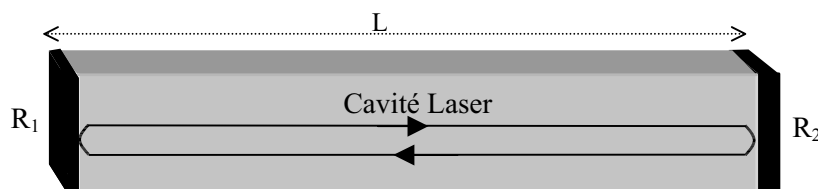


Figure 31 : Cavité laser semiconductrice de type Fabry-Pérot

Dans le cas d'un semiconducteur, les facettes clivées du cristal sont utilisées pour constituer les miroirs de la cavité. L'indice élevé du semiconducteur (entre 3 et 4) permet d'obtenir un coefficient de réflexion suffisant pour provoquer des allers-retours de l'onde.

La cavité ainsi obtenue possède un coefficient de qualité relativement médiocre mais le fort gain disponible dans les semiconducteurs permet l'établissement du régime d'amplification laser.

Lorsque l'apport d'énergie devient suffisant pour que le gain maximum de photons, sur un aller-retour de l'onde dans la cavité, compense les pertes dans la cavité - pertes provoquées par des centres diffusants ou par absorption liée au grand nombre de porteurs libres)- alors l'oscillation laser se produit. Dans l'approximation d'une onde plane se retrouvant identique à elle-même après un aller-retour (changement net d'amplitude égal à 1) et si on note $R = (\sqrt{R_1} \sqrt{R_2})$, la réflectivité moyenne des miroirs associée à la cavité optique constituant le milieu amplificateur, la condition d'apparition de l'oscillation laser est alors inversement proportionnelle à R définie par [22] :

$$G_{\text{seuil}} = \frac{1}{R} \quad (1-40)$$

Le phénomène d'amplification est donc directement attaché à l'existence d'un gain optique, relié au gain du matériau semiconducteur. Les performances de la diode laser sont alors, majoritairement, fixées par cette caractéristique principale. A mesure que l'on injecte des porteurs, le peuplement croissant des bandes de conduction et de valence correspond à une augmentation de l'écart ΔF des niveaux de Fermi (E_{Fn} et E_{Fp}). L'injection de porteurs dans la région active modifie les propriétés du matériau. En l'absence de porteurs injectés, le semiconducteur est transparent pour les photons de faible énergie mais dès que l'énergie du photon incident devient plus grande que la largeur de la bande interdite (ΔE_g), il apparaît une très forte absorption. Lorsque le courant injecté au travers de la jonction et la densité de porteurs augmentent, il apparaît alors un gain optique positif sur une plage d'énergie. Ce gain positif disponible dans le semiconducteur est provoqué par l'inversion de population obtenue pour un certain peuplement des bandes lorsque ΔF est supérieur à ΔE_g . De plus, le maximum du gain optique augmente et se déplace vers les courtes longueurs d'onde corrélativement à l'augmentation du nombre de porteurs.

Des précisions sont donc apportées, ci-dessous, quant aux principales équations du paramètre gain matériau, dont découle l'amplification optique, mais également sur les caractéristiques structurelles de la cavité laser, brique de base pour générer une oscillation laser.

➤ *Condition d'amplification optique*

L'expression du gain matériau constitue une équation fondamentale pour les diodes laser car, de celle-ci, découle directement la condition permettant d'obtenir un gain optique dans un matériau semiconducteur. En effet, par une méthode, fondée sur un formalisme particulier, non détaillée ici car peu utilisé dans le cadre de cette étude, l'expression simplifiée du gain matériau s'écrit [21, 22] :

$$g_{\text{mat}} = \frac{A}{\pi^2} \int_0^{\infty} |R_{cV}(k)|^2 \frac{f_c(k) - f_v(k)}{(\hbar\omega - (E_c(k) - E_v(k)))^2 + (\frac{\hbar}{\tau_{in}})^2} k^2 dk \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (1-41)$$

avec, pour le matériau considéré (ici, celui de la zone active de la diode laser BRS 1,55 μm) :

- A : constante dépendant de la longueur d'onde et de l'indice optique,
- $R_{cv}(k)$: élément de la matrice optique de ce matériau,
- $f_c(k)$ et $f_v(k)$: probabilités d'occupation respectivement des états de la bande de valence et de la bande de conduction déjà définies dans le premier chapitre,
- E_c et E_v : énergies de bandes de conduction et de valence,
- τ_{in} : temps de relaxation intra-bande, typiquement de l'ordre de 0,1ps pour un semiconducteur
- $\hbar\omega$: énergie des photons incidents.

Si l'on considère que τ_{in} tend vers l'infini (matériau dépourvu de tout défaut), l'expression du gain matériau peut se mettre sous la forme :

$$g_{mat} = \alpha(\omega) (f_c(\hbar\omega) - f_v(\hbar\omega)) \quad (1-42)$$

avec, α : coefficient d'absorption lorsque la population de la bande de conduction est nulle.

Ce coefficient est alors proportionnel à $\sqrt{\hbar\omega - E_g}$, où $E_g \approx [E_{cmin}(k) - E_{vmax}(k)]$, pour les photons d'énergie supérieure à celle du gap du matériau considéré. On en déduit la condition nécessaire pour l'obtention d'un gain optique pour le matériau considéré :

$$E_{fn} - E_{fp} > \hbar\omega > E_g \quad (1-43)$$

Cette condition est appelée la condition de Bernard et Duraffourg. Elle est à l'origine du phénomène d'émission stimulée notamment au travers de l'expression du taux net d'émission stimulée (R_{stnet}). Cette situation correspond à la situation dite d'inversion de population (pompage électrique) pour laquelle $F_c(E_2) > F_v(E_1)$ [38, 39, 40]. Puis, quand le courant de polarisation devient égal à une certaine valeur (I_{th}) pour laquelle le gain de la cavité laser est supérieur aux pertes de celle-ci ($G = G_{seuil}$), alors le phénomène d'oscillation laser apparaît. Ce courant, I_{th} , est appelé courant de seuil de la diode laser. Le phénomène d'émission stimulée est alors prépondérant devant les autres processus de recombinaisons radiatives et non radiatives.

➔ Conditions d'oscillation laser

Les résultats du paragraphe précédent ont montré que si une inversion de population est effective pour une cavité laser, c'est à dire que la densité de population de l'état excité est supérieure à celle de l'état fondamental, cette cavité laser devient alors un milieu amplificateur pour un signal optique incident. En introduisant un système de contre-réaction optique (β) sur le signal amplifié, le système oscille alors spontanément : phénomène d'oscillation laser.

Les deux miroirs, traités anti-réflexion (R_{\max}/R_{\min}) constituent la contre-réaction optique de la diode laser. Si l'on considère un signal optique (onde plane) se propageant dans la direction normale aux faces de ces deux miroirs, après un aller-retour dans la cavité laser, la variation de phase s'écrit :

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{2L}{\lambda} \quad (1-44)$$

Si $\Delta\varphi = 2\pi q$, avec q entier, le signal optique amplifié revient en phase (cohérence) avec le signal optique incident. Une seconde condition pour obtenir une cavité laser résonante apparaît car la relation (1-44) implique que la longueur de la cavité doit être égale à un nombre entier de la demi-longueur d'onde :

$$L = q \frac{\lambda}{2} \quad (1-45)$$

Pour une cavité laser de longueur donnée, il existe donc une infinité de valeurs de q permettant la résonance. Une structure stationnaire du champ électromagnétique de la cavité correspond alors à chacune de ces valeurs de q nommée mode longitudinal. Ces modes se caractérisent par leur fréquence donnée par :

$$\nu_q = q \left(\frac{c}{2L} \right)$$

Les fréquences de résonance de la cavité sont séparées entre elles d'une quantité indépendante de q :

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}$$

La figure 32 illustre la modulation du spectre d'émission de la cavité d'une diode laser.

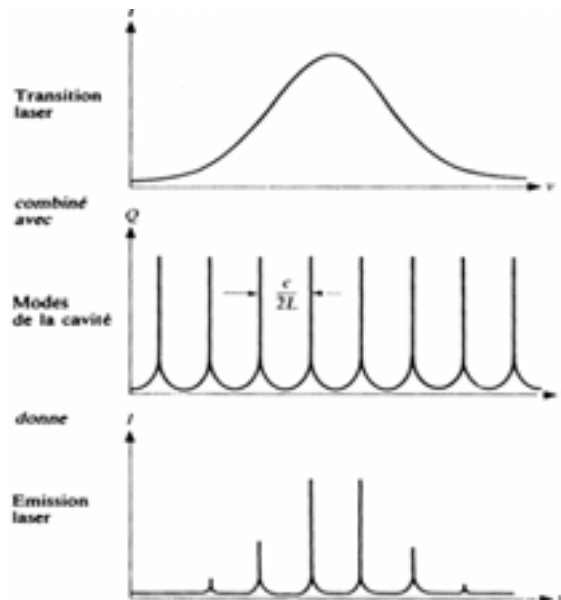


Figure 32 : (a) profil de raie laser, (b) fréquences d résonance de la cavité, (c) spectre d'émission laser d'après [73]

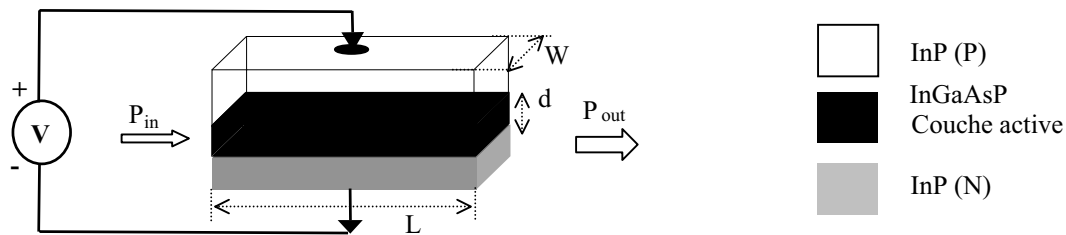
Les conditions d'obtention d'un effet laser dans une diode à semiconducteur sont donc basées sur :

- une cavité de longueur $L = q \frac{\lambda}{2}$, avec q nombre entier,
- une cavité devant être alimentée en courant permettant d'obtenir l'inversion de population,
- les miroirs de cette cavité traités R_{\max}/R_{\min} de façon à déclencher le phénomène d'oscillation laser par contre-réaction.

2.1.2/ Amplificateur optique à semiconducteur

☞ Principe de fonctionnement

Une des fonctionnalités majeures d'un AOS est d'amplifier la lumière incidente par le phénomène d'émission stimulée dans un matériau semiconducteur à gap direct. De même, que pour la diode laser, on a recours à un pompage électrique classique pour réaliser l'inversion de population [22, 36]. Les électrons de la bande de conduction se recombinent alors avec les trous de la bande de valence par émission stimulée pour amplifier le signal optique incident [38, 39]. Cependant dans l'AOS, une partie de l'émission spontanée, catalyseur de l'émission stimulée, est également naturellement amplifiée, notée ASE (Amplified Spontaneous Emission), cette notion sera explicitée dans la suite de ce paragraphe. La figure 33 présente le schéma général de fonctionnement d'un AOS dont l'empilement des couches matériaux a été simplifié dans un souci de clarté.



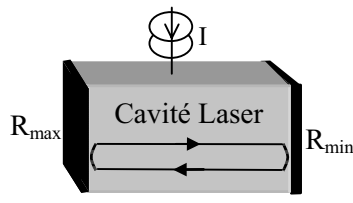
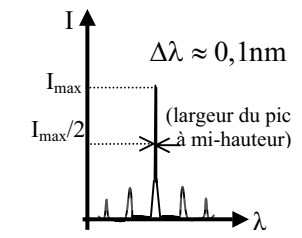
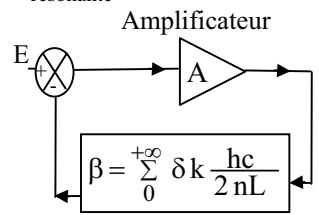
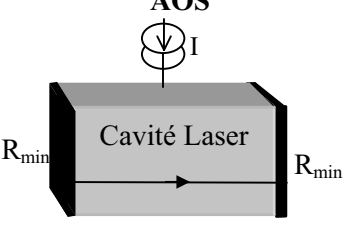
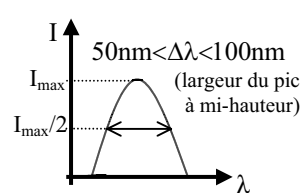
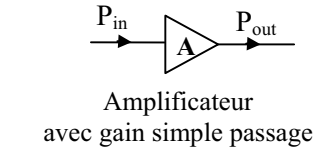
avec: L : longueur totale du AOS, W étant la largeur du AOS et d l'épaisseur de sa zone active

Figure 33 : Schéma général de fonctionnement d'un AOS

La différence technologique entre une diode laser et un AOS réside dans le fait que pour ce dernier, on cherche à éviter l'effet de contre-réaction (régime d'oscillation) pour minimiser l'effet du seuil laser. En effet, l'objectif de ce composant est d'amplifier le signal optique incident (en régime petits signaux) et non de générer un signal optique à forte cohérence. Dans les AOSs, on s'attache donc à réduire, au maximum, les coefficients de réflexion des miroirs de façon à obtenir un gain le plus élevé possible et éviter les effets de contre-réaction [21, 22]. Dans ce cas, le courant à une tension fixée sera dépendant du taux de recombinaison stimulée dans la région active lequel, à son tour, est contrôlé par l'énergie optique incidente. Ceci constitue le point fondamental de différence entre une diode laser et un AOS

puisque la photoréponse de l'AOS peut être identifiée à un effet lié à l'émission stimulée et non à l'absorption de photons à l'origine des effets photoélectriques traditionnels.

Cette spécificité a donc pour conséquence le fait que, contrairement à une diode laser, lorsque le phénomène d'émission stimulée se produit, celui-ci ne devient pas prépondérant devant les autres phénomènes de recombinaison et en particulier devant l'émission spontanée. De plus, le courant de seuil (I_{th}) défini pour la diode laser défini comme la valeur pour laquelle le gain de la cavité laser est supérieur aux pertes de celle-ci ($G=G_{seuil}$) et à partir duquel le phénomène d'oscillation laser apparaît, ne peut être défini pour ce composant puisque le gain optique ne correspond qu'à un gain simple passage. Ces notions seront abordées ultérieurement. Le tableau 8 résume les différences de principe de fonctionnement d'une diode laser et d'un AOS.

<p>Diode laser</p> 	<p>Spectre d'émission optique</p> 	<p>Modèle optique simplifié</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inversion de population (gain matériau) - Rétroaction positive par la cavité résonante 	<p>Caractéristique des recombinaisons radiatives</p> <p>Emission stimulée très prépondérante devant l'émission spontanée</p>
<p>AOS</p> 	<p>Spectre d'émission optique</p> 	<p>Modèle optique simplifié</p> 	<p>Caractéristique des recombinaisons radiatives</p> <p>Emission stimulée peu prépondérante devant l'émission spontanée</p>

avec : E =émission spontanée, A =gain du milieu entre les deux miroirs-pertes de la cavité laser et n =indice optique du matériau de la cavité laser

Tableau 8 : Comparaison de fonctionnalité entre une diode laser et un AOS

2.2/ Caractéristiques électro-optiques d'un AOS

La propriété essentielle d'un AOS, utilisée essentiellement dans une application de type "Booster", réside dans sa faculté à amplifier un signal lumineux incident. Comme nous l'avons vu pour la diode laser, cette amplification est directement liée à l'existence d'un gain optique, relié au gain matériau, dans le matériau semiconducteur. Les performances du composant sont alors majoritairement fixées par cette caractéristique principale. Néanmoins, certains paramètres, tels que le gain matériau, la longueur de la zone active ou la densité de porteurs, doivent être également pris en compte si l'on souhaite faire une description complète d'un AOS.

On rappelle donc ici les principales équations des paramètres régissant le comportement de ce composant, tels que : le gain fibre à fibre, ainsi que ses caractéristiques électriques et optiques les plus

représentatives, reflétant ses propriétés de fonctionnement [21, 22, 37]. Les moyens de caractérisation associés à l'extraction de l'ensemble de ces paramètres seront quant à eux, décrits et évalués dans une dernière partie de ce chapitre.

2.2.1/ Gain optique et gain fibre à fibre

⇒ Gain optique

Le gain G optique est défini comme le rapport entre la puissance de l'onde en sortie (P_{out}) et la puissance de l'onde en entrée (P_{in}) [21, 22, 37] :

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1-46)$$

Le gain d'un AOS est également relié au gain matériau net du semiconducteur (g_{net}). En effet, on le montre en écrivant la variation de la puissance lumineuse :

$$\frac{dP}{dz} = P g_{net} \Leftrightarrow \frac{dP}{P} = g_{net} dz \quad (1-47)$$

et en considérant la longueur totale du composant L , on obtient :

$$\ln\left(\frac{P(L)}{P(0)}\right) = \int_0^L g_{net} dz \quad (1-48)$$

En posant $P(L)=P_{out}$ et $P(0)=P_{in}$, la relation (1-41) devient :

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp\left(\int_0^L g_{net} dz\right) \quad (1-49)$$

En faisant l'hypothèse que le gain matériau net reste constant sur toute la longueur L d'un AOS, on obtient :

$$G = \exp(g_{net} L) \quad (1-50)$$

où le gain matériau net (g_{net}) est relié au gain matériau (g_{mat}) par :

$$g_{net} = \Gamma g_{mat} - \alpha_i \quad (1-51)$$

avec :

- α_i représente les pertes internes (cm^{-1}) de la structure AOS,
 - Γ est le facteur de confinement du mode de propagation.
- Les pertes internes, α_i , dans les semiconducteurs sont dues principalement à l'absorption des porteurs et dans une moindre mesure à des pertes par diffusion.
 - Le facteur de confinement Γ représente la fraction d'énergie qui est effectivement guidée dans le milieu amplificateur. Il est différent suivant la polarisation de l'onde incidente et il est donné par le rapport entre le flux d'énergie dans le guide d'onde (milieu actif) et le flux total, tous deux caractérisés par le vecteur de Poynting (1-47).

$$\Gamma_{TE, TM} = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} \int_{-w/2}^{w/2} \vec{P} \cdot \vec{e}_z dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{P} \cdot \vec{e}_z dx dy} \quad (1-52)$$

avec :

- \vec{P} est le vecteur de Poynting associé au mode TE (mode Electrique Transverse) ou TM (mode Magnétique Transverse), et (x, y, z) représente (longueur, largeur, épaisseur),
- d et W représentant respectivement la largeur et l'épaisseur de la zone active d'un AOS (cf. figure 28).

➤ Sensibilité du gain optique à la polarisation

Comme nous venons de l'évoquer, le gain d'un AOS dépend de la polarisation de l'onde incidente. Le guide de la couche active étant monomode, cette sensibilité à la polarisation peut être approximée pour les deux uniques modes se propageant dans la cavité, les modes fondamentaux (TE₀ et TM₀) :

$$\Delta G_{(TE_0 - TM_0)} = G_{TE_0} \left(1 - \frac{\Gamma_{TM} g_{mat_TM_0}}{\Gamma_{TE} g_{mat_TE_0}} \right) \quad (1-53)$$

Dans toutes les applications des AOSs, cette sensibilité est un inconvénient majeur car la polarisation de l'onde incidente n'est pas asservie lors de son entrée dans ces composants. Il est donc nécessaire, afin d'assurer une valeur de gain stable, de réduire au maximum cette sensibilité à la polarisation en respectant la condition suivante :

$$\Gamma_{TM} g_{mat_TM} = \Gamma_{TE} g_{mat_TE} \quad (1-54)$$

Plusieurs possibilités technologiques sont envisagées pour obtenir une insensibilité maximale à la polarisation d'un AOS. Pour des rubans de largeur supérieure ou égale à 1µm d'épaisseur, une technique retenue est l'introduction d'une contrainte en tension mécanique au niveau du paramètre de maille du matériau de la zone active favorisant le gain en mode TM qui, sans cette solution, est en général plus faible d'environ 1dB que le gain en mode TE [9, 28]. La contrainte mécanique en tension, décrite par le tenseur de déformation (ϵ), est illustrée en figure 34.

<p>Contrainte en tension pour l'AOS : $\Delta a = -0,15\%$</p>	 <p style="text-align: right;">InGaAsP InP(N)</p>	<p>tenseur $\epsilon = \frac{\Delta a}{a_0}$ avec $\Delta a < a_0$</p>
---	--	---

avec : a_0 = paramètre de maille InP(N) et Δa = paramètre de maille du composé quaternaire InGaAsP

Figure 34 : Illustration de la contrainte en tension sur une épitaxie InGaAsP à partir d'un substrat InP

Pour l'AOS transféré 1,55µm, l'évolution du gain fibre à fibre en fonction du courant d'alimentation et de la polarisation de l'onde incidente permet d'illustrer le phénomène d'insensibilité à la polarisation ($\Delta G \leq 0.2$ dB dans la zone de saturation) (figure 35).

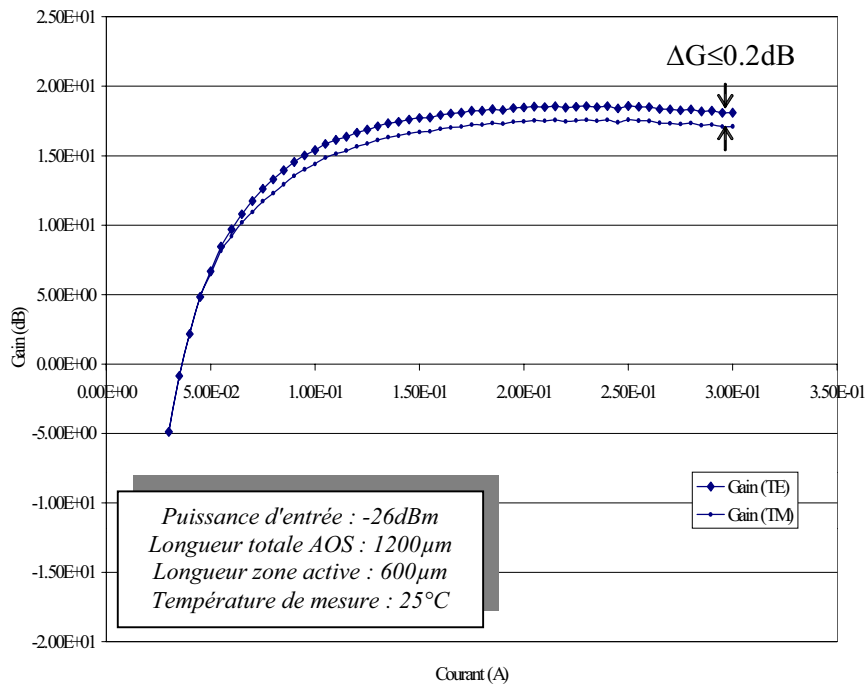


Figure 35 : Exemple de caractéristique expérimentale mesurée du gain fibre à fibre en fonction du courant d'alimentation dans le cas d'une polarisation TE_0 et TM_0 pour un AOS 1,55 μm

La valeur du gain fibre à fibre caractéristique de l'AOS, présentée en figure 35, est de 14dB, pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -26dBm à 1550nm. En comparaison, pour un AOS de longueur totale de 1200 μm de technologie NTT, la valeur du gain fibre à fibre caractéristique est de 13dB, pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -20dBm à 1550nm [51]. Pour un AOS de longueur totale de 1000 μm de technologie CORNING, la valeur du gain fibre à fibre caractéristique est de 20dB, pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -20dBm à 1550nm [72]. La performance, en terme de valeur de gain fibre à fibre, de la technologie ALCATEL est donc comparable aux technologies concurrentes actuellement disponibles sur le marché des amplificateurs optiques à semiconducteur.

➤ Influence du courant d'alimentation sur la caractéristique du gain optique

La figure 35 permet également de constater que l'évolution du gain G d'un AOS en fonction du courant n'a pas une croissance exponentielle continue. En fait, au-dessus d'un certain courant, le milieu amplificateur sature, le gain G n'évolue plus de façon exponentielle en fonction du courant injecté et donc le gain matériau n'évolue plus linéairement avec celui-ci (phénomène de saturation du gain). Les origines du phénomène de saturation sont multiples :

- les différents types de recombinaisons,
- le phénomène de thermalisation,

- l'amplification de l'émission spontanée (ASE).

Cependant, le principal phénomène mis en cause est l'ASE. En effet, J. Pleumeekers a montré que le taux de recombinaisons dû à l'amplification de l'émission spontanée augmente exponentiellement avec la densité de porteurs dans l'AOS, alors que le taux de recombinaisons stimulées varie linéairement avec la densité de porteurs dans l'AOS [37]. Cette considération permet alors de montrer que plus le courant augmente dans l'AOS, plus le phénomène d'ASE devient prépondérant devant le phénomène de recombinaison stimulée d'où l'origine de la saturation du gain à fort courant. Le gain est linéaire pour un courant maximum de 60mA. Rappelons que dans le régime non-linéaire (cf chapitre 1), un AOS est essentiellement utilisé pour la modulation en XGM ou XPM ou pour le mixage en longueur d'onde (FWM) [30, 32].

De la même manière, si on augmente, la puissance P_{in} du signal d'entrée, pour un courant donné on passe d'un fonctionnement en régime linéaire, où la relation (1-45) se vérifie et où G est constant et maximal (gain aux petits signaux), à un régime de saturation où le gain diminue avec la puissance du signal d'entrée. On peut alors définir ainsi une puissance de saturation P_{sat} du matériau correspondant à une saturation du gain matériau ($g_{mat sat}$), pour lequel le gain matériau est divisé par deux [21, 22] :

$$g_{mat sat} = \frac{g_{mat}}{1 + \frac{P}{P_{sat}}} \quad (1-55)$$

Avant d'aborder ces notions dans le prochain paragraphe, la caractéristique du gain en fonction de la longueur d'onde et de la longueur de la zone active du composant est également présentée.

➤ *Influence de la longueur d'onde sur la caractéristique du gain optique*

Un exemple de caractéristique du gain fibre à fibre en mode TE_0 en fonction de la longueur d'onde et du courant d'alimentation est présenté en figure 36. La figure 36 montre que plus le courant passant dans l'AOS augmente, plus le pic du gain se déplace vers les faibles longueurs d'onde. En effet, plus le courant augmente dans l'AOS, plus la densité de porteurs est élevée, plus les quasi-niveaux de Fermi pénètrent dans les bandes.

Ceci entraîne alors une augmentation de la population des états de haute énergie de la bande de conduction. De ce fait, la longueur d'onde des photons émis par recombinaisons radiatives (inversement proportionnelle à l'énergie nécessaire à ces recombinaisons) diminue d'où le déplacement du pic du gain vers les faibles longueurs d'onde.

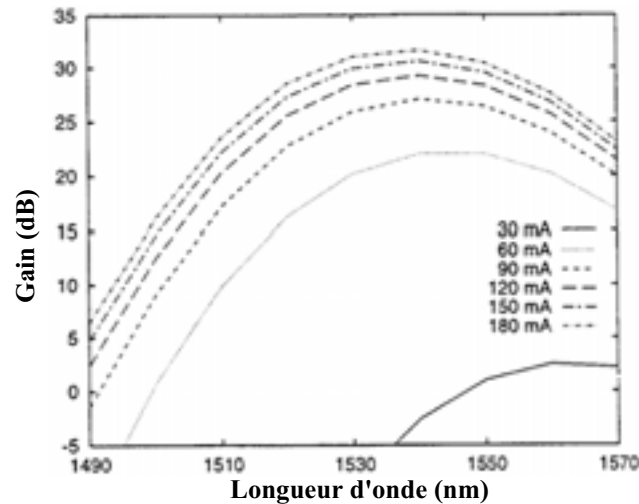


Figure 36 : Caractéristique du gain fibre à fibre en mode TE_0 en fonction de la longueur d'onde pour différents courants d'alimentation d'après J. L. Pleumeekers [37]

➤ *Influence de la longueur et de la largeur de la zone active sur la caractéristique du gain optique*

D'après l'équation (1-45), l'expression du gain est proportionnelle à la longueur du composant considéré. En effet, les études d'ALCATEL R&I [42, 43, 50], ont également montré que plus la longueur de la zone active d'un composant est grande, plus le gain du composant est élevé (figure 37(a)). De même, ces études ont démontré que plus la largeur de la zone active est faible, plus le gain est élevé (figure 37 (b)).

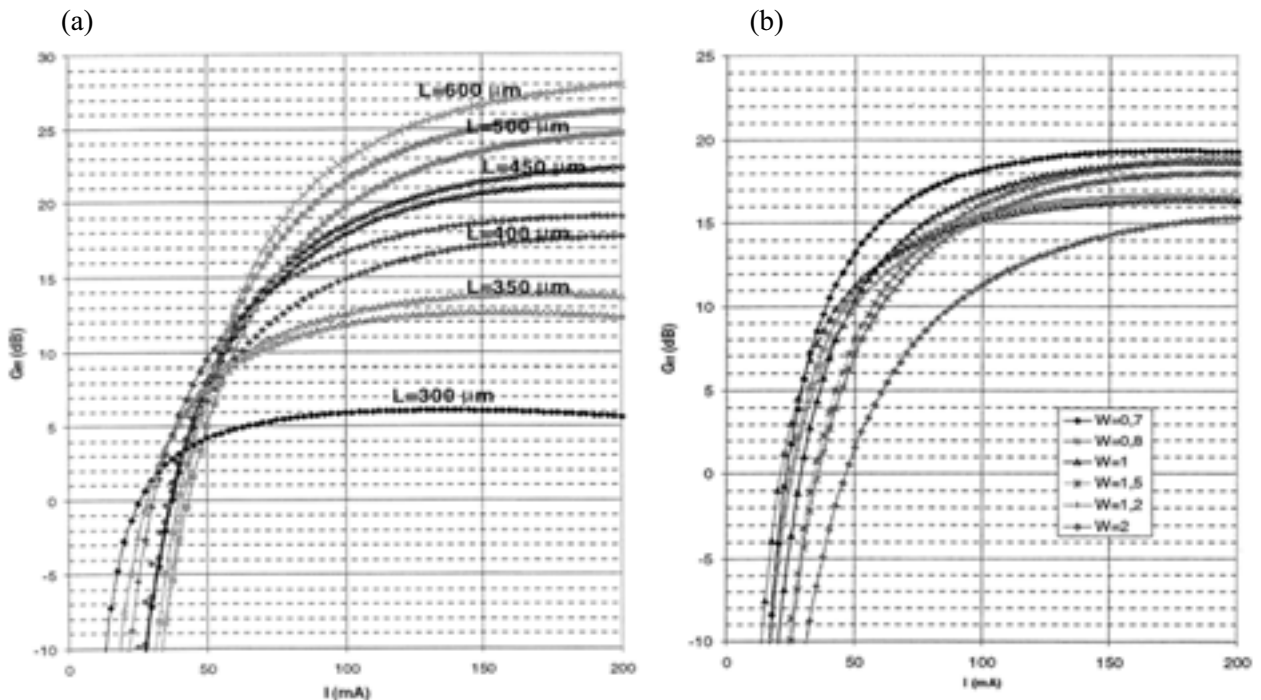


Figure 37 : Caractéristiques mesurées à ALCATEL R&I, du gain fibre à fibre en mode TE_0 en fonction de la longueur L de la zone active (a) ou en fonction de la largeur W de la zone active (b) et du courant d'alimentation d'AOSs $1,55\mu\text{m}$ à 25°C (298K) [22]

Cependant, le phénomène de saturation dans l'AOS limite ces propriétés. Le gain optimum pour un AOS est obtenu pour une longueur de zone active proche de 600 μm , la longueur minimum de la zone active testée pour un AOS fabriqué par ALCATEL R&I étant de 300 μm . La largeur de la zone active d'environ 1 μm est choisie car cette dimension est la plus compatible avec la technologie de lithographie utilisée dans le procédé de fabrication des AOSs par ALCATEL R&I. De plus, le phénomène de dissipation d'énergie par effet Joule n'autorise pas de très grandes longueurs de zone active. En effet, l'augmentation de cette longueur entraîne une diminution de la résistance électrique du matériau considéré d'où, pour un courant donné, une plus forte densité de courant dans la zone active et donc un échauffement d'autant plus grand dans cette zone.

⇒ *Gain optique et gain fibre à fibre*

Il existe une relation entre le gain optique d'un AOS (G) et le gain fibre à fibre (G_{ff}) qui est directement liée aux taux de couplage d'entrée et de sortie des fibres optiques [22] :

$$G = C_e C_s G_{ff} \quad (1-56)$$

avec :

- C_e et C_s représentent les coefficients de couplage en entrée et en sortie de fibres optiques d'un AOS ($C_e = C_s = 1$ pour un couplage idéal).

2.2.2/ Saturation du gain fibre à fibre

Comme le précédent paragraphe le souligne, la saturation du gain est essentiellement reliée au phénomène d'émission spontanée amplifiée. En effet, une partie de ce flux lumineux couplée dans le guide est alors amplifiée. En régime petits signaux et à fort courant, une augmentation du courant en régime de saturation conduit à une faible augmentation de la densité d'électrons et contribue surtout à augmenter la puissance d'ASE au détriment de l'émission stimulée. Ce phénomène est mis en évidence en figure 38 où le niveau de contribution relative de chaque type de recombinaisons, obtenus par modélisation sous le logiciel de simulation par éléments finis POSEIDON, est représenté en fonction du courant d'alimentation [22, 37]. La modélisation a été effectuée pour un AOS de 600 μm de longueur, une largeur de zone active de 0,7 μm et une épaisseur totale de 0,4 μm pour une température de 27°C (300K). Les fractions molaires du paramètre matériau InGaAsP, prises en compte, sont : $\text{In}_{0,59}\text{Ga}_{0,41}\text{As}_{0,88}\text{P}_{0,12}$.

La figure 38 permet de constater qu'à faible courant (<40mA) la majorité des porteurs injectés se recombine par les recombinaisons Auger, SRH et par émission spontanée. A plus fort courant, l'ASE augmente rapidement et constitue alors le phénomène de recombinaison prépondérant dans le AOS justifiant la saturation du gain à fort courant. Le faible taux d'émission stimulée est dû, dans cette simulation, à la faible puissance du signal optique d'entrée de -30dBm.

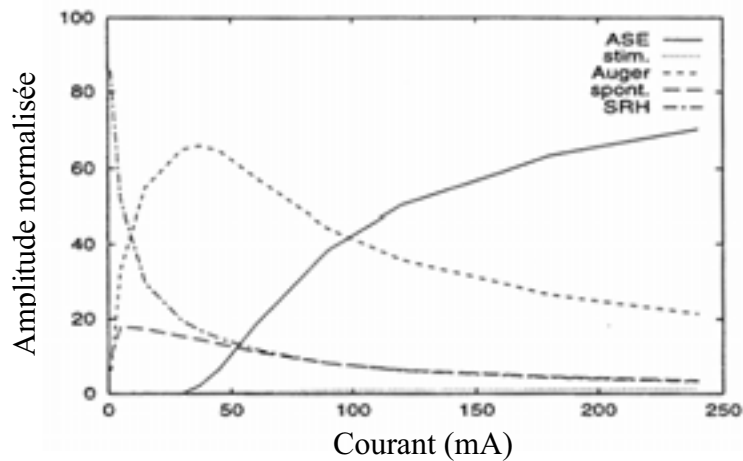


Figure 38 : Simulation des niveaux de contribution des différents types de recombinaison en fonction du courant d'alimentation d'après J. L. Pleumeekers [37]

2.2.3/ Figure de bruit

Comme nous venons de le montrer, la source "parasite", la plus importante dans les AOSs correspond à l'émission spontanée amplifiée (ASE) [32, 50]. En effet, elle est néfaste à toutes les applications linéaires envisagées car ce phénomène est à l'origine de la saturation du gain et donc également à l'origine des non-linéarités d'un AOS.

A la différence des cavités laser où la condition de résonance favorise l'amplification des modes souhaités au détriment de celle de l'émission spontanée sans cohérence, l'absence de contre-réaction optique dans le AOS place au même niveau d'importance l'amplification du signal d'entrée et celle du bruit d'émission spontanée [21]. L'ASE vient alors, comme nous l'avons vu ci-dessus, concurrencer le signal en consommant le gain disponible en sortie, qui est de plus amplifiée aux mêmes fréquences que celles du signal d'entrée, générant alors un bruit supplémentaire à ceux existants dans le réseau de télécommunications où se situe l'AOS utilisé en mode de fonctionnement linéaire [26].

Ce phénomène est donc l'un des inconvénients majeurs pour l'emploi de ce composant en régime linéaire. L'expression du facteur de bruit est reliée au gain fibre à fibre et à la puissance d'ASE par la relation :

$$NF = \frac{(\text{Signal/bruit})_{\text{entrée}}}{(\text{Signal/bruit})_{\text{sortie}}} = \left(\frac{1}{G_{\text{ff}}}\right) + \left(\frac{2P_{\text{ASE}}}{h\nu G_{\text{ff}} B_0}\right) \quad (1-57)$$

avec :

- G_{ff} désigne le gain fibre à fibre et P_{ASE} la puissance de l'amplification de l'émission spontanée,
- B_0 la bande de filtrage optique du détecteur et ν la fréquence considérée.

En supposant que $G_{\text{ff}} \gg 1$, on obtient alors :

$$NF \propto \frac{2P_{\text{ASE}}}{h\nu G_{\text{ff}} B_0} \quad (1-58)$$

La figure 39 représente l'évolution de la figure de bruit en fonction du courant injecté. Elle est inversement proportionnelle à celle du gain fibre à fibre en accord avec la théorie [21, 22]. La valeur de la figure de bruit caractéristique de l'AOS, présentée en figure 39, est de 14dB, pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -26dBm à 1550nm. Actuellement, la figure de bruit pour un AOS transféré ALCATEL est proche de 8dB. En comparaison, pour un AOS de longueur totale de 1200µm de technologie NTT, la valeur de la figure de bruit caractéristique est de 13dB, pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -20dBm à 1550nm. Pour un AOS de longueur totale de 1000µm de technologie CORNING (concurrente de la technologie ALCATEL), la valeur de la figure de bruit caractéristique est de 20dB, pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -20dBm à 1550nm. La performance, en terme de valeur de figure de bruit, de la technologie ALCATEL est donc comparable aux technologies concurrentes.

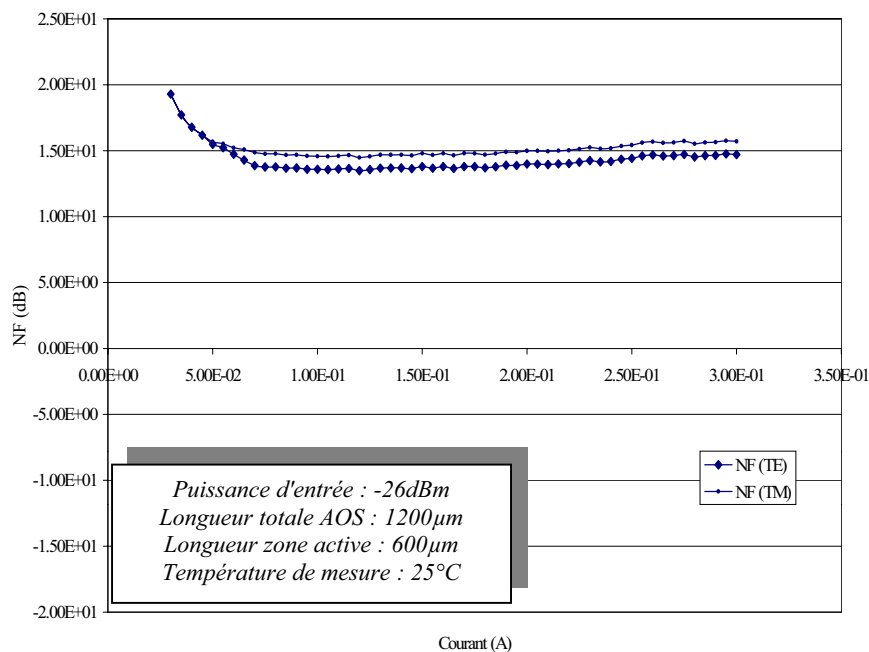


Figure 39 : Exemple de caractéristique expérimentale mesurée de la figure de bruit en fonction du courant d'alimentation dans le cas d'une polarisation TE₀ et TM₀ pour un AOS transféré 1,55µm

2.2.4/ Puissance de saturation

De façon analogue à un amplificateur électronique, la puissance de saturation d'un AOS se définit comme la puissance de sortie pour laquelle le gain matériau est divisé par deux en linéaire, explicitée dans l'équation (1-53). Néanmoins, il est possible d'évaluer celle-ci indépendamment de l'ASE. On obtient ainsi, en utilisant l'approximation linéaire du gain matériau maximal en fonction de la densité de porteurs, l'expression du gain petit signal G_0 :

$$G = \frac{G_0}{2} = \frac{P_{sat}^{out}}{P_{sat}^{in}} \text{ avec } G_0 = \exp\left(\frac{\Gamma a \tau_{tot} JL}{qd}\right) \quad (1-59)$$

avec :

- a est le coefficient de gain ($\approx 3.10^{-16} \text{cm}^2$) pour un AOS,
- J représente la densité de courant appliquée en A/cm^2 et d est l'épaisseur de la zone active du AOS,
- τ_{tot} correspond au temps de recombinaison total en négligeant l'émission stimulée au-dessous du seuil soit :

$$\tau_{\text{tot}} = \frac{1}{A + Bn + Cn^2} \quad (1-60)$$

avec :

- A : coefficient de recombinaisons dues aux défauts présents dans le matériau (recombinaisons non radiatives hors effet Auger),
- Bn : coefficient de recombinaisons par émission spontanée,
- Cn^2 : coefficient de recombinaisons par effet Auger.

En tenant compte du fait que le gain est divisé par deux à la "saturation", la puissance de saturation en sortie s'écrit alors :

$$P_{\text{sat}}^{\text{out}} = (\ln 2) \frac{h\nu}{a\tau_{\text{tot}}} \frac{Wd}{\Gamma} \quad (1-61)$$

La figure 40 présente un exemple de caractéristique du gain en fonction de la puissance de sortie de manière à extraire la valeur de la puissance de saturation en considérant la puissance définie comme la valeur de la puissance pour laquelle le gain a diminué de 3dB sur le gain [22, 50].

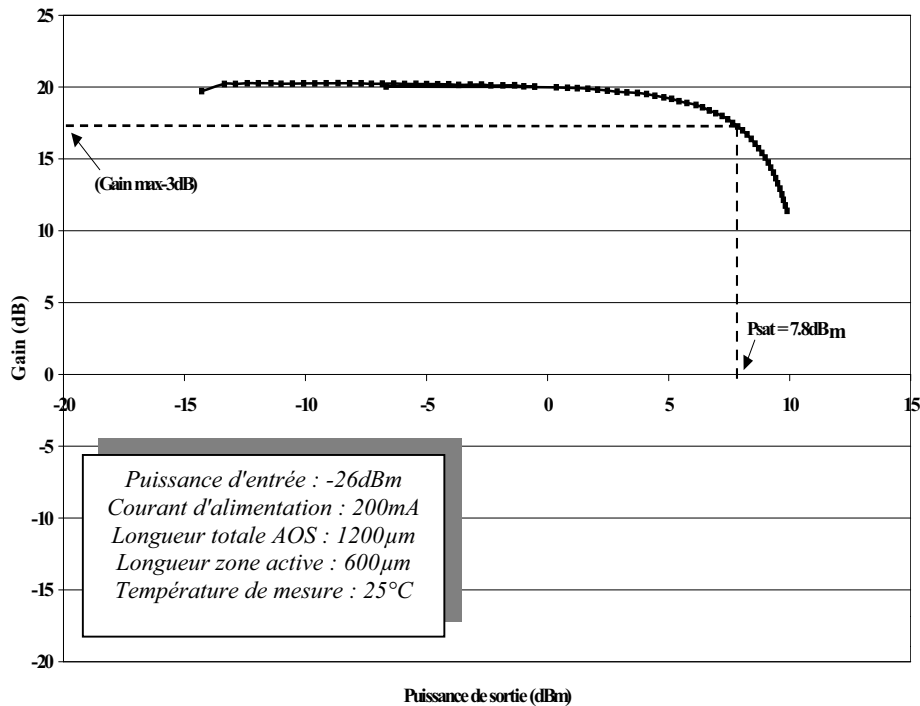


Figure 40 : Exemple de caractéristique expérimentale mesurée du gain fibre à fibre en fonction de la puissance de sortie

Les deux prochains paragraphes s'attachent à décrire les deux paramètres qui seront les plus utilisées dans ces travaux de recherche. En effet, la caractéristique de la puissance optique en fonction du courant d'alimentation et la courbe courant-tension bas-niveau, ayant servies de référence dans de nombreuses études sur la diode laser BRS [41, 43]. Elles serviront également de caractéristiques de référence lors de notre étude expérimentale.

2.2.5/ Puissance optique ou puissance ASE

La puissance optique mesurée en sortie du composant est équivalente, à partir d'un courant de 50mA, à la puissance d'ASE (phénomène prépondérant dans un AOS). Pour une simplicité de lecture nous la nommerons désormais puissance optique. La caractéristique de la puissance optique se mesure, en général, en fonction du courant et sa caractéristique est semblable à celle de la puissance optique mesurée d'une diode laser à ruban enterré InGaAsP/InP à la seule différence près que la notion de courant de seuil laser n'apparaît pas. Nous reviendrons sur cette notion dans les paragraphes suivants. De plus, la structure AOS étant symétrique, le paramètre "entrée/sortie" n'a pas lieu d'être considéré et par conséquent les caractéristiques "face avant/face arrière" dans un AOS sont généralement équivalentes. La figure 41 présente la caractéristique de la puissance optique en fonction du courant d'alimentation du composant mesuré.

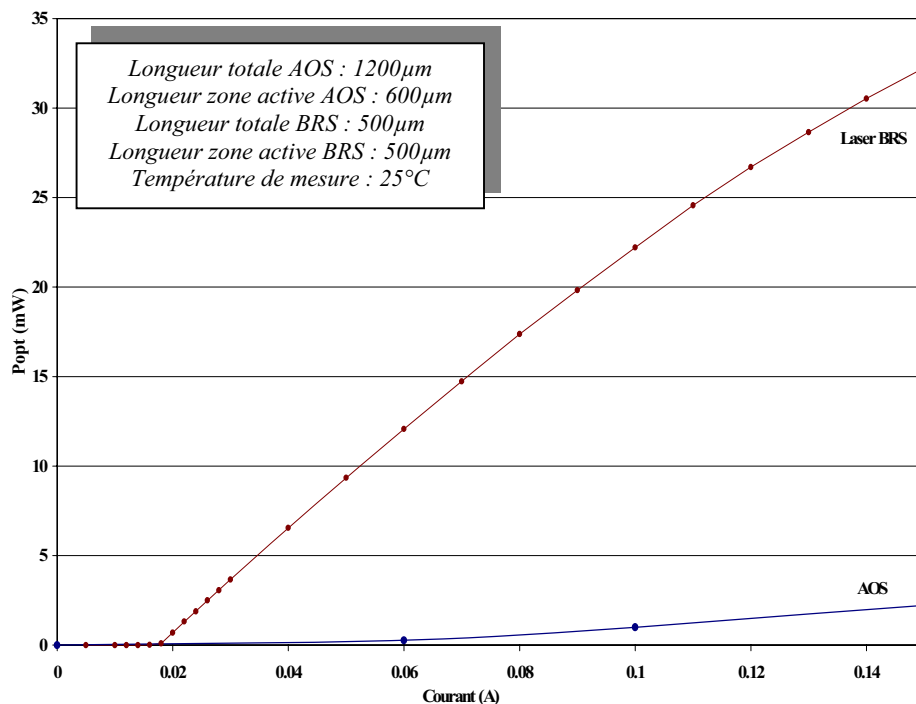


Figure 41 : Exemple de caractéristique expérimentale mesurée de la puissance optique de sortie en fonction du courant d'alimentation : comparaison entre l'AOS 1,55µm et une diode laser BRS 1,55µm

La figure 41 permet de constater deux phénomènes :

- La puissance optique du signal optique de sortie d'une diode laser BRS est 10 fois plus élevée que celle d'un AOS car, dans ce composant, le signal optique incident n'effectue pas d'allers-retours

dans la cavité laser contrairement aux diodes laser BRS. En effet, au-delà du courant de seuil, l'émission spontanée reste constante puis par suite du blocage de la densité de porteurs et donc du gain, il est observé une émission stimulée de lumière cohérente fortement amplifiée par le gain optique dans la cavité.

- Comme la puissance optique du signal optique de sortie d'un AOS est faible, il n'est pas possible de définir un courant de seuil à partir duquel on observe une forte augmentation linéaire de la puissance optique contrairement aux diodes laser BRS où le courant de seuil est défini, en général, entre 10 et 15mA.

2.2.6/ Courant-tension bas niveau

Comme nous le montrerons dans le chapitre 3, la caractéristique courant-tension bas-niveau (figure 42) d'un AOS est un élément important pour l'analyse de défaillance de ce composant. En effet, l'étude de cette caractéristique ayant permis la caractérisation physique, l'évaluation technologique et le diagnostic de défaillance des diodes laser BRS, cette étude sera également appliquée à l'analyse d'un AOS [41, 49]. La caractérisation de cette courbe sera donc fortement détaillée dans les chapitres 3 et 4.

La figure 42 permet de constater que malgré les différences qu'il existe à bas-niveau entre les caractéristiques courant-tension de la diode laser BRS et celle de l'AOS, à partir de 0,9V, ces deux caractéristiques ont une allure linéaire proche. Le comportement de ces deux composants devient alors purement résistif, cet état étant caractéristique du comportement des diodes laser BRS et des AOSs à partir de 0,9V et au-delà (tension à partir de laquelle on considère que ces deux composants sont en mode d'utilisation normale). La résistance résulte des différentes couches semiconductrices d'accès et les contacts métalliques.

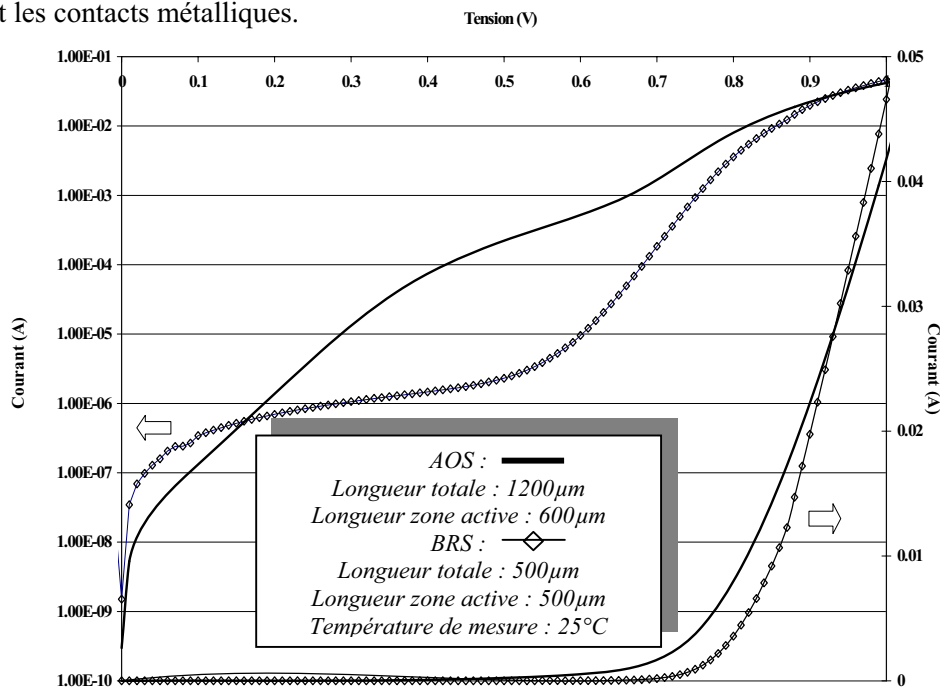


Figure 42 : Exemples de caractéristiques expérimentales mesurées courant-tension : comparaison entre l'AOS 1,55µm et une diode laser BRS 1,55µm

Concernant la diode laser BRS, pour des tensions inférieures à 0,4V, le courant prédominant correspond à un courant de type résistif circulant dans le matériau implanté (H^+). Entre 0,5 et 0,7V, le courant est de type recombinant en $2kT$ puis proche de kT entre 0,7 et la tension de seuil (type diffusion). Au seuil, la tension est fixée et l'augmentation du courant se fait quasi-exclusivement dans la diode active. En revanche, la caractéristique $I(V)$ de l'AOS montre un niveau de fuites beaucoup plus important entre 0,2V et 0,7V, zones relatives à l'homojonction InP(N)/InP(P) de reprise et à l'hétérojonction InP/InGaAsP avec une prise en compte du guide passif non présent sur une technologie BRS. Ces analyses seront plus particulièrement détaillées dans le troisième chapitre.

2.2.7/ Pseudo-courant de seuil

Le courant de seuil ne pouvant être défini grâce à la caractéristique de la puissance optique comme dans une diode laser où il existe un véritable "seuil" observable sur cette caractéristique, il est alors défini *empiriquement* dans le cadre de ces travaux par la valeur du courant correspond à une puissance optique minimum mesurée de 0,6mW. Ce pseudo-courant de seuil, $I@0,6mW$, constitue un élément important suivi lors de l'étude expérimentale décrite dans le chapitre suivant [43]. La valeur typique du courant mesuré à 0,6mW est de 60mA.

2.2.8/ Spectre optique d'un AOS

La mesure du spectre optique est un des paramètres les plus importants d'une diode laser puisque de nombreuses applications requièrent sa parfaite connaissance. De plus, c'est un outil fondamental pour la caractérisation des dispositifs optoélectroniques. En effet, il permet d'obtenir des informations sur la constitution technologique du composant (homojonction, hétérojonction, puits quantiques, nombre de modes de la cavité, ...) alors que la puissance optique et le rendement total traduisent l'efficacité optique de l'émetteur. Pour une diode laser multimode dont la forme du gain est parabolique en fonction de la longueur d'onde, l'enveloppe spectrale possède une forme lorentzienne. Au-dessous du seuil, la puissance optique émise correspond à l'émission spontanée avec une largeur spectrale d'environ 30 à 50nm. Une fois le seuil dépassé, le spectre se rétrécit considérablement et apparaissent des pics coïncidant avec les modes longitudinaux propres de la cavité.

La forme d'un spectre d'émission est le résultat de deux mécanismes physiques de nature différente : l'émission spontanée et l'émission stimulée. Les deux phénomènes sont présents dans une structure laser, cependant, l'un prédomine sur l'autre en fonction de la structure technologique et du niveau d'injection. 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. 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 $R_{\text{spon}}(h\nu)$ par unité de temps, de volume et d'énergie des photons émis $h\nu$ est donné par :

$$R_{\text{spon}}(h\nu) = \frac{1}{\tau_R} \rho_j(h\nu) f_c(h\nu) (1 - f_v(h\nu)) \quad (1-62)$$

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.

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

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

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

- $f_c(h\nu)$ et $f_v(h\nu)$ décrivent les fonctions de Fermi-Dirac décrivant l'occupation des états connectés par la transition optique.

En règle générale, dans le cas d'une émission spontanée, 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. Les transitions optiques 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 $h\nu$.

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

$$R_{\text{spon}}(h\nu) = K_{\text{spon}} (h\nu - E_g)^{1/2} \exp\left(-\frac{h\nu - E_g}{kT}\right) \quad (1-63)$$

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

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

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 avec la densité de porteurs 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 43

(a). Le maximum de l'intensité lumineuse est émis à :

$$h\nu_{\text{pic}} = E_g + kT/2 \quad (1-64)$$

La largeur à mi-hauteur est alors donnée par :

$$\Delta h\nu = 1,8kT \quad (1-65)$$

La figure 43 (a) illustre cette égalité en traçant la fonction du taux spectral d'émission. Considérant que λ_{pic} et $h\nu_{\text{pic}}$ sont reliées par $\lambda_{\text{pic}}(\mu\text{m}) = 1,24/h\nu_{\text{pic}}(\text{eV})$, on en déduit que la largeur à mi-hauteur en longueur d'onde $\Delta\lambda$ est reliée à λ_{pic} par :

$$\Delta\lambda = 1,45\lambda_{\text{pic}}^2 kT \quad (1-66)$$

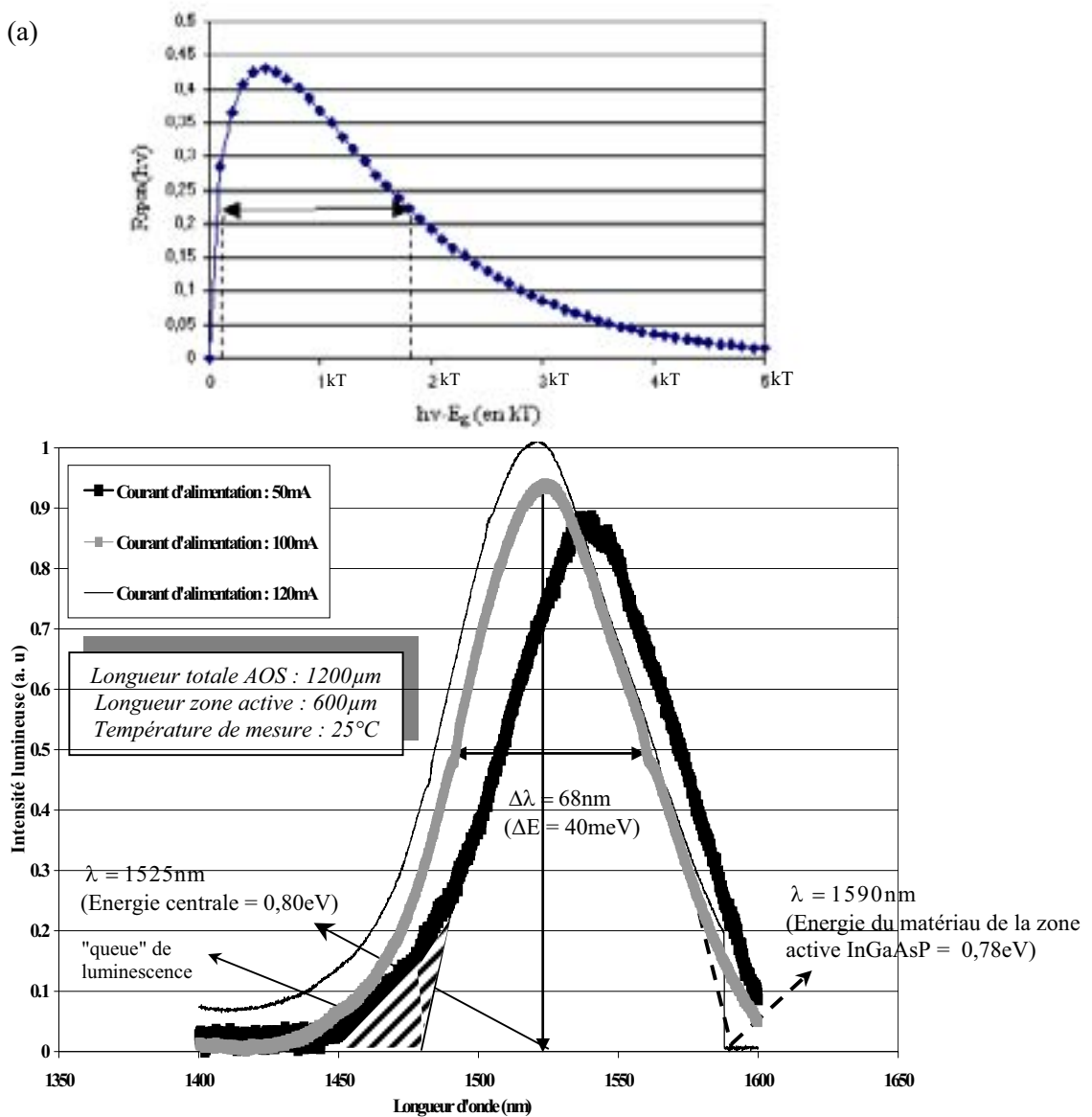


Figure 43 : Répartition spectrale du taux d'émission spontanée dans une diode laser (a)

Exemples de caractéristiques expérimentales mesurées du spectre optique d'un AOS en fonction de la longueur d'onde et du courant d'alimentation à 25°C (b)

Le spectre de la figure 43(b) présente l'évolution du spectre d'un AOS en fonction du courant d'alimentation mesuré à 25°C (298K). A partir de ce spectre, un certain nombre d'informations sont accessibles comme le minimum d'énergie du spectre d'émission correspondant au gap du matériau de la zone active (InGaAsP) en amont de la "queue" de luminescence due à l'agitation thermique. Dans notre cas, ce minimum est proche de 0,8eV en accord avec la valeur du gap de InGaAsP égal à 0,78eV à 300K issue de la littérature [56]. Le second paramètre caractéristique du spectre optique est la largeur spectrale à mi-hauteur démontrant la prédominance de l'émission spontanée dans un AOS. La largeur spectrale mesurée est de 68nm (≈ 40 meV) et la longueur d'onde centrale proche de 1525nm à 100mA. Le spectre optique, caractérisant la zone active de l'AOS, permet d'envisager une analyse de la dégradation de la zone active à condition de pouvoir conserver un taux de couplage identique lors des différentes mesures. En effet, la démonstration de la corrélation liant le spectre optique d'un composant optoélectronique à la cavité laser a été effectuée dans le cas de diodes électroluminescentes et de diodes laser en particulier multimodes [39, 49]. Un certain nombre de publications ont mis en évidence qu'une évolution de la longueur d'onde centrale ou de la largeur à mi-hauteur, après un test de vieillissement, est généralement reliée à une dégradation de la zone active [49, 56].

De plus, on constate sur la figure 43(b) que plus le courant augmente dans l'AOS, plus le spectre optique se décale vers les faibles longueurs d'onde, ce phénomène est lié au déplacement du pic du gain optique (effet de "tracking" en courant). En effet, comme nous l'avons vu précédemment, plus le courant augmente dans l'AOS, plus la densité de porteurs est élevée et plus les quasi-niveaux de Fermi pénètrent dans les bandes. Ceci entraîne alors une augmentation de la population des états de haute énergie de la bande de conduction. De ce fait, la longueur d'onde des photons émis par recombinaisons radiatives (inversement proportionnelle à l'énergie nécessaire à ces recombinaisons) diminue d'où le déplacement du spectre optique vers les faibles longueurs d'onde. Du fait de la prédominance de l'ASE devant l'émission stimulée, le spectre optique de l'AOS est plus proche de celui d'une diode électroluminescente que de celui d'une diode laser dont le spectre à mi-hauteur détient une largeur inférieure à 0,1nm. La figure 43(b) est donc en bon accord avec la théorie développée dans le premier paragraphe de ce chapitre.

Après avoir décrit le mode de fonctionnement d'un AOS et analysé ses principales caractéristiques, le prochain paragraphe s'attache à présenter les bancs de mesure électro-optique utilisés pour la caractérisation de ce composant.

3/ DESCRIPTION DES BANCS D'ANALYSE ELECTRO-OPTIQUE

L'ensemble des notions exposées jusqu'à présent a eu pour objectif de montrer les liaisons existantes entre les différentes caractéristiques électro-optiques et les équations physiques régissant un AOS. Néanmoins, l'étude précise des dégradations fines à partir de l'évolution de ses caractéristiques nécessite également la mise en place des bancs adaptés à la caractérisation des AOSs et à l'étude de leurs performances. Dans ces travaux de recherche, les différentes collaborations avec ALCATEL Optronics, ALCATEL R&I et le laboratoire IXL ont conduit à l'utilisation des bancs de mesure de chacun de ces organismes. Les dénominations de ces bancs étant propres à chacun de ces organismes, nous allons les citer avant de faire une description précise de chacun d'eux :

- le banc GRC d'ALCATEL R&I,
- les bancs TP082, TP057 et l'analyseur de type HP4145 d'ALCATEL Optronics,
- le banc d'analyse électro-optique du laboratoire IXL.

Le Centre de Recherche d'ALCATEL R&I a développé, dès 1992, un banc non automatisé, détaillé dans le prochain paragraphe, adapté aux AOSs 1,3 et 1,55 μ m permettant de mesurer :

- le gain fibre à fibre (en fonction de la longueur d'onde du signal incident et du courant injecté) et la sensibilité à la polarisation en mode TE et TM,
- le facteur de bruit, la puissance de saturation et les pertes de couplage.

Le service Qualification d'ALCATEL Optronics utilise comme moyen de caractérisation pour plusieurs types de composants à source laser (BRS, ILM...) notamment le banc TP057, détaillé dans le prochain paragraphe, mesurant la puissance optique et la caractéristique courant-tension à partir d'un analyseur de type HP4145 ainsi que le banc TP082 qui sera également détaillé dans le prochain paragraphe, spécifiquement dédié aux AOSs (puces nues et module de 4 AOSs), permettant de mesurer les composants en température (15°C/40°C) et en mode automatique (pas d'intervention d'opérateur):

- le gain fibre à fibre (en fonction de la longueur d'onde du signal incident et du courant injecté) et la sensibilité à la polarisation,
- le facteur de bruit, la puissance de saturation et les pertes de couplage.

Au laboratoire IXL, deux bancs, décrits dans la thèse de Y. DESHAYES [49] offrent la possibilité de mesurer certaines caractéristiques de composants électroniques et optoélectroniques en température. Le banc d'analyses électriques a été développé en 1999 et comprend différents éléments : un analyseur de paramètres semi-conducteur Agilent 4156-C effectuant une mesure de courant de 10^{-12} A à 10^{-1} A avec une résolution de 10^{-15} A, un cryostat couvrant la gamme de température de 80K à 473K. La précision des mesures électriques, permettant de déterminer les paramètres fonctionnels et physiques

des composants considérés, a été rendue possible par la mise en place d'un système de connections de mesures quatre fils compensées en température (câbles Kelvin).

Ces précautions garantissent une reproductibilité des mesures avec une erreur de mesure maximale sur le courant mesuré traversant le composant testé de l'ordre de 0,1% correspondant quasiment à la résolution propre de l'appareil 4156-C.

Le banc d'analyses optiques a été développé en 2000 et il est constitué de plusieurs éléments : un analyseur de spectre optique TRIAX 320 et un système de mesures de puissance optique.

La qualité des mesures optiques dépend essentiellement du couplage optique entre le composant (ou module) et l'appareil de mesure. Les éléments d'adaptation optique en cuivre (pour réduire la sensibilité à la température) ont été fabriqués au Laboratoire IXL afin d'effectuer le couplage optimum et répétitif.

Dans la suite de ce paragraphe, nous allons détailler donc les bancs TP057, le TP082 et le banc GRC (R&I) [21, 22, 54, 55]. Cependant, de manière à garantir une reproductibilité des mesures, les bancs d'ALCATEL Optronics, ont été majoritairement utilisés.

En effet, dans le cadre des processus de qualification, ces bancs font régulièrement l'objet d'un contrôle strict et périodique de la reproductibilité, de la répétabilité et de la stabilité, ils autorisent alors une précision extrême dans la mesure de caractéristiques de AOS effectuée en salle blanche avec protection E.S.D. Les bancs de test industriels sont informatisés et automatisés minimisant ainsi les interventions d'opérateurs et améliorant donc la reproductibilité des mesures. La traçabilité et la protection des données sont assurées par une base de données propre à ALCATEL Optronics.

Les principales précautions d'utilisation de ces bancs sont relatives au :

- passage de composants de référence (composants témoins) avant chaque mesure afin d'assurer le suivi correct des mesures (procédure d'étalonnage),
- respect des règles d'archivage,
- respect des gammes d'utilisation et vérification du bon déroulement du programme.

3.1/ Description du banc de mesure TP057

3.1.1/ Schéma de principe de l'ensemble

Le banc TP057 est un banc dédié à la mesure, régulée en température, de la puissance optique en fonction du courant d'alimentation. Néanmoins, ce banc permet d'extraire également la caractéristique courant-tension du composant alimenté. Ce banc est automatisé et caractérise jusqu'à 10 composants sur un véhicule de test pour une même série de mesures. L'annexe A décrit le schéma de principe ainsi que le descriptif des principaux éléments constitutifs du banc de mesure TP057.

Le banc TP057 étant un banc automatisé, son synoptique est, de premier abord, complexe. Une vue d'ensemble de son module de mesure, reportée également en annexe A, permet une visualisation plus détaillée du fonctionnement de ce banc.

3.1.2/ Description des véhicules de test utilisés

Le matériel nécessaire associé à l'étude de la caractéristique puissance optique des composants est constitué par :

- Un Véhicule Test (VT), présenté en figure 44. Ce VT est adapté aux différentes embases de diodes laser. Il est constitué de brides, servant au maintien des composants, qui se positionnent grâce à un outil de montage spécifique appelé un "piano". Le matériau de base d'un VT est en alliage d'aluminium et de cuivre (le duralumin), doré ou anodisé.
- Pointes d'alimentation : différents supports de pointes existent car ils doivent être adaptés en fonction du type de laser à mesurer. Le diamètre des pointes est proche de $690\mu\text{m}$ et elles supportent un courant maximum de 1,5A. Ces pointes ont une résistance électrique de $100\text{m}\Omega$. Néanmoins, une adaptation de ce matériel a été nécessaire pour la mesure de puissance optique des AOSs dans la mesure où l'embase de ces composants est différente de celles des diodes laser mesurées usuellement. L'embase des AOSs est en AlN.
- La mise en température est effectuée grâce à un module Peltier, une résistance chauffante et un bain thermostaté. La gamme de température s'étend de -5°C à $+85^{\circ}\text{C}$ pour une puissance électrique maximum dissipée de 2W.
- La mesure de la température est réalisée par l'intermédiaire d'une sonde platine de type Pt100 et la régulation est assurée par un correcteur PID. La précision de la température absolue de mesure est d'environ 1°C avec une reproductibilité relative inférieure à $0,2^{\circ}\text{C}$.
- Le logiciel permettant la mesure est un programme possédant :
 - Une Interface Homme-Machine étant capable d'interagir avec le logiciel.
 - Un fonctionnement guidé pas à pas : message signalant les actions en cours.
 - Une entrée dans le système : fichiers de configuration, accès aux différents choix possibles (nombre de puces à mesurer, polarité, température...).
 - Une sortie du système : fichiers résultats (exploitables en environnement Excel).

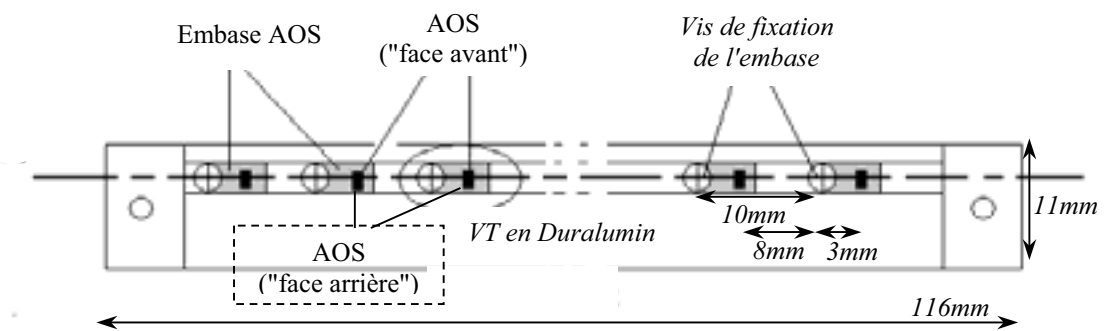


Figure 44 : Dimensions des véhicules de test standards développés chez ALCATEL Optronics

3.1.3/ Domaines d'application et caractéristiques d'analyse

Avec ce banc, les émetteurs analysés, dédiés aux applications de télécommunication, sont :

- diode laser BRS,
- diode DFB avec modulateur intégré,
- diode laser de pompe de longueurs d'ondes : 1480 et 980nm.

Dans sa gamme de température (-5°C à +85°C), les principales caractéristiques de mesure sont :

- la longueur d'onde d'émission comprise entre 980 et 1600nm,
- le courant d'alimentation laser variant de 1mA et 1,5A.

3.1.4/ Fichier de mesure du TP057

La figure 45 présente les caractéristiques complètes I(V), P(I) et Q(I). Cette dernière représente l'évolution de la puissance détectée en "face arrière" d'un AOS, par un photodétecteur moins précis que la sphère intégrante mesurant la puissance "face avant" P(I).

On peut remarquer, placées sur la droite de la feuille, la synthèse des principales caractéristiques d'un AOS à 25°C. Néanmoins certaines caractéristiques présentes dans le fichier type du banc TP057 ne sont pas mesurées pour l'AOS. Par exemple, la valeur de la tension à 10mW est obsolète car la puissance optique de sortie de l'AOS n'atteint jamais 10mW (cf figure 45) et, comme nous l'avons vu précédemment, le courant de seuil pour un AOS n'est pas défini.

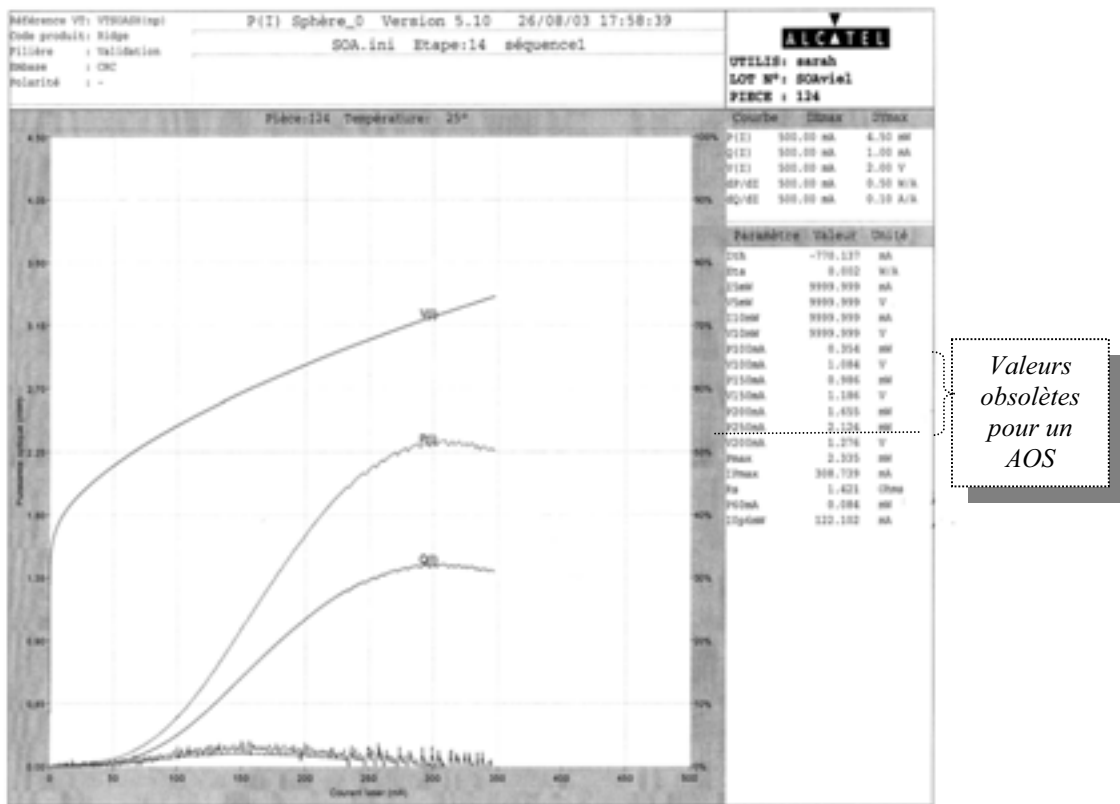


Figure 45 : Présentation d'un fichier type de caractéristiques d'un composant du banc TP057

3.2/ Description du banc de mesure TP082

Le banc TP082 est entièrement dédié à la caractérisation des puces AOSs. Il a été développé par ALCATEL Optronics depuis 2000 et il est en cours de finalisation. Le but de ce banc est de caractériser des puces AOSs unitaires ou des modules AOS comprenant une barrette de 4 puces.

3.2.1/ Schéma de principe de l'ensemble et spécifications

Le banc TP082 est un banc de mesures complet et sera à terme entièrement automatisé [55]. Il permet la mesure de nombreux paramètres d'un AOS comme :

- Le gain fibre à fibre, la figure de bruit, la puissance de saturation.
- La puissance optique et le spectre optique.

Ces mesures s'effectuent en fonction de plusieurs variables d'entrée : la longueur d'onde, le courant et la puissance injectée. De plus, le module permettant de faire des mesures en température sur le banc TP082 est en cours d'achèvement. Ce banc n'étant pas encore automatisé, mesure unitairement les composants puces nues ou les modules. L'ensemble de cet équipement doit permettre d'effectuer les calibrations, mesures et calculs suivants :

1. Avec la sphère intégratrice :

- Mesures : $P_{ASE} = f(I)$

2. Avec l'analyseur de spectre :

- Mesures :

- à lambda variable (ex : $P_{ASE} = f(\lambda_{laser})$ avec $\lambda_{laser} \in [1525, 1575 \text{ nm}]$),

- à courant variable (ex : $P_{ASE} = f(I)$ avec $I \in [0, 200 \text{ mA}]$, $\lambda_{laser} = 1550 \text{ nm}$),

- à puissance d'entrée variable P_{in} (ex : $P_{ASE} = f(P_{in})$ avec $P_{in} = [0, 40 \text{ dBm}]$, $I = 200 \text{ mA}$, $\lambda_{laser} = 1550 \text{ nm}$),

- mesure du spectre optique (ex : spectre d'ASE = $f(I)$ avec $\lambda_{laser} = [1520, 1580 \text{ nm}]$).

Les travaux présentés ne se sont pas attachés à développer le logiciel de mesures du banc TP082. Ils ont, néanmoins, contribué à l'optimisation des différentes phases de conception de celui-ci au travers de discussions constantes avec les ingénieurs en charge du développement de ce banc et à partir des premières caractérisations effectués sur des AOSs puces nues. Le schéma de principe complet pour la mesure de puce nue du banc de mesure TP082 est reporté en annexe B. La figure 46 propose un synoptique simplifié de ce banc [55].

Le synoptique du banc TP082 est, de premier abord, complexe. Une vue d'ensemble de son module de mesure, reportée également en annexe B, permet alors une visualisation globale du fonctionnement de ce banc.

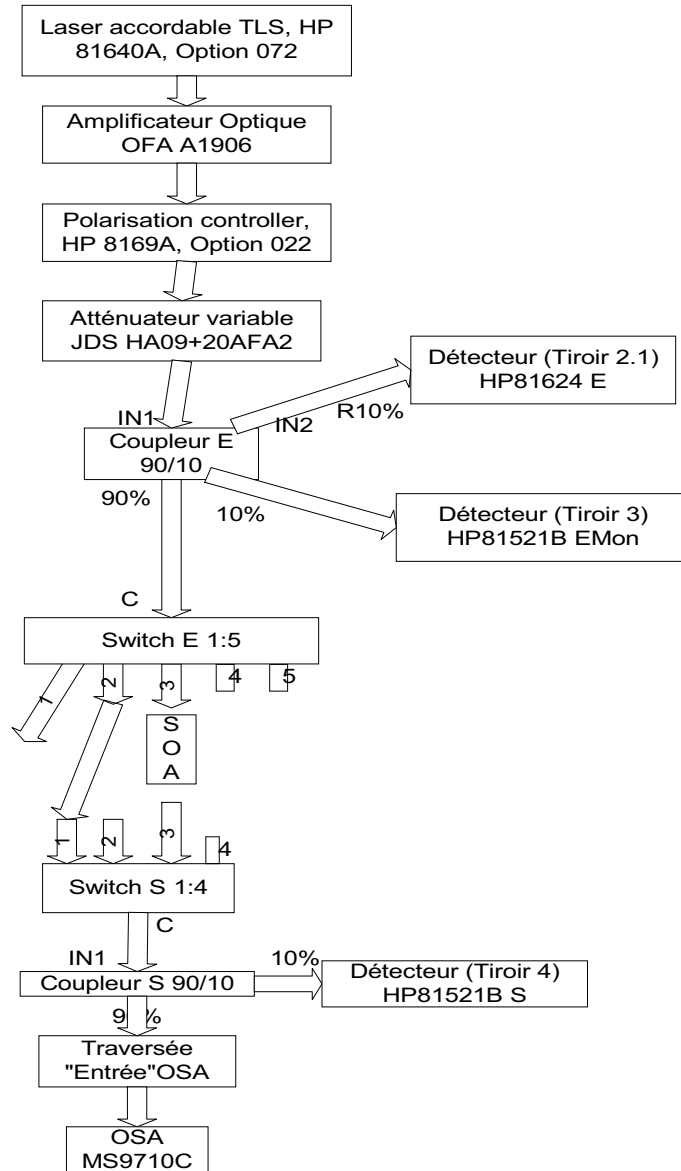


Figure 46 : Synoptique simplifié du banc TP082

3.2.2/ Description du matériel

Le matériel nécessaire associé à l'étude des différentes caractéristiques d'un AOS, se présente sous la forme du tableau 9 présenté, ci-dessous, qui expose donc le descriptif des éléments principaux constituant le banc TP082 [55] :

ELEMENTS CONSTITUTIFS DU BANC TP082		
Unité de commande (ordinateur)	- Châssis commande moteurs alignement précis - Actuateurs piézoélectrique alignement	- Analyseur de spectre - Sphère intégratrice 4'' (Spectralon) - Photodétecteur face arrière - Photodétecteur avec sphère

<ul style="list-style-type: none"> - Châssis - Laser accordable - Module de mesure de puissance - Têtes - Contrôleur de polarisation - Châssis commande moteurs alignement macro - Atténuateur optique - Fibres optiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Châssis de commande des moteurs - Actuateurs piézoélectriques - Bain thermostaté - Contrôleur de température - Module à effet Peltier - Sonde Pt100 - Coupleur (90/100) - Binoculaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Châssis PRO-8000 - Module 500mA (Résolution 7.5μA) - Module 4A (Résolution 70μA) - Module 8A (Résolution 135μA) - Préamplificateur de courant de photodiode 2 canaux - Régulateur Peltier 4A - Combiné Module 1 A avec régulation Peltier 2A, Chariot, Micropositionneur, Support de pointes et pointes
--	--	--

Tableau 9 : Descriptif du matériel utilisé lors d'une mesure d'un AOS sur le banc TP082

3.2.3/ Chronologie générale d'une mesure

Le déroulement d'une mesure sur puce nue unitaire avec le banc TP082 se décompose en huit grandes étapes distinctes reportées ci-dessous et explicitées en figure 48 [55] :

➤ Phase d'initialisation générale du banc - BLOC A

Dans ce bloc, en premier lieu, tous les appareils subissent une phase d'initialisation. On configure tous les fichiers dont on se sert lors de la mesure de la puissance et du calcul des caractéristiques des canaux et de la puce.

➤ Phase de mise en place de la puce - BLOC B

L'adaptateur, propre à la puce nue, est préalablement placé sur l'embase. La mise en place de la puce concerne directement l'opérateur qui doit disposer cette dernière sur son adaptateur (figure 47).

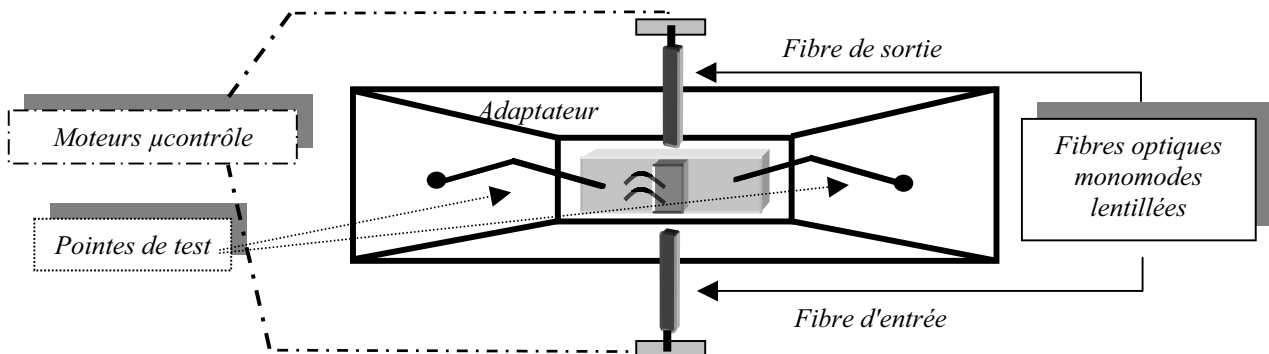


Figure 47 : Mise en place de la puce sur l'adaptateur du banc TP082

➤ Phase de positionnement et de recherche du couplage optimum - BLOC C

Dans un premier temps, on effectue le test de vérification de continuité électrique entre les pointes et la puce. Si celui-ci est validé, on pré-positionne les fibres optiques en face des miroirs d'entrée et de sortie d'un AOS grâce aux moteurs manuellement ou automatiquement.

Dans tous les cas, on doit réguler la puce à la température de consigne imposée par le fichier gestionnaire de la mesure en cours, cette mesure se faisant sous air. Ensuite, on effectue une recherche spirale (macroscopique), toujours grâce aux moteurs, du couplage optique optimum de la puce avec les

fibres optiques, celui-ci étant direct sans aucune optique de couplage augmentant la difficulté compte tenu de l'ouverture numérique faible ($ON = 0,11$ à $0,15$). Finalement on optimise le couplage entre la puce et les fibres optiques grâce à la recherche du maximum de puissance moyenne en sortie de la puce pour une puissance moyenne d'entrée donnée ($\approx -25\text{dBm}$). Etant donné que l'AOS émet un signal optique de faible divergence : $13^\circ \times 15^\circ$ et de faible gain, il est alors nécessaire de positionner les fibres à une distance très proche de la puce de façon à minimiser les erreurs de mesure dues aux incertitudes de couplage.

➤ *Phase de calibration de la puissance d'entrée- BLOC D*

Le bloc D sert à calibrer la puissance en entrée sur un AOS et l'atténuation en voie de sortie pour chaque longueur d'onde en fonction de la polarisation du composant (mode TE ou mode TM). La puissance d'entrée étant issue d'une diode laser, accordable en longueur d'onde, dont la forme est de la forme du spectre d'une led, c'est à dire un spectre large de faible puissance (environ 60nm). En effet, comme nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre, une puissance d'entrée trop élevée sature l'AOS et donne lieu à des effets non-linéaires qui ne sont pas étudiés dans ces travaux. Ainsi, on peut connaître la valeur de la puissance entrante et de la puissance sortante pour mesurer le gain d'un AOS.

➤ *Phase de mesure de la puce AOS par l'analyseur de spectre - BLOC E*

Ce bloc comprend l'ensemble des mesures, telles que la mesure du spectre ASE et celle du gain, et des calculs programmés tels que le calcul de la figure de bruit à partir de la mesure du gain (équation (1-52)). De plus, ce bloc prévoit, en fin de calcul, le recouplage de la puce avec les fibres optiques d'entrée et de sortie en cas de variation importante du couplage lors de cette phase de mesure.

➤ *Phase de traitement de la puce AOS par la sphère intégratrice - BLOC F*

Ce bloc comprend le test qui consiste à vérifier la continuité électrique entre les pointes et la puce, l'alignement sur la puce (Manuel ou Automatique), les mesures avec la sphère intégrante (P(I)).

➤ *Mise en température/Equilibre thermique - BLOC Z*

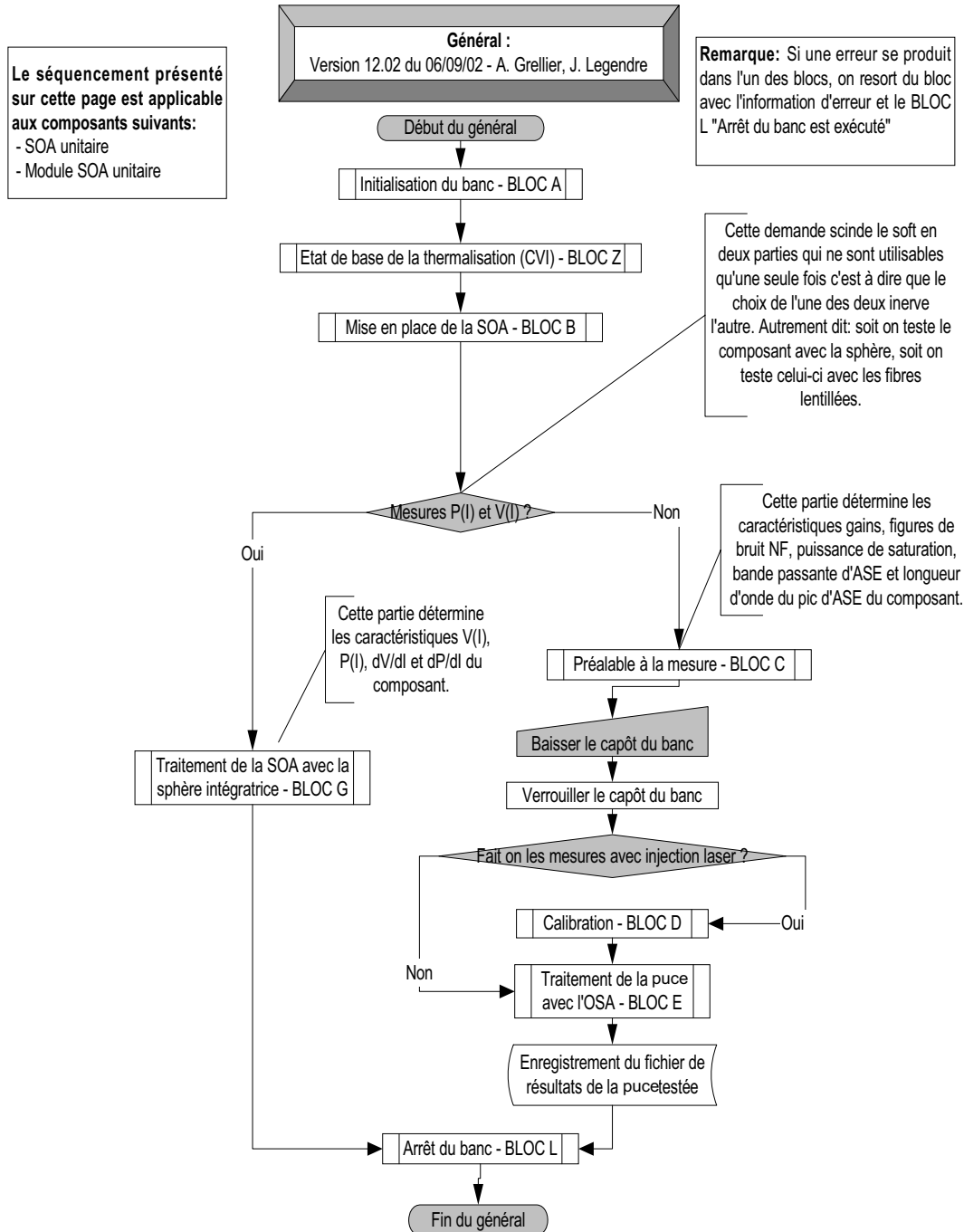
Lorsque l'initialisation du programme est effectuée une température de consigne est donnée par le fichier gestionnaire de la mesure. Ce bloc permet donc, grâce au bain thermostaté, au contrôleur de température, au module Peltier et à la sonde platine de type Pt100 de maintenir et de réguler le composant sous test à la température de consigne définie, avec une précision de 1°C .

➤ *Arrêt du banc - BLOC L*

A la fin de la mesure, on remet le banc à température ambiante en faisant appel au bloc de mise en température et on ré-initialise le banc. En cas d'erreur dans le programme, l'arrêt du banc est

toujours appelé avant de revenir à l'étape initiale. Le déroulement général d'une mesure sur une puce nue avec le banc TP082 est illustré par les figures 48 (a) et (b), présentées ci-dessous [55].

(a)



(b)

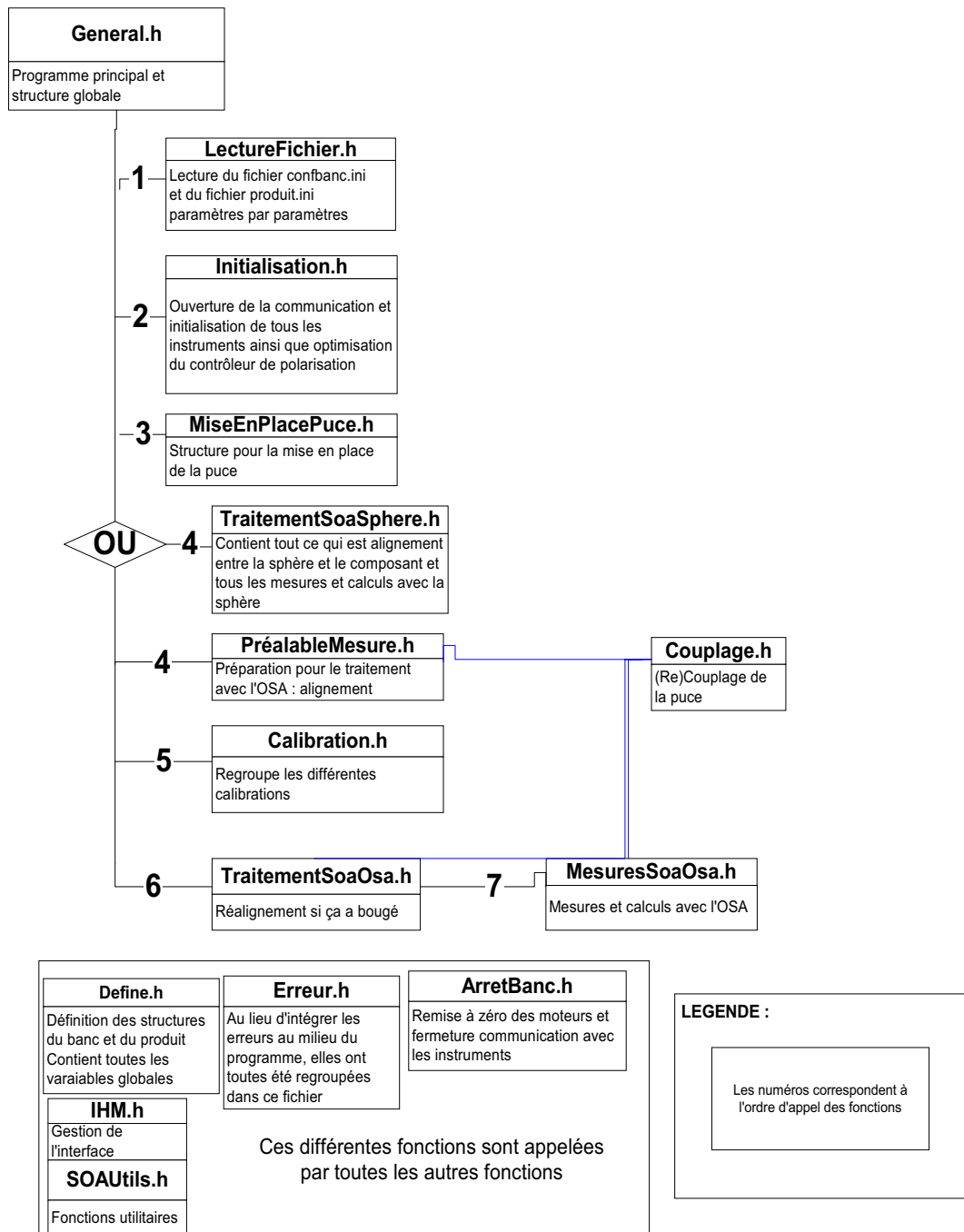


Figure 48 : (a) Séquencement général du programme lors d'une mesure d'un AOS unitaire sur embase avec le banc TP082 et (b) organisation générale des fichiers de traitement lors d'une mesure d'un AOS unitaire sur embase avec le banc TP082

3.3/ Description du banc de mesure GRC

Le banc GRC est un banc de mesure permettant la caractérisation unitaire des composants puce nue. Le banc permet de mesurer les principales caractéristiques d'un amplificateur optique à semiconducteur :

- le gain fibre à fibre (en fonction de la longueur d'onde du signal incident et du courant injecté),
- la sensibilité à la polarisation,
- le facteur de bruit,
- la puissance de saturation en sortie,
- les pertes de couplage (à l'aide d'une sphère intégrante).

La figure 49 présente le synoptique du banc de mesure GRC.

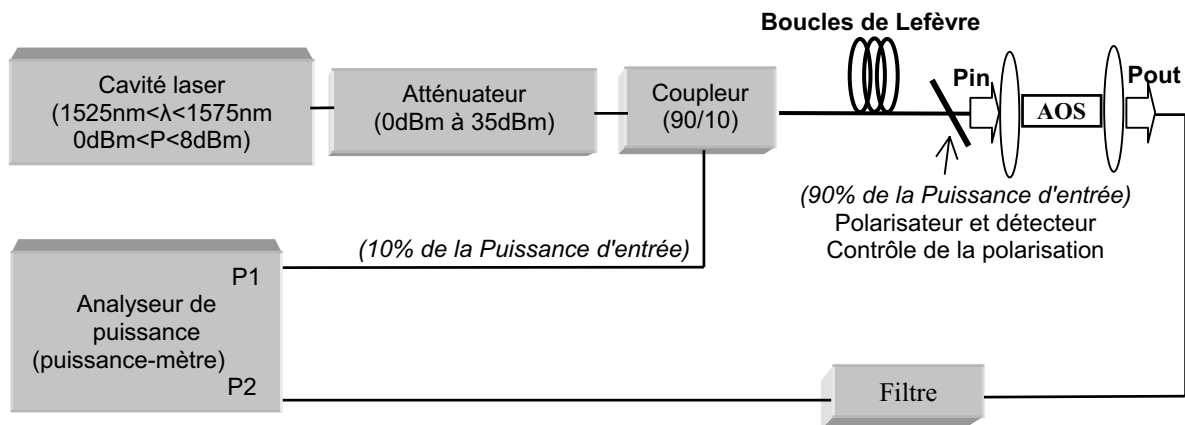


Figure 49 : Synoptique du banc GRC

La puce caractérisée repose sur un pied de test identique à celui du banc TP082, l'alimentation en courant de la puce est également effectuée par deux pointes et la puce est régulée en température à 25°C par un module Peltier. Le signal d'entrée est généré par une cavité laser accordable en longueur d'onde ($1480\text{nm} < \lambda < 1580\text{nm}$) qui délivre une puissance moyenne comprise entre 0 et 8dBm. Le signal est ensuite atténué par un atténuateur programmable afin de contrôler la puissance en entrée d'un AOS. Le coupleur permet de récupérer 10% du signal d'entrée servant de référence pour la mesure de la puissance du signal incident (mesure de P1 par l'analyseur de puissance ou puissance-mètre).

Les boucles de Lefèvre permettent de faire varier la polarisation de la lumière incidente et donc d'évaluer la sensibilité d'un AOS à la polarisation grâce au polarisateur et au détecteur. Le signal optique de sortie est ensuite filtré afin de pouvoir quantifier la puissance optique du signal en sortie du AOS. En effet, si le filtre optique est aligné avec la cavité, on mesure alors la puissance totale du signal (signal d'entrée amplifié+puissance d'ASE) et lorsque celui-ci est décalé en longueur d'onde, on mesure uniquement la puissance d'ASE. Enfin au moyen d'une sphère intégrante, il est également possible de mesurer les pertes de couplage durant la mesure d'un AOS et donc d'évaluer l'incertitude de celle-ci. Cependant, contrairement au banc TP082, ce banc n'est pas automatisé (couplage manuel), par conséquent plus dépendant de l'opérateur que le banc TP082.

Après avoir synthétiser le mode de fonctionnement des trois bancs de mesure utilisés au cours de ces travaux de recherche, le prochain paragraphe explicite brièvement les analyses effectuées par ALCATEL pour la validation définitive des trois bancs et le suivi régulier de ceux-ci dans le temps.

3.4/ Etude des performances des bancs d'analyse électro-optique

L'étude des performances des bancs de caractérisation de composants est une démarche essentielle car elle permet d'évaluer en initial puis dans la continuité la précision des mesures effectuées sur les bancs considérés [49]. Cette étude des performances a été menée sur les trois bancs TP057, TP082 et GRC, précédemment décrits.

3.4.1/ Résultats des mesures croisées

➤ Justification des mesures croisées

La mise en œuvre de mesures croisées, étape clé dans une phase de développement d'un nouveau banc, consiste en une comparaison de séries de mesure sur des échantillons de référence pour deux bancs distincts dont l'un est déjà fonctionnel et par hypothèse validé. Cette étape n'est possible que lorsque l'on dispose de deux bancs ayant les mêmes capacités de mesure.

L'adaptation du banc TP057, décrite ci-dessous et nécessaire pour la mesure des puces AOSs, la validation de l'adaptation de ce banc était essentielle avant la mise en place du plan d'expériences de ces travaux. Afin de pouvoir effectuer des mesures sur AOS avec le banc TP057, il a été nécessaire de modifier les pointes de test et le véhicule de test standardisé pour les diodes laser BRS. En effet, les embases des AOSs étant différentes des embases de diodes habituellement testées, les modifications suivantes ont été réalisées :

- les pointes de test ont été réduites au nombre de deux, usuellement au nombre de quatre pour la mesure des autres composants cités ci-dessus : suppression de deux pointes et branchement électrique modifié,
- le véhicule test a été usiné de façon à obtenir une stabilité maximale des pointes sur l'embase AOS lors de la mesure du composant.

La validation, des mesures d'AOSs faites sur le banc TP057, a été effectuée grâce aux mesures de puissance optique effectuées à R&I sur le banc de mesure de puissance optique, que nous nommerons banc R&I, qui n'est pas le banc GRC. Ces mesures peuvent être utilisées comme données de référence car le banc R&I a été, au préalable de notre étude, validé pour les AOSs. En effet, ce banc étant non automatisé, les mesures effectuées avec celui-ci sont uniquement "opérateur-dépendant". Néanmoins, les mesures de reproductibilité et de répétabilité de ce banc effectuées par ALCATEL R&I, présentées ci-dessous, ont montré que les mesures d'AOSs avec ce banc sont reproductibles et répétables.

➤ Résultats des mesures croisées

Les résultats des mesures croisées, suivant un plan d'expérience, effectuées avec les bancs R&I et TP057 sont présentés dans le tableau 10.

PUCES (Plaques 70806A)	LONGUEUR ACTIVE (μm)	TYPE	P@ I = 200mA en mW (R&I)	P@ I = 200mA en mW (Optronics)	DIFFERENCE	
					(en %)	(en dB)
90	600	Pdown	4,60	3,78	17	0,8
92	600	Pdown	4,40	4,02	9	0,4
99	600	Pdown	4,60	3,93	13	0,6
107	600	Pup	3,50	3,48	0,57	0,02
109	600	Pup	3,30	2,30	47	1,56
111	600	Pup	5,60	3,52	35	2

Tableau 10 : Résultats des mesures croisées P(I) entre ALCATEL R&I/ALCATEL Optronics à température ambiante (25°C) à partir des bancs R&I et TP057

➤ Discussion des résultats

Les différences notables existant entre les mesures effectuées à R&I et à Optronics (banc TP057) ont été attribuées à deux raisons principales :

- La conductivité thermique. En effet, sur le banc R&I, les puces sont mesurées unitairement. Elles sont donc positionnées de façon optimale et le contact est direct entre l'embase du composant et le pied de test du banc. Sur le TP057, les puces sont d'abord reportées et visées sur un VT pouvant contenir 10 puces. Ce VT est directement en contact avec le pied de test du banc TP057. Aussi, même si la conductivité thermique des VTs du banc TP057 est considérée comme la meilleure possible, celle-ci ne sera jamais aussi bonne que dans le cas du banc R&I. Néanmoins, la méthodologie associées au TP057 permet de véhiculer le composant avec plus de sûreté (position fixe de l'embase) et minimisant ainsi l'erreur de positionnement d'une mesure à l'autre, rendant cette erreur reproductible.
- L'incertitude sur la position de la puce face par rapport à la sphère intégratrice du TP057. En effet, les puces AOSs sont reportées tiltées sur leurs embases avec une certaine imprécision sur l'angle de report. D'une puce à l'autre, cet angle peut varier d'environ 0,1°C. Le banc R&I mesurant la puissance optique avec un détecteur large, la mesure de celle-ci peut être optimum malgré cette imprécision contrairement au banc TP057 qui mesure la puissance optique avec une sphère 1". Ce banc peut alors recueillir ou non l'optimum de puissance optique en sortie de la puce.

Ces hypothèses peuvent expliquer les écarts de mesure constatés entre le banc R&I et le banc TP057. Cette dispersion peut être la représentation du respect de la position de la puce sur son embase.

Même si les valeurs de puissance optique en valeur absolue peuvent être pessimistes, le banc TP057 offre des résultats de répétabilité et de reproductibilité déjà démontrée pour d'autres produits. Par exemple, le suivi du banc, sur six mois, pour les puces témoins BRS et ILM a montré :

- une variation relative de la puissance optique mesurée à 200mA à 25°C proche de 0,8%,
- une variation relative du courant de seuil mesuré à 0,6mW à 25°C d'environ 0.9%,
- une variation relative de la tension de fonctionnement mesurée à 200mA à 25°C proche de 0,1%.

De plus, le problème de positionnement de puces sur le VT a été résolu en définissant une position de référence pour les puces AOSs sur le véhicule test du banc TP057 : elles sont positionnées en butée mécanique contre la vis du véhicule test.

Enfin, la validation du banc TP082 a également été possible grâce à une première étude des résultats de mesures croisées effectuées avec le banc GRC et avec le banc TP082. Néanmoins, ces premiers résultats expérimentaux ne sont pas exposés ci-dessous car la version définitive du logiciel de mesure du banc TP082 n'étant pas validée, une autre étude de mesures croisées doit donc être effectuée avant de pouvoir valider définitivement les résultats de mesures de ce banc.

L'ensemble des résultats des mesures croisées et de reproductibilité est suffisant pour estimer la pertinence de l'utilisation du banc TP057 lors de notre étude expérimentale. De plus, la prise en compte de ces résultats ainsi que ceux de l'étude de la reproductibilité et de la répétabilité des mesures à Optronics, présentée ci-dessous, permettront d'évaluer les précisions de mesures des deux autres bancs : GRC et TP082.

3.4.2/ Résultats des mesures de reproductibilité et de répétabilité (R&R)

➤ Justification des mesures R&R

Après avoir étalonner un banc de mesure, les campagnes de R&R permettent d'évaluer les incertitudes de mesure associées à celui-ci : données essentielles dans le cadre du processus de qualification industrielle de composants. En effet, ces dernières permettent de quantifier les incertitudes dues aux mesures et l'évolution des paramètres étudiés est alors suivie à la précision du banc de mesure près. Par définition, la reproductibilité d'un banc de mesure sert à vérifier que malgré le changement d'opérateur, la mesure du composant témoin est identique.

Pour cela, plusieurs opérateurs effectuent, plusieurs fois dans une journée, la mesure du même composant de référence. La répétabilité, elle consiste à la vérification de la stabilité du banc, au cours du temps : un opérateur effectue plusieurs mesures du même composant de référence dans un intervalle de temps défini.

➤ Résultats des mesures R&R

Le tableau 11 présente deux résultats concernant deux caractéristiques principales (gain et figure de bruit) d'un AOS mesurées lors des campagnes R&R menées sur les bancs TP082 et GRC à

ALCATEL. Les résultats du banc TP082 et du banc GRC ont été obtenus après trois mesures par 3 opérateurs sur 3 puces et montrent une sensibilité quasiment équivalente de ces deux bancs.

Paramètres TP082	Unité	Répétabilité (Equipement)	Reproductibilité (Opérateurs)	Objectif sur le résultat
NFMax@200mA	dB	0,33	0,1	+/-0,5
GainMax@200mA	dB	0,29	0	+/-0,5
Paramètres GRC	Unité	Répétabilité	Reproductibilité	Objectif
NFMax@200mA	dB	0,2	0,2	+/-0,5
GainMax@200mA	dB	0,1	0,2	+/-0,5

Tableau 11 : Synthèse des mesures R&R ALCATEL R&I/Optronics à température ambiante sur un AOS (25°C)

Le banc TP057 est un banc moins récent que les bancs GRC et TP082. La vérification de la répétabilité et de la reproductivité de ce banc a donc été effectuée lors de ses premières mesures puis de façon systématique. En effet, le suivi des dérives éventuelles au cours du temps se fait ensuite automatiquement par programmation sur le banc TP057.

Avant chaque utilisation de ce banc de mesure, l'opérateur effectue une mesure préalable d'une barrette de composants témoins permettant de suivre la dérive éventuelle des paramètres mesurés grâce à ce banc. Un logiciel traite ensuite, grâce aux lois de statistique MSP (ou Maîtrise Statistique des Processus), toutes les données recueillies et permet de constater des défaillances du banc considéré. Ce suivi de banc de mesure est assuré par différentes cartes automatisées associées à ce logiciel et permet donc de contrôler à tout instant l'état du banc et l'incertitude faite sur les mesures effectuées. Les mesures de R&R de ce banc effectuées par ALCATEL Optronics ont montré que les mesures faites avec ce banc sont donc reproductibles et répétables.

➤ *Synthèse*

L'évaluation des trois bancs GRC, TP082 et TP057 par les mesures R&R ont montré que l'ensemble des mesures effectuées avec ceux-ci sont reproductibles et répétables. Les conclusions sont les suivantes :

- ✓ Le banc TP057 (banc de qualification laser) a été retenu pour réaliser l'ensemble des mesures de puissance optique et de courant de seuil sur AOSs transférés,
- ✓ Le banc TP082 a été utilisé, à partir de l'année 2002, pour une caractérisation complémentaire à celle du TP057 des AOSs transférés, car la version finale de ce banc n'a été validée qu'au cours de l'année 2003. Aujourd'hui, la dernière version du banc TP082 permet une mesure automatique des puces AOSs unitaires. Cependant, la difficulté majeure de cette mesure reste la

définition et le maintien du couplage des fibres optiques avec la puce sous test. Néanmoins, les mesures de reproductibilité et de répétabilité de ce banc effectuées par ALCATEL Optronics, répertoriées ci-dessus, ont montré que ce banc est opérationnel en l'état.

- ✓ Le banc GRC, développé en intégralité chez ALCATEL R&I, est un banc de contrôle et de validation des résultats obtenus car son utilisation nécessite des délais supplémentaires en terme de durée de mesure puisque celui-ci n'est pas automatisé.

4/ CONCLUSION

Nous avons décrit dans la première partie de ce chapitre les principaux paramètres d'un AOS et leurs moyens de caractérisation. La valeur du gain fibre à fibre caractéristique de l'AOS est de 14dB pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -26dBm à 1550nm. La puissance de saturation, valeur de la puissance optique de sortie pour laquelle le gain a diminué de 3dB est typiquement proche de $7,5\text{dBm}$.

La linéarité du gain est constatée pour une plage de courant variant de 30mA à 100mA et la valeur maximale du gain est de l'ordre de 25dB. De même, la valeur de la figure de bruit caractéristique de l'AOS est proche de 14dB, pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -26dBm à 1550nm, cette valeur étant la valeur maximale de la figure de bruit d'un AOS. En comparaison avec des AOSs de la technologie NTT et de la technologie CORNING, les ordres de grandeur du gain et de la figure de bruit sont similaires. La performance, en terme de gain et de figure de bruit, de la technologie ALCATEL est donc comparable aux technologies concurrentes. Un autre paramètre caractéristique de l'AOS est son spectre optique. Sa largeur spectrale à mi-hauteur (60nm) démontre la prédominance de l'émission spontanée dans un AOS et sa longueur d'onde centrale est proche de 1525nm à 100mA.

L'ensemble des caractéristiques de l'AOS facilite la compréhension du mode de fonctionnement de ce composant. Leurs évolutions au cours des tests de vieillissement seront étudiées dans le prochain chapitre afin d'émettre des hypothèses quant aux mécanismes de dégradation déclenchés et aux sites de dégradation. Ces observations nous permettront également dans le chapitre 4 d'envisager l'origine et la localisation de ces phénomènes. Néanmoins, les variations des caractéristiques peuvent comporter des incertitudes quant à la localisation exacte de la zone du composant ayant subi une dégradation.

La seconde partie de ce chapitre a mis en lumière les performances des moyens de caractérisation permettant de suivre au cours des vieillissements les différentes caractéristiques électriques et optiques des AOS. L'ensemble des paramètres caractéristiques des AOSs de l'étude expérimentale, présentée dans le chapitre 3, sont suivis grâce aux bancs TP057 (banc de qualification des diodes laser), TP082 et GRC. Ces trois bancs, adaptés aux AOSs 1,3 et $1,55\mu\text{m}$, permettent de mesurer :

- le gain fibre à fibre (en fonction de la longueur d'onde du signal incident et du courant injecté) et la sensibilité à la polarisation en mode TE et TM,
- le facteur de bruit, la puissance de saturation et les pertes de couplage,
- la puissance optique en fonction du courant d'alimentation injecté et le pseudo courant de seuil d'un AOS.

L'objectif visé par les industriels, sur les coefficients de répétabilité et de reproductibilité, étant atteint pour les trois bancs, les mesures effectuées sur ceux-ci sont donc considérées comme répétables et reproductibles : résultat essentiel pour la suite de notre étude.

En effet, ces bancs doivent autoriser l'observation de dérives très faibles. A titre d'exemple, une variation de G_{ff} ou de NF sera considérée comme significative lorsqu'elle sera supérieure à 0,5dB. Il sera alors possible, dans le prochain chapitre, d'évoquer la notion d'indicateur précoce de défaillance en rapport avec les dérives observées des différentes caractéristiques électro-optiques observées durant les tests de vieillissement effectués.

L'ensemble des informations venant d'être développées, nous possédons maintenant les outils nécessaires à la construction d'une méthodologie pour l'étude des mécanismes de dégradation des AOSs qui va se dérouler comme suit :

1. Définition des conditions de déverminage et de vieillissement des AOSs.
2. Observation et identification des mécanismes de vieillissement des AOSs.
3. Localisation de l'origine des défaillances observées.

Chapitre 3

Etude des limites de la robustesse de l'amplificateur
optique à semiconducteur $1,55\mu\text{m}$ -
Signatures de défaillance

1/ INTRODUCTION

Le deuxième chapitre a permis de caractériser le composant AOS 1,55 μ m sur InP, expliciter son mode de fonctionnement et les mécanismes physiques associés puis exposer les moyens d'analyse électro-optiques. L'objectif de ce troisième chapitre réside dans l'évaluation des marges de robustesse technologique et l'analyse de l'impact d'un processus industriel de qualification sur cette technologie. Dans une première partie, une étude bibliographique synthétise les mécanismes de dégradation, déjà observés lors de différentes études expérimentales effectuées, des diodes laser à ruban enterré BRS 1,55 μ m, architecture technologiquement similaire à celle d'un AOS [42, 43]. Ces éléments bibliographiques serviront de base pour l'évaluation technologique et le diagnostic de défaillance des AOSs. En effet, les résultats de cette étude permettront de cibler le plan d'expériences à conduire et seront utilisés comme point d'appui pour établir le choix des paramètres à suivre et les conditions de tests à appliquer.

Après avoir exposé cette synthèse bibliographique, nous décrirons, dans une seconde partie, le comportement des AOSs en initial puis après les tests de vieillissement appliqués lors de cette étude expérimentale. Trois différents lots de composant, classifiés comme lots 1, 2 et 3, et les composants de qualification, dont la structure définitive a été transférée, ont été étudiés. Dans ce même paragraphe, l'évolution des paramètres suivis des AOSs et les signatures de défaillance associées aux mécanismes de dégradation de ces composants seront alors exposés et évalués afin d'orienter l'analyse de défaillance qui sera ensuite conduite dans le chapitre 4. Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, des hypothèses portant sur la cinétique et l'activation de la dégradation seront développées. Une première prédiction de la distribution des durées de vie d'un AOS, en conditions opérationnelles, sera abordée à partir d'une approche originale basée sur la méthode Monte-Carlo appliquée dans le cadre d'une faible population de composants et d'une faible dérive des paramètres dans le temps.

2/ DEFAILLANCES DES DIODES LASER DE TECHNOLOGIE BRS : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1/ Contexte et justification de la synthèse bibliographique

Nous avons procédé à une évaluation bibliographique exhaustive montrant que de nombreuses études se sont attachées au développement et à la mise au point de procédés technologiques de réalisation des AOSs, à leurs caractérisations électro-optiques et à leurs applications [9, 10, 17, 22, 23, 30, 57]. En revanche, peu d'études se sont attachées à décrire et caractériser leur comportement après des vieillissements accélérés, l'origine des mécanismes de dégradation des AOSs, les marges de robustesse et encore moins la prévision d'une durée de vie en conditions opérationnelles [51, 53, 58].

Afin de s'appuyer sur des éléments bibliographiques de référence, cette première partie est donc consacré à la synthèse bibliographique des modèles de dégradation généraux déterminés pour les diodes laser à ruban enterré InGaAsP/InP (BRS), composant proche d'un AOS tant du point de vue technologique que de la fonctionnalité comme nous l'avons présenté dans le chapitre 1. Cette synthèse bibliographique a été plus particulièrement focalisée sur une technologie BRS 1,55 μ m et s'articule autour de trois axes :

1. une description précise de la structure des composants étudiés, les paramètres suivis et les conditions des tests de vieillissement effectués sont présentés,
2. l'évolution des paramètres suivis est analysée,
3. l'identification et la localisation des mécanismes de dégradation relatifs à ces structures seront enfin synthétisées.

Les mécanismes de dégradation des diodes laser BRS, exposés ci-dessous, ont été évalués grâce aux études internes à ALCATEL et aux récentes publications dans ce domaine montrant que les taux de défaillance de ces composants, arrivés aujourd'hui à une maturité commerciale, est en constante diminution atteignant moins de 500 FITs sur 15 ans dans les conditions d'utilisation stabilisées autour de 25°C/40mW [46].

L'identification des modes de défaillance et des mécanismes de dégradation de ces composants a été rendue possible par la mise en place de tests accélérés et de campagnes d'analyses de défaillance. Comme nous l'avons souligné au cours du chapitre 1, cette procédure d'analyse a été appliquée dans de nombreuses études, en particulier en vue de l'optimisation de conception et de processus de qualification de différentes technologies de composants optoélectroniques [45, 46, 47, 48], se déclinant de la façon suivante :

- I. mise en œuvre de tests accélérés sous différentes conditions qui se situent au-delà des conditions normales de fonctionnement,
- II. mesure en fonction du temps des paramètres caractéristiques électro-optiques des composants mis en vieillissement,
- III. suivi des dérives de ces paramètres en corrélation avec des analyses de défaillance permettant de déterminer l'origine du mécanisme de dégradation observé.

Pour cette synthèse bibliographique, nous nous sommes attachés à reporter :

- les modèles électriques statiques équivalents avec pour objectif la connaissance de la répartition des lignes de courant dans une structure de type BRS et de localiser les zones de fragilité de ce composant,
- un exemple d'étude des mécanismes de dégradation génériques des diodes laser à double hétérostructure enterrée,

- ainsi qu'un exemple d'étude des mécanismes de dégradation propres à une technologie de diode laser DFB 1,55 μm ("Distributed FeedBack") de maturité commerciale dont une application adresse les communications haut débit en utilisant la technique WDM à longue distance (au moins 80km) en intégrant des EDFAs.

Cette synthèse n'est pas exhaustive mais elle est néanmoins significative car elle est représentative de l'ensemble des résultats majeurs obtenus sur l'étude des mécanismes de dégradation des diodes laser à double hétérostructure enterrée solidement décrits, notamment par des travaux de référence menés M. Fukuda, O. Ueda, K. Mizuishi ou encore par H. Temkin, G. Romo et P. G. Eliseev [40, 59, 60, 76, 77, 78]. En effet, la diode laser BRS est une structure dérivant des structures de diodes laser à double hétérostructure enterrée. Les modèles électriques équivalents déduits des diodes laser à double hétérostructure enterrée ont donc été appliqués, en première approximation, à la technologie BRS. Il a alors été mis en évidence que les modes de défaillance observés de la diode laser BRS peuvent être modélisés de la même façon que ceux de la diode laser à double hétérostructure enterrée (variations des éléments du modèle électrique équivalent).

Cette hypothèse ayant été validée dans les études de M. Fukuda et plus récemment dans les travaux de thèse de M. Pommies sur une technologie ALCATEL [41], la première partie de la synthèse bibliographique est par conséquent centrée sur trois études différentes :

1. Les premiers résultats présentés sont ceux des travaux de thèse d'Antoine Guichardon qui ont été publiés en 1995. Cette thèse s'inscrit dans une étude de la caractérisation et la modélisation électrique bi-dimensionnelle des diodes laser InGaAsP/InP BRS à l'aide du logiciel interne d'ALCATEL R&I Deneb, basée sur l'analyse des étapes technologiques de réalisation de cette structure [36]. Elle expose une approche appliquée au développement d'émetteur à haut niveau de performance pour les systèmes de télécommunication aux longueurs d'onde de 1,3 μm et 1,55 μm . La réponse aux spécifications système passe par une optimisation des paramètres statiques de la structure décrits par la caractéristique de la puissance optique et en particuliers par une réduction du courant de seuil. A l'aide d'une modélisation électrique par éléments finis en deux dimensions, cette étude s'est focalisée donc sur deux points majeurs : appréhender l'ensemble des phénomènes physiques de la diode laser BRS InGaAsP/InP et mettre en lumière les zones de fragilité de ce composant.
2. La seconde étude, basée sur des tests de vieillissements accélérés ("ageing tests"), est celle entreprise par M. Fukuda dont les résultats ont donné lieu à une classification de référence des mécanismes de dégradation des diodes laser à double hétérostructure enterrée, permettant ainsi de caractériser également les modes de défaillance des diodes laser BRS dans une première approximation. Les tests portent sur des diodes lasers à double hétérostructure enterrée émettant à

1,3 μm et 1,55 μm , d'une longueur de 200 μm , avec un nombre de composants testés de l'ordre de quelques milliers [40].

3. Le dernier exemple décrit les résultats relatifs aux tests de qualification industrielle des diodes laser BRS 1,55 μm correspondant à une technologie transférée. En effet, dans l'objectif de commercialiser ces composants pour les différentes applications envisagées de celui-ci, ALCATEL Optronics a effectué les tests définis par des normes standards (Bellcore/Telcordia) (cf. chapitre 1), relatifs à ces composants pour des applications de télécommunication. Les tests d'ALCATEL Optronics portent sur des diodes laser DFB-BRS dont la longueur est comprise entre 300 μm et 600 μm . Le nombre de composants est de l'ordre de quelques centaines [61].

La première partie de la synthèse bibliographique présente donc l'efficacité des différents tests de vieillissement accéléré ("ageing tests") pour l'étude des mécanismes de dégradation et de l'estimation de la fiabilité des diodes laser à double hétérostructure enterrée. Cependant, l'utilisation de ces différents tests engendre de nombreuses contraintes :

- ☞ la prévision de la durée de vie d'un composant optoélectronique, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, est le plus souvent réalisée à partir de lois extrapolées dans le temps relatives à un nombre important de composants et de tests accélérés sur une durée pouvant s'étendre jusqu'à des milliers d'heures,
- ☞ les techniques d'analyse de défaillance de ces composants de technologie de plus en plus complexes (SEM (microscopie électronique en réflexion), TEM (microscopie électronique en transmission), SIMs (spectroscopie de masse en ions secondaires), EBIC (courant induit par faisceau d'électrons)...) sont difficiles à mettre en oeuvre en particulier dans le cadre d'une phase finale de qualification industrielle (hypothèse sur la localisation du défaut, préparation minutieuse), sont coûteuses, destructives et ne permettent pas de garantir une fiabilité absolue d'investigation du défaut.

Ces contraintes sont, aujourd'hui, d'autant plus significatives que les niveaux actuels de fiabilité des composants optoélectroniques doivent répondre à une exigence d'optimisation et de réduction des tests de qualification. Ces nouvelles exigences mettent alors en lumière les limites de l'approche consistant en l'application de différents tests de vieillissement accéléré. Dans l'objectif de réduire le nombre de tests et d'analyses efficaces pour la caractérisation des diodes laser à double hétérostructure enterrée et pour l'étude de leurs mécanismes de dégradation, une solution alternative a donc été développée.

La seconde partie de la synthèse bibliographique pour l'étude des mécanismes de dégradation des diodes laser à double hétérostructure enterrée est fondée sur l'analyse de dérives précoces de paramètres électriques et/ou optiques susceptibles d'être classifiées comme signatures d'un mécanisme de défaillance déjà identifié. Cette méthodologie repose, en particulier, sur l'étude de la caractéristique courant-tension des diodes laser à double hétérostructure enterrée.

L'intérêt de cette approche est triple :

- ✓ capacité d'analyse des paramètres technologiques simplifiée,
- ✓ rapidité de mise en œuvre, d'acquisition et de traitement de données,
- ✓ détermination d'indicateurs précoces de défaillance après un ensemble de tests accélérés sur une durée relativement réduite.

Cette méthode a particulièrement été initiée par M. Vanzi puis ensuite développée et précisée par de nombreux autres auteurs [41, 49, 62, 63]. La seconde partie de la synthèse bibliographique est présente les résultats de M. Pommies qui sont relatifs à l'application de la seconde méthodologie pour l'étude des mécanismes de dégradation des diodes laser BRS.

L'ensemble des résultats de la synthèse bibliographique, exposés ci-dessous, servira de référence pour l'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur les AOSs et l'approche basée sur l'identification de signatures de défaillance sera notamment appliquée aux AOSs.

2.2/ Description des paramètres analysés sur les diodes laser BRS

L'analyse des mécanismes de dégradation des diodes laser BRS à partir des études de M. Fukuda et du plan de qualification interne d'ALCATEL Optronics, est présentée dans le paragraphe 2.3.2 [40, 61]. Elle consiste en particulier en l'analyse de l'évolution du rendement optique et du courant de seuil des deux types de composants cités ci-dessus (diode laser à double hétérostructure enterrée et diode laser BRS). La seconde partie de l'étude bibliographique détaille, dans le paragraphe 2.3.3, l'exploitation de la caractéristique courant-tension (ou I(V)) bas-niveau des diodes laser BRS [41, 49, 61, 63].

L'étude des modes de dégradation de la diode laser BRS est basée sur la structure présentée en figure 50. Cette structure permet un excellent confinement du courant vers la couche active grâce à la qualité de blocage des régions implantées. Elle assure un très bon rendement, avec un courant de seuil proche de 15mA, grâce aux homojonctions P-N latérales de confinement dont les barrières de potentiel sont plus élevées que celle de la couche active privilégiant ainsi le passage du courant dans cette zone.

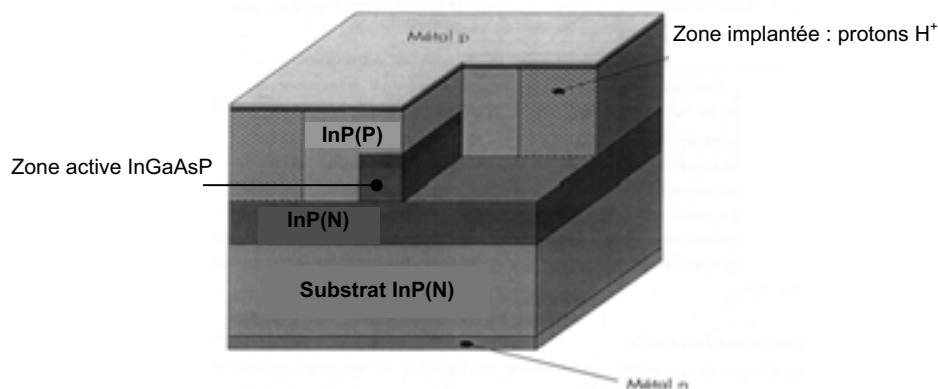


Figure 50 : Structure latérale d'une diode laser BRS 1,55µm (InGaAsP/InP) d'après M. Pommies [41]

Cependant, la qualité du confinement électrique (latéral et transversal) étant étroitement reliée à la qualité et à la géométrie des interfaces (latérale et transversale), et en particulier à celle définissant les couches enterrées. Ces interfaces constituent donc une zone de faiblesse dans ce type de composant. En effet, le masquage et la gravure sèche RIBE ("Reactive Ion Beam Etching") de la zone active (ou ruban) est effectuée sur une épaisseur de 0,7µm. Puis une gravure chimique à base de HBr+H₂O₂ puis de H₂SO₄ permet la définition des bords de la zone active (ruban enterré) et la préparation de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P). Cette gravure chimique est une étape critique pour la qualité des interfaces (latérale et transversale) car elle peut générer des défauts cristallins aux interfaces : couches enterrées/couches épitaxiées pouvant alors entraîner l'apparition d'un courant de fuite en dehors de la zone active. Nous reviendrons sur cette notion dans la suite de ce document.

➤ *Rendement global et courant de seuil – Critères de défaillance*

Le rendement global et le courant de seuil sont les deux paramètres caractéristiques d'une diode Laser. En effet, une dégradation d'un de ces paramètres correspond à une dégradation du composant.

Le rendement différentiel externe (η) d'une diode laser, est défini par :

$$\eta = \frac{\text{nombre de photons émis hors de la cavité}}{\text{nombre de porteurs injectés}} \approx \frac{P_{opt}}{P_{elec}} \quad (1-67)$$

Le courant de seuil (I_{th}) d'une diode laser est défini par la relation suivante :

$$I_{th} = \frac{qn_{th}d}{\tau_s} * S \quad (1-68)$$

avec :

- q : charge de l'électron et n_{th} : densité de porteurs à l'équilibre,
- d : largeur de la zone active, S : surface de la zone active du composant,
- τ_s : durée de vie des porteurs injectés [41].

De manière générale, pour les diodes laser à ruban enterré, les critères de défaillance sont définis, en fonction des applications considérées, par :

- une dérive positive sur le courant de seuil : $\Delta I_{th}/I_{th} < +10\%$, 15% ou 20%,
- une dérive négative sur le rendement : $\Delta \eta/\eta < -10\%$, 15% ou 20%.

➤ *Caractéristique courant-tension bas-niveau : modèle électrique retenu*

Dans une jonction PN, le courant à bas-niveau (sous la tension de seuil) est considéré comme la somme de différents mécanismes, qui suivant la polarisation, sont plus ou moins prépondérants et leurs effets plus ou moins visibles sur la caractéristique courant-tension de cette jonction [62, 63].

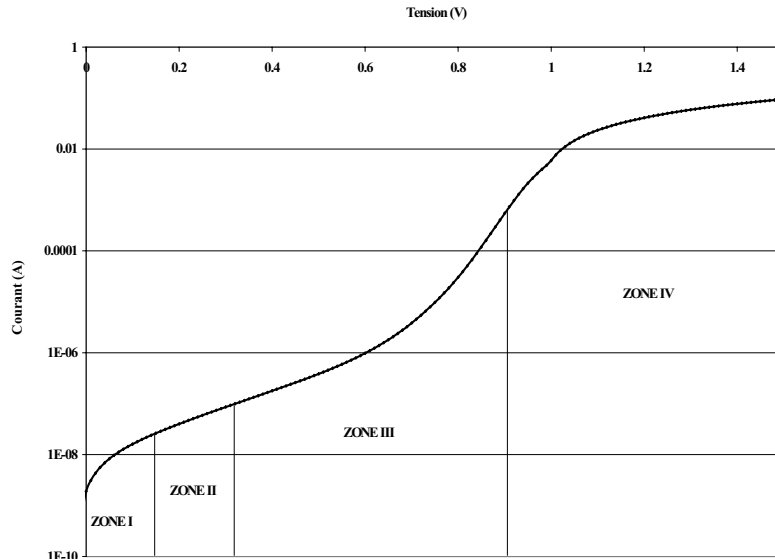


Figure 51 : Caractéristique courant-tension expérimentale d'une diode Laser BRS 1,55 μm

De façon analogue à une diode laser à double hétérostructure enterrée, l'approche développée a consisté à distinguer sur la caractéristique courant-tension d'une diode Laser BRS, quatre zones de fonctionnement différent (figure 51) suivant le courant d'alimentation de la jonction PN :

- ✓ la zone I est représentative d'un courant de fuite,
 - ✓ la zone II traduit les mécanismes de génération-recombinaison,
 - ✓ la zone III est relative aux faibles niveaux d'injection,
 - ✓ la zone IV représente les moyens et forts niveaux d'injection.
- *La zone I* ($<0,1\text{V}$) correspond à un mode de fonctionnement électrique "parasite" relatif à une prépondérance des courants de fuite. En effet, la jonction étant proche de l'état d'équilibre thermodynamique, les mouvements des porteurs sont donc nuls ou très faibles dans le semiconducteur. Cette partie de courbe correspond en première estimation à une loi linéaire (visible lorsque l'axe des ordonnées de la figure 46 est en échelle logarithmique) entre le courant et la tension traduisant un fonctionnement résistif. Cette résistance appelée résistance de shunt, (R_p), a été mise en évidence dans différents travaux [62, 63]. Cette dernière a généralement une valeur très importante, de quelques $\text{M}\Omega$ à quelque $\text{G}\Omega$, et masque souvent les courants de génération-recombinaison abordés dans la prochaine section. Elle peut aussi être déduite à partir de la mesure de la caractéristique courant-tension de la diode polarisée en inverse. Différentes études ont montré que la valeur de R_p dépend fortement de la technologie car elle est liée à la géométrie et à la qualité des interfaces (latérale et transversale), et en particulier à celle définissant les couches enterrées et à celle des zones de protonage (H^+) ainsi qu'au taux de dislocations en bord de puce [36, 41]. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, ces interfaces constituent une zone de faiblesse due à la préparation (gravure chimique) de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP

avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P). Cette gravure peut générer des défauts cristallins aux interfaces et entraîner l'apparition d'un courant de fuite en dehors de la zone active. 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. Le retour à l'équilibre privilégie alors le mécanisme de recombinaisons des porteurs en excès : recombinaison SRH, recombinaison spontanée.

- Pour les zones II et III (comprises entre 0,1V et 0,9V), la nature linéaire de ces deux tronçons permet de les décrire par l'équation générale de Schokley [38, 39] :

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{nkT_j}} - 1 \right) \quad (1-69)$$

avec :

- q est la charge de l'électron, n est le facteur d'idéalité,
- V la tension aux bornes de la jonction considérée et I_s son courant de saturation,
- k est la constante de Planck et T la température de la jonction du composant lors de la mesure.

Dans la zone II, le courant prédominant étant un courant de recombinaison avec un facteur d'idéalité proche de 2, il s'écrit :

$$I = I_{gr} e^{\frac{V}{2kT}} \quad (1-70)$$

avec : I_{gr} est le courant de saturation de la jonction considérée dont la valeur peut être de l'ordre de 10^{-12} A à température ambiante [41, 49].

Dans la zone III, le courant prédominant correspond à un courant de diffusion avec une prédominance en kT en s'écrivant :

$$I = I_s e^{\frac{V}{kT}} \quad (1-71)$$

avec : I_s est en général de l'ordre de 10^{-11} A [41, 49].

- Aux forts niveaux d'injection, dans la zone IV (>0,9V), le comportement de la jonction devient purement résistif. En fait, cet état est caractéristique du comportement du composant au seuil et au-delà. La résistance représentant les différentes couches semiconductrices d'accès et les contacts métalliques, est alors exprimée par la relation suivante :

$$R_s = \frac{dV}{dI} \quad (1-72)$$

Cette résistance série a une valeur typique qui peut varier de 2,5 Ω à 10 Ω [41, 49].

Toutes ces équations, caractérisant les différentes zones de la courbe I(V), permettent ensuite d'établir un schéma électrique équivalent pour les diodes laser BRS où chaque zone de la caractéristique est alors représentée par un élément de ce schéma plus ou moins prépondérant en fonction du niveau

d'injection [61, 62, 63]. En première approximation, une diode D2 représentative de la zone III, correspondant à la zone active InGaAsP du composant est placée en parallèle avec une diode D1 (zone II) correspondant à l'homojonction latérale InP/InP. La résistance R_s modélise la résistance des couches d'accès et de contact de la diode laser BRS (zone IV) et R_p (zone I) est la résistance de shunt prenant en compte les courants de fuite dans les régions implantées. On obtient alors le schéma de la figure 52.

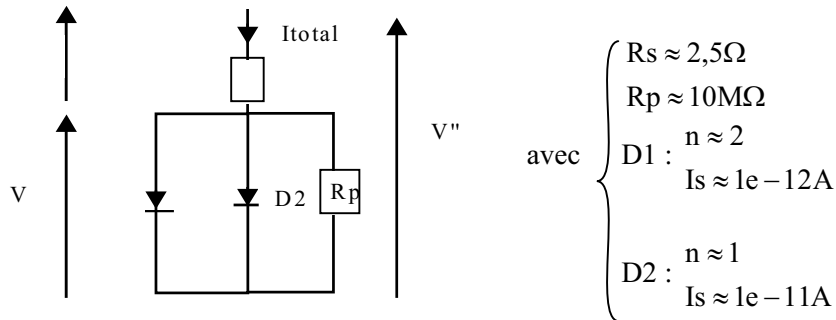


Figure 52 : Schéma électrique équivalent en régime statique d'une diode laser BRS 1,55 μ m

L'ensemble de cette méthodologie permet donc de relier les connaissances de base de la jonction PN avec la physique interne régissant le déplacement des porteurs dans les diodes laser BRS. De plus, grâce au schéma électrique équivalent, il est possible de localiser les zones du composant se rapportant aux différents paramètres électriques définis précédemment. A partir de ce modèle et de l'évolution de ces paramètres en fonction du temps de vieillissement, un diagnostic de défaillances est alors envisageable rendant possible l'identification et la localisation de la dégradation [41, 49].

2.3/ Résultats expérimentaux marquants issus de la synthèse bibliographique

2.3.1/ Etude structurelle de diodes laser BRS : apport de la modélisation physique

La caractérisation des diodes laser BRS doit être menée à partir de la connaissance des étapes technologiques de réalisation. L'objectif de cette étude a été de mettre en lumière les zones de fragilité de ces composants à l'aide d'une modélisation électrique bi-dimensionnelle par éléments finis à l'aide du simulateur DENEBA [36]. Ces résultats ont permis de mieux appréhender les mécanismes des différents courants de fuite de la diode. Pour cela, chaque étape du procédé de fabrication de ce composant a été particulièrement analysée. En effet, les caractéristiques tension-courant bas-niveau de la diode d'homojonction InP/InP, de la diode de la zone active et celle des zones protonnées (cf. figure 50) ont été mesurées à partir de structures de test correspondant à chacune de ces zones. Puis la comparaison de ces mesures avec les caractéristiques tension-courant bas-niveau obtenues par la modélisation de ces mêmes structures a été effectuée afin d'examiner la contribution de chacune d'elles à la caractéristique I(V) de la diode laser BRS globale.

Une fois le modèle établi, il a été alors possible de simuler les fuites de courant par l'introduction de défauts dans le modèle de chacune de ces diodes.

Les résultats marquants de cette étude sont les suivants :

- Le modèle de l'homojonction InP(P)/InP(N) utilise une décomposition originale de cette jonction en micro-diodes (D_i) en parallèle, chacune d'elle caractérisée par un modèle de zone de charge d'espace, un courant de saturation I_s , un facteur d'idéalité η compris entre 1 et 2, une résistance série R_{S_i} essentiellement d'accès et une surface S_i . Ces micro-diodes traduisent un excès de courant à bas-niveau et une décroissance de leur résistance série.

Afin de caractériser ces phénomènes, un modèle, intégrant une zone compensée en épaisseur non dopée (couche tampon) à l'interface InP(P)/InP(N) et une réduction de gap des matériaux mis en jeu, a été implanté. En effet, la zone compensée permet de prendre en compte les effets de diffusion des dopants de type p-Be à la jonction InP(P)/InP(N) et la réduction du gap des matériaux est liée au fort dopage de ceux-ci. Ce modèle montre donc que l'interface InP(P)/InP(N) constitue une zone de faiblesse de la diode laser BRS.

- La modélisation, à partir d'un modèle d'ionisation d'états profonds agissant comme des pièges et des centres de recombinaison non radiatifs, du comportement des régions implantées révèle un important courant de recombinaison à l'interface entre ces régions et les régions non implantées. En effet, l'implantation de protons lors de la fabrication de la diode laser BRS est effectuée afin de diminuer le courant "parasite" circulant dans la diode d'homojonction InP(P)/InP(N) en réduisant la surface effective de celle-ci. Cette technique, qui crée des défauts cristallins dans la zone implantée, est couramment utilisée pour confiner, par exemple, le courant dans la zone active des diodes laser. Cependant, l'implantation se situant à quelques microns de la zone active, les défauts introduits peuvent engendrer des courants de recombinaison substantiels aux interfaces et/ou des pertes optiques par absorption et peuvent alors parfois être responsables d'une dégradation des performances du composant.
- A l'interface latérale de la zone active, des recombinaisons non radiatives ont également été mises en évidence par topoluminescence. En effet, après avoir comparé la luminescence de la zone active gravée d'une structure de test d'une diode laser BRS et celle d'une structure de test d'un pavé dont la structure est identique à celle d'une diode laser BRS mais dont la zone active n'a pas été gravée et donc où l'homojonction InP(P)/InP(N) n'existe pas, on constate qu'il existe un effet de seuil sur l'intensité de la luminescence des deux structures observées. Ce seuil peut être interprété comme un indicateur de l'énergie nécessaire pour atteindre un confinement maximum des porteurs vers la zone active et déclenchant de manière significative les recombinaisons radiatives. L'intensité de la luminescence, de la diode laser BRS observée, représente 50% de l'intensité de la luminescence du pavé. La zone active de la diode laser BRS étant enterrée, les porteurs injectés dans cette structure ont donc la possibilité de diffuser et de se recombiner à l'interface de reprise d'épitaxie InP(P)/InP(N), contrairement à la structure pavé où l'homojonction

InP(P)/InP(N) n'existe pas. Ainsi, la luminescence de la diode laser BRS n'apparaît qu'au delà d'une certaine densité de porteurs (plus élevée que celle du pavé). Cette densité de porteurs correspondant à la saturation des défauts cristallins à l'interface InP(P)/InP(N), c'est à dire lorsque le processus des recombinaisons radiatives dans la couche active devient plus rapide que la vitesse de recombinaison sur les défauts. La différence de luminescence entre les deux structures de test suggère donc l'existence de recombinaisons non radiatives aux bords de la zone active.

Au travers de cette étude, différentes zones de fragilités, essentiellement dues aux forts dopages des matériaux mis en jeu, à la diffusion des dopants à l'interface InP(P)/InP(N) et à la gravure chimique permettant la préparation de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P), ont donc été mises en évidence :

- ✓ tout d'abord, l'homojonction InP(P)/InP(N), avec la possible diffusion des dopants de type p à la jonction InP(P)/InP(N) et la réduction du gap des matériaux liée au fort dopage de ceux-ci,
- ✓ ensuite, l'interface entre les régions implantées et non implantées, avec l'implantation qui se situe à quelques microns de la zone active, les défauts cristallins introduits peuvent engendrer des courants de recombinaison substantiels à cette interface,
- ✓ et enfin, les bords latéraux de la zone active, car l'existence de centres de recombinaison non radiatifs aux bords de la zone active, due à la préparation de la surface du matériau InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P), a été montrée.

2.3.2/ Classification des modes de défaillance

Les modes de défaillance, décrits dans la suite de ce paragraphe au travers desquels l'évolution du rendement et du courant de seuil est particulièrement analysée, ont été obtenus à partir :

- des tests de vieillissement accéléré, effectués par M. Fukuda sur les diodes laser à double hétérostructure enterrée permettant donc de caractériser, en première approximation, les modes de défaillance de la diode laser BRS,
- du plan de qualification interne des diodes laser BRS d'ALCATEL Optronics pour l'étude des mécanismes de dégradation de ces composants.

➤ *Mode de défaillance A*

L'impact du premier test de vieillissement, dont les conditions sont : 50°C/180mA, sur la caractéristique du rendement est montré en figure 53. Avant vieillissement, le rendement des diodes laser BRS n'est pas constant : il chute lorsque le courant augmente. Cette diminution du rendement est généralement reliée à une augmentation du courant de fuite dans les couches enterrées en dehors de la zone active lorsque le niveau de polarisation du composant augmente.

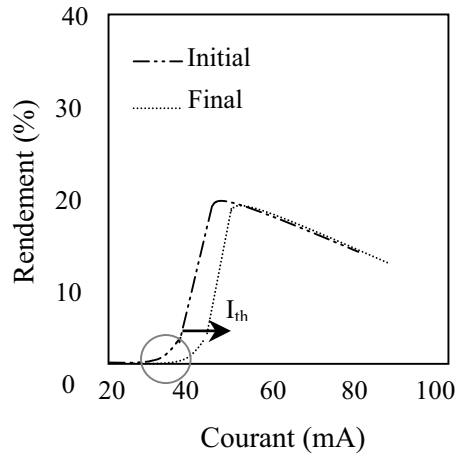


Figure 53 : Evolution de la caractéristique du rendement d'une diode laser à ruban enterré InGaAsP/InP 1,55 μ m en fonction du courant

Après vieillissement, on constate une augmentation du courant de seuil sans incidence sur le rendement du composant considéré. L'augmentation du courant de seuil d'un composant BRS sous test est reliée à une diminution de la durée de vie des porteurs injectés (τ_s) dans la zone active. Cette évolution de la caractéristique du rendement est l'image d'une dégradation de la zone active. Ce type de vieillissement est nommé mécanisme de dégradation A d'après la classification générale proposée par M. Fukuda [40]. Néanmoins, sur une structure identique de diode Laser BRS, ce même phénomène a été observé par O. Ueda [59], lors de tests de vieillissement dont les conditions de test appliquées consistent en de courtes impulsions en courant (1,5A durant 120 μ s). Dans ce cadre, une analyse de défaillance par photoluminescence a été effectuée. Elle a révélé la présence de centres de recombinaison non radiatifs proches de la zone active permettant d'expliquer une diminution de la durée de vie des porteurs dans cette zone.

Lors d'un test de vieillissement accéléré, l'augmentation du courant de seuil d'une diode laser BRS est donc reliée à une diminution de la durée de vie des porteurs dans la zone active, la présence de centres de recombinaison non radiatifs proches de la zone active permettant d'expliquer cette diminution, ce vieillissement donnant lieu à une dégradation de la zone active [40, 59].

➤ *Mode de défaillance B*

L'impact du second test de vieillissement, dont les conditions sont : 70°C/200mA, sur la caractéristique de l'efficacité est présenté en figure 54.

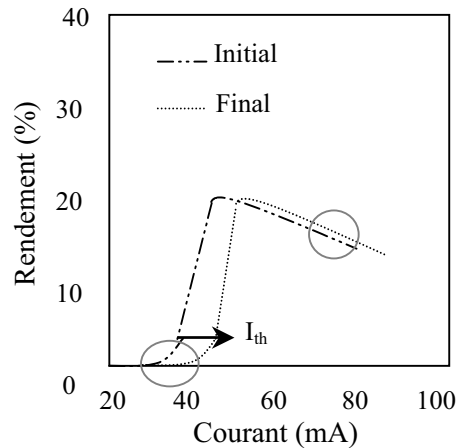


Figure 54 : Evolution de la caractéristique du rendement d'une diode laser à ruban enterré InGaAsP/InP 1,55 μ m en fonction du courant

Ce mode de défaillance est caractérisé par un décalage de toute la courbe d'efficacité vers les forts courants sans diminution du rendement optique. Celui-ci est lié à l'apparition d'un fort courant de fuite résistif en dehors de la zone active. Cette dégradation nécessite donc une augmentation du courant pour le fonctionnement de la puce mais la pente de diminution de son rendement optique n'a pas été affectée par ce test de vieillissement. Ce vieillissement, nommé mécanisme de dégradation B, est à relier à une dégradation de l'homojonction InP(N)/InP(P) [40].

Ce phénomène a été également mis en évidence par K-I. Mizuishi [60] sur une structure de diode Laser BRS 1,55 μ m de technologie équivalent dont la longueur totale du composant est de 300 μ m, en appliquant des contraintes cumulées en température (40°C, 50°C et 60°C) et en courant (valeur du courant maintenant une puissance optique de sortie constante de 5mW) sous atmosphère sèche d'azote. Dans le cas de ce test, malgré l'augmentation du courant de seuil, les lasers ne subissent aucune dégradation catastrophique jusqu'à 8000h de test. Néanmoins, suite à l'observation de cette dégradation (augmentation du courant de seuil), la durée de vie de ces composants a été estimée.

En effectuant l'hypothèse d'une loi de dégradation du courant de seuil qui puisse être lissée par une loi du type $a^m \exp(-E_a/kT)$ et en considérant un critère de fin de vie équivalent au temps nécessaire à une augmentation de 10% du courant de seuil, l'énergie d'activation (E_a) de cette dégradation est alors proche de 0,6eV. La durée de vie de ces composants est estimée à 5.10^5 h pour une utilisation en conditions opérationnelles (25°C/5mW). De plus, une analyse de défaillance par EBIC ("Electron Beam Induced Current") a été utilisée pour l'observation des miroirs de sortie des puces dégradées. La comparaison par rapport à une puce de référence a révélé des zones d'absence de luminescence à l'interface InP(N)/InP(P) des puces dégradées. Ces zones d'ombre montrent l'apparition de défauts ou pièges au niveau de cette interface. Ces défauts peuvent alors agir comme des centres de recombinaisons non radiatifs ou être à l'origine d'un courant de fuite en dehors de la zone active [40, 60].

➤ Mode de défaillance C

L'impact du troisième test de vieillissement sur la caractéristique du rendement est précisé par la figure 55 sous les conditions : 100°C/250mA. On constate une augmentation conjointe du courant de seuil et une diminution significative du rendement caractérisant un nouveau mécanisme de dégradation (C).

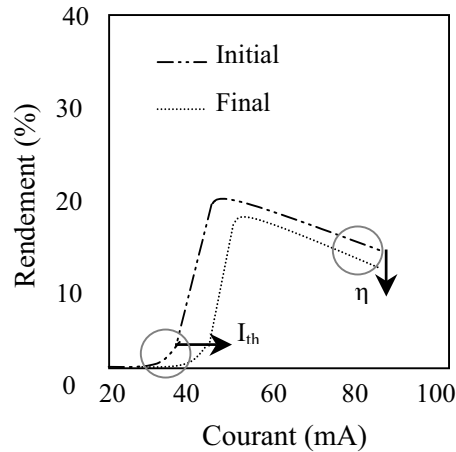


Figure 55 : Evolution de la caractéristique du rendement d'une diode laser à ruban enterré InGaAsP/InP 1,55µm en fonction du courant

L'augmentation du courant de seuil est corrélée à une diminution de la durée de vie des porteurs dans la zone active associée à la présence de centres de recombinaison non radiatifs proches de cette dernière (mécanisme A). La différence des pentes de diminution de l'efficacité avant et après vieillissement peut être reliée à l'augmentation des pertes internes de la cavité, pouvant être dues à l'augmentation du coefficient d'absorption de la cavité laser. De plus, comme nous l'avons vu précédemment, les défauts introduits par l'implantation peuvent engendrer des courants de recombinaison substantiels aux interfaces et/ou des pertes optiques par absorption [36].

Le mécanisme de dégradation C est donc relié, comme le mécanisme de dégradation A, à la présence de centres de recombinaison non radiatifs proches de la zone active mais également à une dégradation de l'interface zones implantées/zones non implantées du composant considéré [36, 40].

➤ Résultats du plan de qualification des diodes laser BRS 1,55µm

L'objectif principal d'un plan de qualification de la diode laser BRS fabriquées par ALCATEL Optronics est de garantir la fiabilité de ce composant pour les tests définis par les normes telles que les standards Bellcore/Telcordia, présentés dans le chapitre 1, pour les applications de télécommunication en vue de sa commercialisation. Les principales conclusions mises en évidence par ce plan de qualification sont exposées ci-dessus, en tenant compte du fait que le critère de défaillance défini, par ALCATEL Optronics, est une augmentation de 15% du courant de seuil des diodes laser BRS sous test [61] :

- Après des cyclages thermiques de 100 cycles dont la température est comprise entre -55°C et 150°C , les paramètres électro-optiques des diodes laser BRS sont stables au cours du temps démontrant une faible relaxation des contraintes liées au report de la puce sur son embase.
- Après stockage en température de 2000h sous 85°C et 125°C , aucune dérive du courant de seuil des puces n'a été constatée. Au-delà de cette température, un test en contrainte échelonnée en température de 150°C à 250°C a été mené dans l'objectif de connaître les limites de la robustesse des composants. A partir de 200°C , on constate une augmentation de $1\ \Omega$ de la résistance série (correspond à une augmentation de 100%), soulignant ainsi la criticité la contrainte en température de 200°C .
- Les tests ESD (modèle H.M.B par pas de 500V jusqu'à 2500V) ont montré que ces composants y sont peu sensibles.
- Des tests en contraintes échelonnées combinées, ont été effectués :
 - d'une durée de 1500h, à une puissance variant de 4mW à 20mW pour une température variant de 40°C à 100°C ,
 - d'une durée de 3500h, à un courant variant de 200mA à 300mA avec une température variant de 100°C à 120°C .

Ces tests ont permis d'estimer la durée de vie des diodes laser BRS. En effectuant l'hypothèse d'une loi de dégradation du courant de seuil qui suive une loi du type at^m et en considérant que le critère de fin de vie des composants sous test est l'augmentation de 15% du courant de seuil, l'estimation de l'énergie d'activation de cette dégradation est de 0,7eV. La durée de vie moyenne estimée de ces composants est alors de $1,5 \cdot 10^7$ h pour un profil de mission établi à $25^{\circ}\text{C}/40\text{mW}$.

Ces tests ont permis d'établir les limites de la robustesse de cette technologie correspondant à 300mA et 200°C . Au-delà des mécanismes de dégradation, tel que le phénomène dit de "self-pulsing", corrélatif à des oscillations libres de la diode laser dû à un emballement thermique dans la cavité optique, sont déclenchés [61]. Puisque ces mécanismes n'apparaissent pas durant le fonctionnement normal des composants, ils sont non représentatifs du vieillissement de ceux-ci et ils ne seront donc pas étudiés lors de ces travaux. De plus, le plan de qualification de ces composants ne montre pas de mode de défaillance supplémentaire que ceux observés par M. Fukuda.

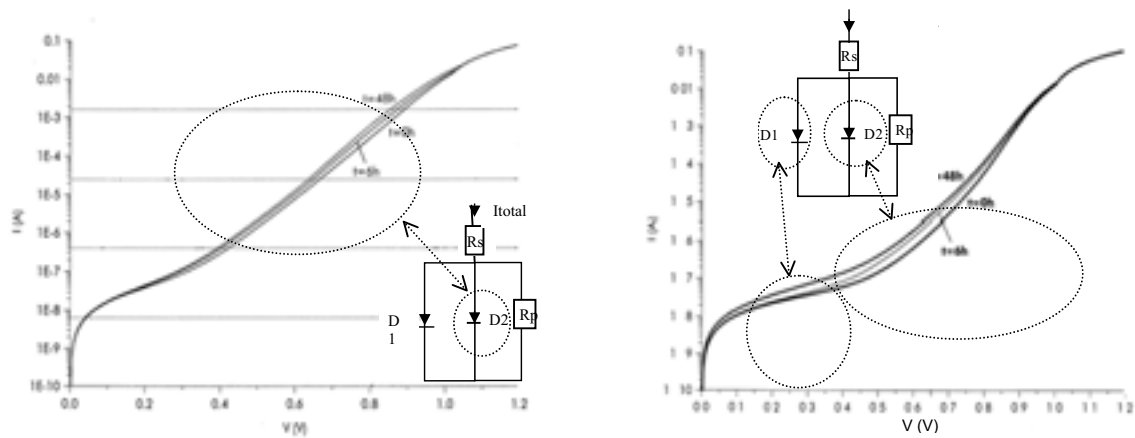
2.3.3/ Apport de l'étude de la caractéristique I(V) – Intérêt du modèle électrique équivalent

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe concernant les méthodes d'étude des mécanismes de dégradation des laser BRS, l'analyse des caractéristiques I(V) sous le seuil permet d'établir un modèle électrique statique équivalent où chaque élément (R_s , R_p , D1 et D2) de ce schéma est représentatif d'une zone particulière du composant et correspond à un niveau de polarisation de celui-ci. La diode Zener qui clampe la tension de la structure au-dessus du seuil n'est pas prise en compte. L'étude de l'évolution de la caractéristique I(V) du composant sous test permet d'accéder à la

localisation des zones du composant se rapportant aux différents paramètres électriques définis précédemment (R_s , R_p , $D1$ et $D2$) en fonction du mode de conduction.

A partir de ce modèle et de l'évolution de ces paramètres en fonction du temps de vieillissement, un diagnostic de défaillances est alors envisageable rendant possible l'identification et la localisation de la dégradation. L'ensemble des résultats expérimentaux, présentés ci-dessous, a été synthétisé, à partir des travaux de la thèse de M. Pommies en 2002 [41]. Cette synthèse a permis de dénombrer deux types de signatures de défaillance différentes en fonction du niveau de polarisation considéré. L'étude de la dégradation des diodes laser BRS a été réalisée exclusivement en utilisant trois plaques de diodes laser jugées atypiques en sortie de fabrication [41] :

- Les composants issus de la première plaque, dont les paramètres électro-optiques après déverminage évoluent fortement, ont montré au cours des tests de vieillissement (100°C - 200mA), un dédoublement significatif (la moitié d'une décade) et graduel de la caractéristique $I(V)$ entre $0,3\text{V}$ à $0,9\text{V}$. D'après le schéma électrique équivalent, présenté en figure 56(a), on peut associer l'évolution de la caractéristique $I(V)$, à une hypothèse de dégradation (augmentation du facteur d'idéalité) de la diode ($D2$) en liaison probable avec la zone active. Une analyse de défaillance par EBIC ("Electron Beam Induced Current") a révélé la présence de taches noires de taille variable préférentiellement positionnées sur les bords de la zone active. Ces défauts peuvent alors agir comme des centres de recombinaisons non radiatifs ou être à l'origine d'un courant de fuite en dehors de la zone active. De plus, une seconde analyse de défaillance par photoluminescence a confirmé la présence de ces défauts situés à l'interface $\text{InP(P)}/\text{InGaAsP}$. Ce dernier résultat permet d'associer le mécanisme A (classification Fukuda) à un dédoublement de la caractéristique $I(V)$ entre $0,3\text{V}$ et $0,9\text{V}$ des diodes laser BRS.
- Les composants issus des deux autres plaques, dont les paramètres électro-optiques après déverminage évoluent modérément, ont montré au cours du même test de vieillissement, un dédoublement de la caractéristique $I(V)$ entre 0h et 6h tout d'abord localisé entre $0,3\text{V}$ et $0,9\text{V}$ (figure 56(b)) puis s'étendant jusqu'à la zone $0,1\text{V}$ - $0,3\text{V}$. Une analyse de défaillance par EBIC et par photoluminescence de ces composants a également été effectuée. Cette analyse a montré que la cause et la localisation du premier dédoublement observé sont identiques à celles de la première plaque de composants et donc relié à la dégradation de l'hétérojonction. Cependant, la provenance du second dédoublement n'a pu être déterminée avec certitude par ce type d'analyse. Seule l'hypothèse d'une dégradation de la zone d'homojonction $\text{InP(N)}/\text{InP(P)}$, modélisée par l'augmentation du facteur d'idéalité (valeur supérieure à 2) de la diode $D1$ a pu être proposée par une simulation électrique et permettant de lisser la caractéristique $I(V)$ dégradée. La résolution spatiale des différentes techniques d'analyse utilisées n'a pas permis de confirmer cette hypothèse et d'identifier, de manière définitive, le mécanisme de dégradation observé.



(a) Vieillessement sous 100°C, 200mA pendant 48h

(b) Vieillessement sous 100°C, 200mA pendant 48h

Figure 56 : Caractéristiques expérimentales I(V) de diodes laser BRS 1,55 μm, mesurées à 25°C, en initial et après vieillissement d'après M. Pommies [41]

De plus, une étude sur l'énergie d'activation du test de la figure 56(b) a été menée en considérant que le critère de fin de vie des composants sous test est l'augmentation de 10% du courant de seuil et en supposant que la loi de dégradation du courant de seuil lisse une loi du type at^m . L'énergie d'activation du mécanisme de dégradation observé pour les composants des deux dernières plaques a été estimée autour de 0,7eV ; valeur confirmée par le plan de qualification mené par ALCATEL Optronics sur le courant d'alimentation et la puissance optique de sortie de la diode laser.

L'analyse de l'évolution de la caractéristique I(V) des diodes laser BRS 1,55 μm montre donc qu'il est possible d'étudier les mécanismes de dégradation de ces composants en appliquant un modèle électrique statique équivalent de diode laser à hétérostructure enterrée. Lors de notre étude expérimentale, la caractéristique I(V) et celle du rendement optique des composants suivis seront utilisées de façon complémentaire. En effet, l'AOS étant un composant dont le procédé de fabrication est stabilisé mais non qualifié, peu de recul quant aux hypothèses des mécanismes de dégradation existe ; une étude complète de l'évolution des paramètres de l'AOS sous test est alors nécessaire. De plus, les tests effectués sur les technologies BRS ont été effectués sur des durées très courtes (< à 100 h) ; ils correspondent donc plus à une étude de déverminage qu'à une étude de vieillissement d'où la nécessité d'une analyse plus poussée pour préciser les marges de robustesse technologique et la stabilité dans le temps en contraintes accélérées spécifiquement à un AOS. De plus, il est envisageable, comme dans l'étude de M. Pommies, de faire le lien entre l'étude des caractéristiques I(V) et celle du rendement optique afin de compléter l'analyse des dégradations de l'AOS.

2.4/ Localisation des zones de dégradation

Les études précédentes ont permis de mettre en évidence la localisation des zones de dégradation dans une structure de diode laser BRS. Les zones de fragilité ont été révélées par

l'utilisation de différentes techniques de caractérisation : électroluminescence, photoluminescence, EBIC, TEM et SIMs. La figure 57(a) schématise la localisation des dégradations sur une vue latérale d'une diode laser BRS 1,55 μ m. La figure 57(b) deux images, obtenues après une analyse TEM, qui nécessite parfois une préparation FIB pouvant générer des dégradations de l'échantillon, d'une vue en coupe perpendiculaire et d'une vue plane d'une diode laser BRS 1,55 μ m non vieillie. Les deux échantillons ont été préparés par polissage mécanique et amincissement ionique.

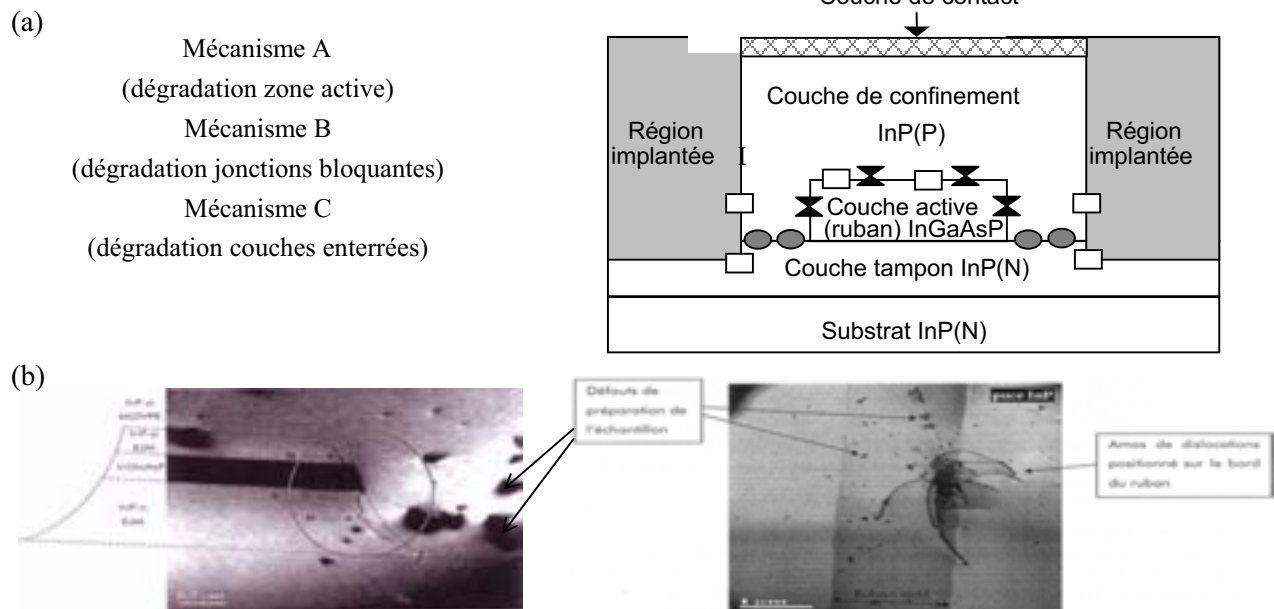


Figure 57 : Localisation des dégradations de la diode laser BRS 1,55 μ m (a) et Images TEM en coupe et en vue plane de dislocations (D) localisées en bord de ruban et à l'interface de reprise d'épitaxie (b) montrant les zones de fragilité de ce composant (gravure du ruban et qualité des interfaces latérales)

2.5/ Conclusion

Une synthèse bibliographique a mis en évidence qu'il existe trois modes majeurs de dégradation dans les diodes laser BRS (InGaAsP/InP) respectivement reliés à [40, 59, 60, 61] :

1. une dégradation de la couche active,
2. une dégradation de la diode d'homojonction InP(N)/InP(P),
3. une dégradation de la zone active et de l'interface zones implantées/zones non implantées.

Il apparaît que l'analyse de la caractéristique I(V) est un moyen complémentaire d'analyse des mécanismes de dégradation des composants optoélectroniques émissifs notamment pour la diode laser BRS dont les résultats peuvent être associés à ceux de l'étude de l'efficacité optique. Cette méthode d'étude permet de localiser le défaut dans une zone précise du composant et d'émettre une hypothèse quant au mécanisme de dégradation observé [41, 49, 62, 63]. Comme nous l'avons souligné en introduction, l'ensemble des méthodes et des résultats obtenus à partir de l'étude des mécanismes de dégradation de la diode laser BRS vont être appliqués à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus en vue de l'étude des mécanismes de dégradation des AOSs et présentée dans le paragraphe suivant.

3/ ANALYSE DES VIEILLISSEMENTS ACCELERES DES AOSs

3.1/ Chronologie et description générale de l'étude expérimentale

Ces travaux procèdent d'une démarche générale d'évaluation de la robustesse technologique sur un procédé de fabrication et également d'une démarche adaptée pour la mise en place d'un plan de qualification industriel de l'AOS. Les travaux expérimentaux entrepris sont donc entrepris avec deux objectifs principaux :

- ⇨ l'identification des mécanismes de dégradation des AOSs,
- ⇨ la prévision de la fiabilité de ces composants à partir d'une approche classique et d'une approche de Monte-Carlo.

Cette étude s'est donc déroulée sous la forme de trois étapes successives. En premier lieu, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, certains types de composant dont la technologie est non mature, nécessitent de supprimer, par des essais appropriés, les composants susceptibles de montrer des défaillances de jeunesse. Les tests accélérés de courte durée, qui consistent à éliminer ces composants sont appelés tests de déverminage [6, 25]. Différents types de défauts de jeunesse pour les composants optoélectroniques existent ; on peut citer les défauts liés à la gravure des matériaux (nettoyage de la surface avant reprise d'épitaxie) ou la qualité du report de la puce sur son embase (bulles dans la brasure, oxydation du substrat, délaminations).

La première étape expérimentale a donc été menée dans le but de déterminer les conditions de déverminage à appliquer sur les AOSs et, pour cela, un premier lot d'AOSs (lot 1) a subi des contraintes échelonnées en courant et en température afin de pouvoir dimensionner les limites de contraintes à appliquer lors de tests de vieillissement accéléré. Les essais de contraintes échelonnées (ou « step-stress ») permettent, dans un premier temps, de fixer les conditions minimales et maximales des tests de vieillissement accéléré à effectuer. Une fois ces conditions déterminées, deux types de test peuvent être menés :

- Dans le cas d'un fonctionnement en mode normal, les données nécessaires à l'estimation de la durée de vie sont extraites des composants en fonctionnement opérationnel au moyen d'expertise suite à l'apparition d'une défaillance après des dizaines de milliers d'heures de fonctionnement.
- Dans le cas d'un fonctionnement accéléré, les composants étudiés sont placés dans des conditions de contraintes jusqu'à l'apparition de modes de dégradation spécifiques (mécanismes d'usure). En réalité, seules certaines parties du composant sont soumises à ce vieillissement prématuré et il est donc nécessaire de correctement dimensionner le champ de contraintes (courant, température, cycles thermiques) de façon à activer un vieillissement homogène de la structure en privilégiant :

- Soit une activation des défauts sur le semiconducteur en augmentant la température et/ou le courant.
- Soit une fatigue thermomécanique de l'assemblage liée aux cycles thermiques.

La seconde étape de cette étude expérimentale (lot 2) a été menée avec deux objectifs principaux :

- ☞ le premier est de valider les conditions de déverminage établies lors de l'étude du lot 1,
- ☞ le second est de faire une première estimation, grâce à des conditions de test identiques à celles du déverminage mais pendant une durée plus longue de 2000h, des niveaux de contraintes engendrant les mécanismes de dégradation du AOS par l'observation d'éventuelles dérives des paramètres suivis lors de ce test.

Une troisième et dernière étape, s'appuyant sur les résultats de l'étude du lot 2, permettra l'évaluation des mécanismes de dégradation des AOSs et une première estimation de la durée de vie de ces composants à travers un dernier lot de composant (lot 3).

La description détaillée de ces trois étapes est présentée sous la forme d'un synoptique synthétisant la chronologie de l'étude expérimentale (figure 58). Les caractéristiques des composants testés, les paramètres suivis et les conditions de tests y sont illustrés. Les résultats expérimentaux ainsi que les hypothèses émises quant aux mécanismes de dégradation liés à ces résultats y sont également résumés.

De plus, les résultats expérimentaux de cette étude ont servi de données de base pour l'application du plan de qualification industrielle des AOSs par ALCATEL Optronics. Les premiers résultats de ce plan, mené entre Avril 2003 et Juin 2004 sur 230 composants, sont aussi synthétisés dans ce chapitre.

Enfin, la fiabilité et l'estimation de la durée de vie des AOSs de qualification à partir de la définition d'un critère de défaillance pertinent sont traitées par une approche statistique de tirage Monte-Carlo. Cette approche est notamment appliquée pour la prévision de la distribution de durées de vie de composants n'atteignant pas le critère de défaillance défini, à partir de l'extrapolation de lois analytiques sur les paramètres analysés au cours des vieillissements.

L'ensemble des résultats présentés est relatif à l'étude des dégradations de la puce unitaire AOS. L'évaluation de la fiabilité du report de la puce sur son embase n'a donc pas été analysée à partir d'une approche classique basée sur des cyclages thermiques.

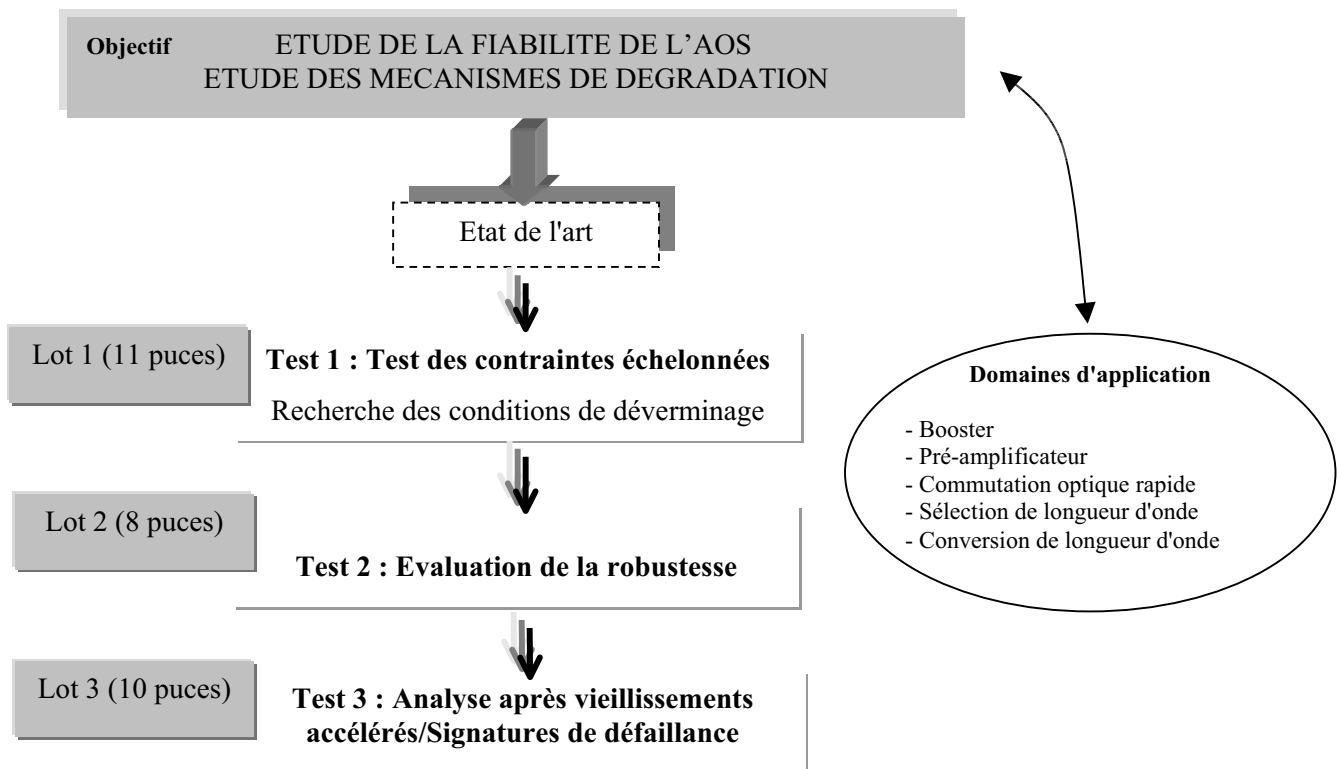


Figure 58 : Chronologie générale de l'étude expérimentale globale effectuée sur la technologie AOS transférée 1,55µm

Dans le chapitre 2, les résultats, concernant la répétabilité et la reproductibilité des bancs de mesures utilisés, et le suivi des dérives éventuelles de mesure ont permis de quantifier la précision des mesures réalisées. **Nous rappelons donc que les dérives des différents paramètres suivis seront donc significatives si elles sont :**

- supérieure à 5% pour la puissance optique relative ou le pseudo courant de seuil relatif,
- supérieure à 1nA pour la caractéristique courant-tension bas-niveau,
- supérieure à 0,5dB pour le gain, la figure de bruit et la puissance de saturation.

Les trois campagnes de tests des travaux de recherche ainsi que le plan de qualification ont été effectuées sur des AOSs dont la structure est rappelée en figure 59.

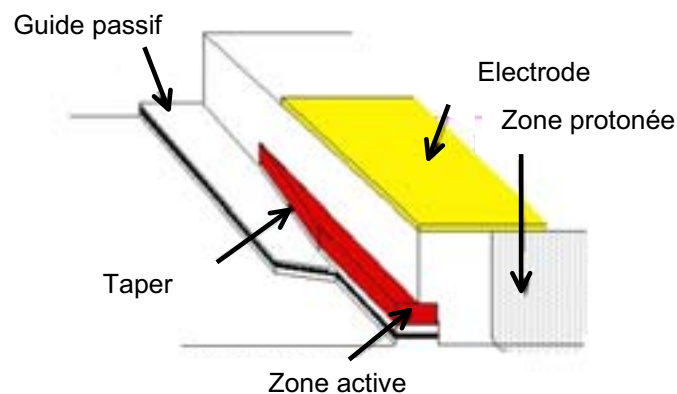


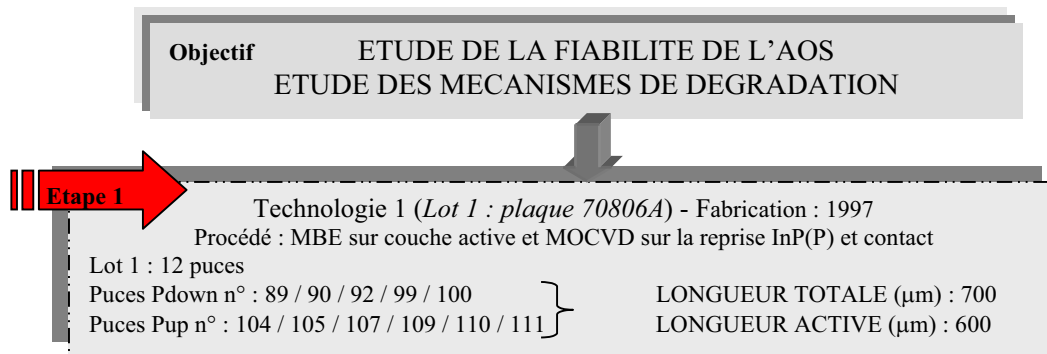
Figure 59 : Structure de l'AOS transféré

Les domaines d'applications des AOSs étant très divers, l'objectif de mission pour l'AOS a été défini, par l'équipe projet, par les conditions d'utilisation maximums de ce composant soit 25°C/200mA.

3.2/ Analyse des résultats expérimentaux

3.2.1/ Détermination des limites de robustesse de la technologie : résultats du lot 1

Les conditions de test du premier lot de composants (lot 1) sont présentées en figure 60 :



Test 1 : Contraintes échelonnées en trois phases

Objectif : Recherche des conditions de déverminage des AOSs en vue de pouvoir éliminer les défauts de jeunesse.

Contraintes échelonnées en courant :

- 1ère phase : T=80°C et I = 100, 120, 140, 160, 180, 200 mA avec le courant croissant toutes les 16h.
- 2ème phase : T=100°C et I = 210, 230, 250, 270 mA avec le courant croissant toutes les 16h.
- 3ème phase, avec deux pas de 168h, T=100°C et I = 270 mA.

Contraintes échelonnées en température :

- 1ère phase : I=150 mA et T = 70, 80, 90, 100, 110, 120°C avec la température croissant toutes les 16h.
- 2ème phase : I=210 mA et T = 70, 90, 110, 120°C avec la température croissant toutes les 16h.
- 3ème phase, avec quatre pas de 16h, I=320 mA et T = 100°C.

Paramètres analysés à 25°C :

- Puissance optique pour un courant variant de 0 à 250mA,
- Caractéristique courant-tension pour une tension variant de 0 à 1,5V.

Bancs de mesure (ALCATEL Optronics):

- banc TP057,
- analyseur de type HP4145 (I(V))

Figure 60 : Détails des contraintes appliquées au lot 1 de la technologie AOS transférée

A/ Choix des paramètres caractéristiques analysés

Les analyses ont été réalisées sur le banc TP057 car le banc TP082 était en cours de développement. Le choix, des paramètres suivis durant ce test de 350h, a été effectué en fonction des hypothèses émises lors de la synthèse de l'étude bibliographique que nous rappelons ici. Le suivi de la puissance optique et de la caractéristique courant-tension a permis une étude des mécanismes de dégradation des diodes laser BRS [41], composant proche du AOS ; ces mêmes paramètres seront donc suivis pour les composants du lot 1. De plus, les conditions normales d'utilisation du AOS étant

fixées à 25°C/200mA, la puissance optique à 200mA est donc un paramètre caractéristique du AOS suivi continuellement au cours de cette étude expérimentale.

B/ Conditions de test

Afin de déterminer les conditions de test de déverminage des AOSs avec précision, les premières contraintes de test ont été appliquées, sur 11 puces, sous la forme de deux séries de contraintes échelonnées, une en courant et l'autre en température :

- ⇒ la gamme de température choisie, pour ces contraintes échelonnées, varie de 80°C à 100°C car celle-ci est couramment appliquée lors d'études expérimentales pour les puces reportées sur embase AIN.
- ⇒ la gamme de courant appliquée varie de 100mA (15kA/cm²) à 320mA (60kA/cm²), valeur maximale de courant appliqué.

En effet, cette dernière valeur de courant correspond au courant limite au-delà duquel le phénomène de self-pulsing a été déclenché lors des tests du plan de qualification d'ALCATEL Optronics sur les diodes laser BRS de longueur active identique à celles des AOSs.

De plus, il est à noter que les conditions de déverminage d'une diode laser BRS, exposées également dans la synthèse bibliographique du plan de qualification de ce composant correspondent à : 40kA/cm² et 100°C durant 72h, ramenée à 36h par ALCATEL en cours de qualification. Ces conditions ont donc constitué un élément de référence pour l'évaluation des conditions de déverminage des AOSs.

C/ Résultats et analyse

Avant de présenter les résultats de ce test, la distribution initiale de la puissance optique à 200mA ($P_{opt@200mA}$) est reportée en figure 61, afin de s'assurer de la stabilité du procédé technologique de l'AOS. La figure 61 permet de mettre en évidence une relative stabilité technologique pour ce paramètre puisque le coefficient de dispersion de la loi de distribution normale permettant le meilleur lissage, est inférieur à 1,3.

Les résultats de la campagne de contraintes échelonnées sont donnés sous la forme de deux graphes présentant :

- l'évolution relative de la puissance optique mesurée à un courant de 200mA ($P_{opt@200mA}$), à 25°C, en figure 62,
- l'évolution de leur caractéristique I(V) mesurée à température ambiante en figure 63.

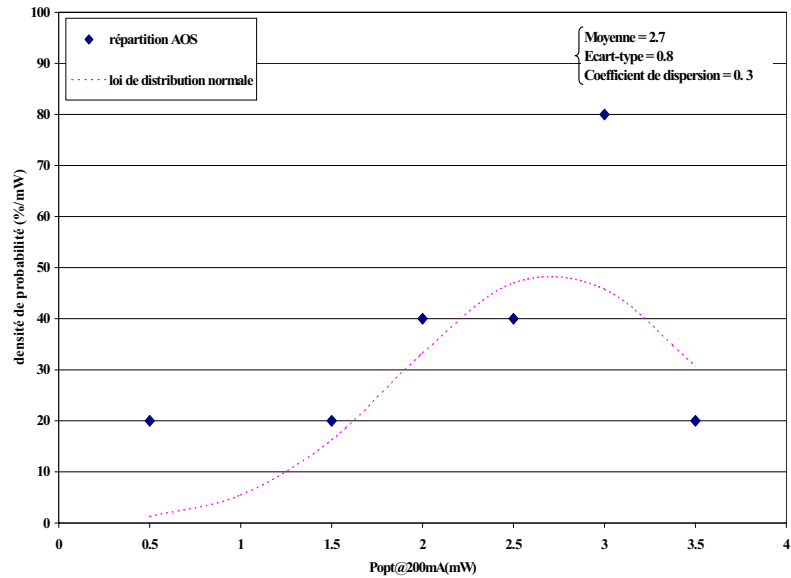


Figure 61 : Distribution initiale de la puissance optique à 200mA

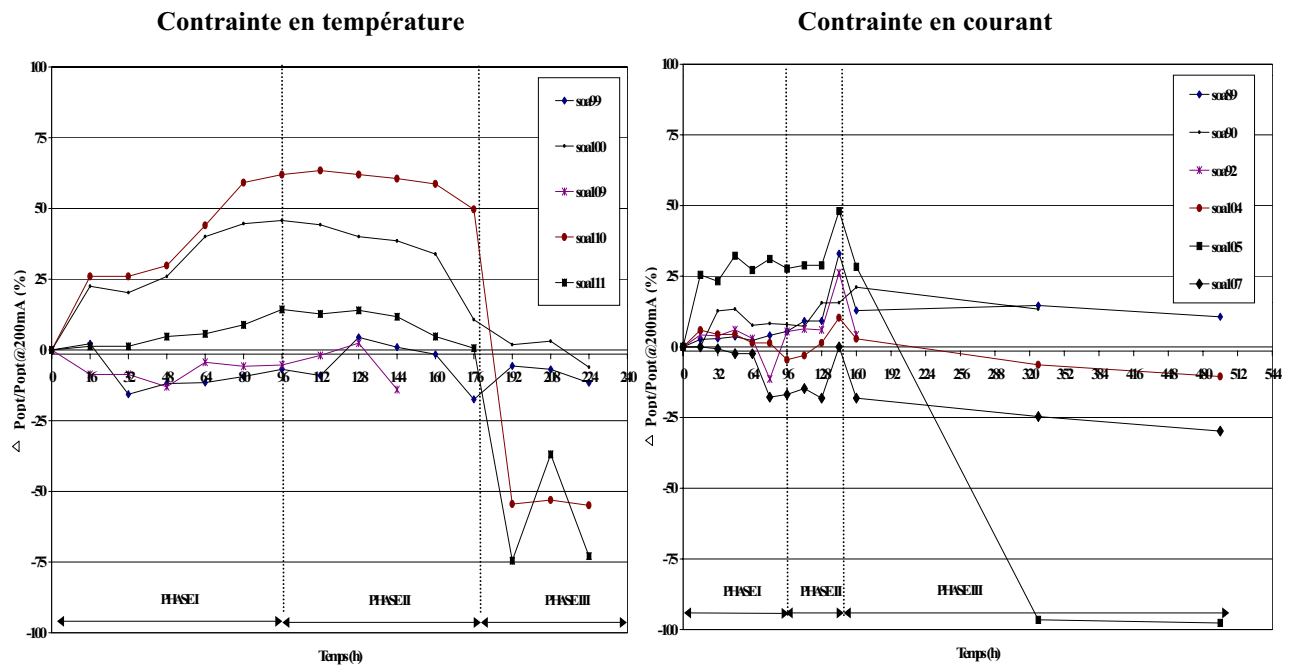


Figure 62: Variation relative de la puissance optique à 200mA mesurée à 25°C

La figure 62 montre l'impact des trois phases successives de contraintes échelonnées marquées par deux phases montrant une stabilité relative de $P_{opt}@200mA$ et une troisième phase correspondant à une usure prématurée de certains composants. Les fortes dérives négatives de $P_{opt}@200mA$ sont observées lorsque la contrainte en courant est élevée (phase 3) pour les deux tests effectués. Il semble donc que les mécanismes d'usure des AOSs soient préférentiellement activés avec le courant. Ce résultat est en accord avec la stratégie des conditions de déverminage mise au point sur les diodes laser BRS démontrant l'impact de la densité de courant notamment sur la valeur du courant de seuil pour

différentes valeurs de la largeur du ruban. De plus, les premiers essais de stockage (100°C/72h), effectués en étude préliminaire par ALCATEL R&I, n'ont occasionné aucune dégradation significative justifiant donc l'hypothèse suivant laquelle les mécanismes d'usure des AOSs soient préférentiellement activés avec le courant.

- Phases I et II : *Mise en évidence d'une phase de stabilisation technologique*

Les dérives observées de la puissance optique à 200mA pour tous les composants, pendant la première et la seconde phase des deux contraintes échelonnées, sont, aux incertitudes de mesure près, positives. Ces deux premières phases correspondent alors à une phase de stabilisation technologique pour les AOSs.

En effet, ces dérives observées ont déjà été rencontrées lors de premiers essais de qualification, par ALCATEL Optronics, sur des composants de type laser BRS. Elles ont été également constatées sur les LEDs (InP) par M. Fukuda [40]. Ces dérives positives sont généralement associées à une stabilisation du procédé technologique.

Les origines de cette stabilisation sont multiples ; citons l'uniformisation de la répartition des dopants dans les différentes couches matériaux du composant ou le recuit de défauts d'une couche matériau de la structure AOS entraînant une diminution des recombinaisons non radiatives ou/et la diminution du coefficient d'absorption de la cavité laser [86]. En effet, ces deux phénomènes peuvent être à l'origine de dérives positives des paramètres électro-optiques des composants optoélectroniques durant le déverminage mais aucune étude n'a réellement montré que ces deux phénomènes sont corrélés.

- Phase III : *Extraction d'indicateurs de défaillance*

Lors de la troisième phase où les contraintes appliquées sont plus sévères, on observe :

- pour la contrainte sévère en courant (320mA/100°C), 50% des composants ont perdu 67% de leur puissance optique à 200 mA au bout de 16h,
- pour la contrainte en température (270mA/100°C), 25% des composants ont perdu 96% de leur puissance optique à 200 mA au bout de 168h.

En conclusion, les résultats de cette troisième phase montrent que 50% des composants sont défaillants, en considérant les conditions : 320mA durant 16h et le critère de défaillance défini par 20% de perte de puissance optique (critère de défaillance usuel défini pour les diodes laser BRS).

- ✓ Cette phase de test met en lumière la criticité de la contrainte en courant appliquée. Ces défaillances soudaines n'apparaissant que dans le cas de courant maximum limite, leur étude n'a pas d'intérêt pour l'estimation de la fiabilité de ces composants. Ces conditions de test (320mA, 100°C) définissent donc les marges de robustesse des AOSs et ces limites ne seront pas appliquées par la suite.

- ✓ En considérant le même critère de défaillance, les résultats du test de la contrainte en température montrent la défaillance de 25% des composants, sous les conditions : 270mA/100°C et à 168h. Ceci délimite alors le niveau maximum de contrainte de courant à appliquer pour un test de déverminage.
- ✓ Après 100h de test, en début de phase III, sous les conditions 270mA/100°C, on constate une dérive négative significative de la puissance optique à 200mA pour 2 composants et la stabilité de ce paramètre pour 3 composants. Ces observations correspondent, en tout point, à la définition du déverminage qui consiste à trier les "bons" des "mauvais" composants. Notamment, lors de ce test, les composants 105 et 107 sont rejetés pour avoir perdu au minimum 20% de leur puissance optique après un test de déverminage sous ces conditions. Les derniers résultats ont permis de définir les conditions de déverminage des AOSs à un test de 270mA/100°C pendant 100h.
- ✓ La distribution paramétrique P@200mA avant et après vieillissement est présentée en figure 63 afin de constater l'évolution de cette distribution.

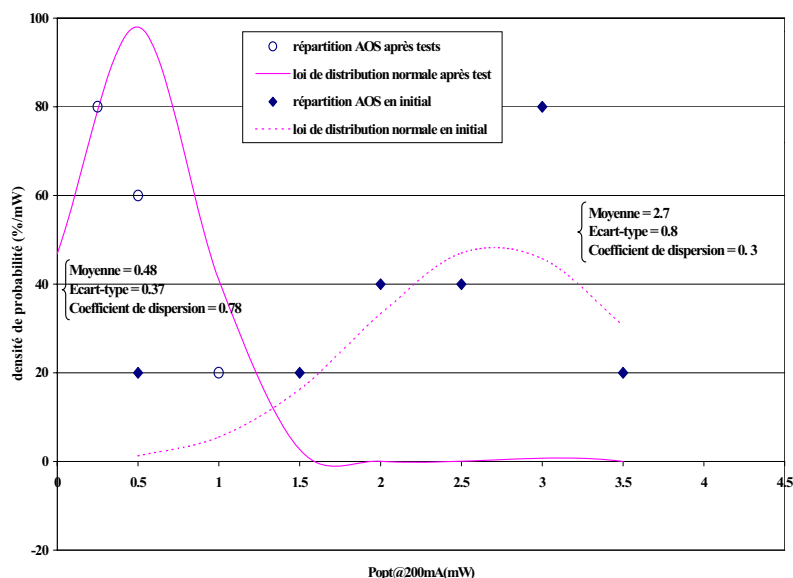


Figure 63 : Evolution de la distribution de la puissance optique à 200mA (initiale et finale) du lot 1

La figure 63 met en évidence la diminution homogène de la puissance optique à 200mA pour l'ensemble des composants du lot 1 (diminution de 80% de la moyenne). De plus, la diminution de l'écart-type, de 53% corrobore les effets de stabilisation de la technologie (amélioration des performances sur une courte durée) mais confirme le constat d'une sous-maturité technologique. En effet, pour des technologies stables, l'écart-type des distributions paramétriques augmente avec la durée ou l'amplitude du vieillissement montrant ainsi que les mécanismes de dégradation sont propres au composant et indépendant de la technologie. Dans le cas des AOSs du lot 1, la tendance inverse est observée, la technologie AOS semble donc être peu stable.

Afin de compléter l'analyse du comportement des AOSs sous contraintes échelonnées, l'évolution des caractéristiques I(V) des différents composants du lot 1 a été suivie. L'étude des résultats de ce suivi a donné lieu à une classification des signatures de défaillance selon trois modes spécifiques. Cette classification est présentée, ci dessous, en figure 64.

On constate une évolution des caractéristiques I(V), après les tests accélérés sous contraintes échelonnées des composants du lot 1, pouvant être associée aux résultats exposés dans l'étude bibliographique sur les mécanismes de dégradation des diodes laser BRS. En effet, certaines similitudes de comportement peuvent être établies entre l'évolution des caractéristiques I(V) pour les AOSs du lot 1 et celles des diodes lasers BRS.

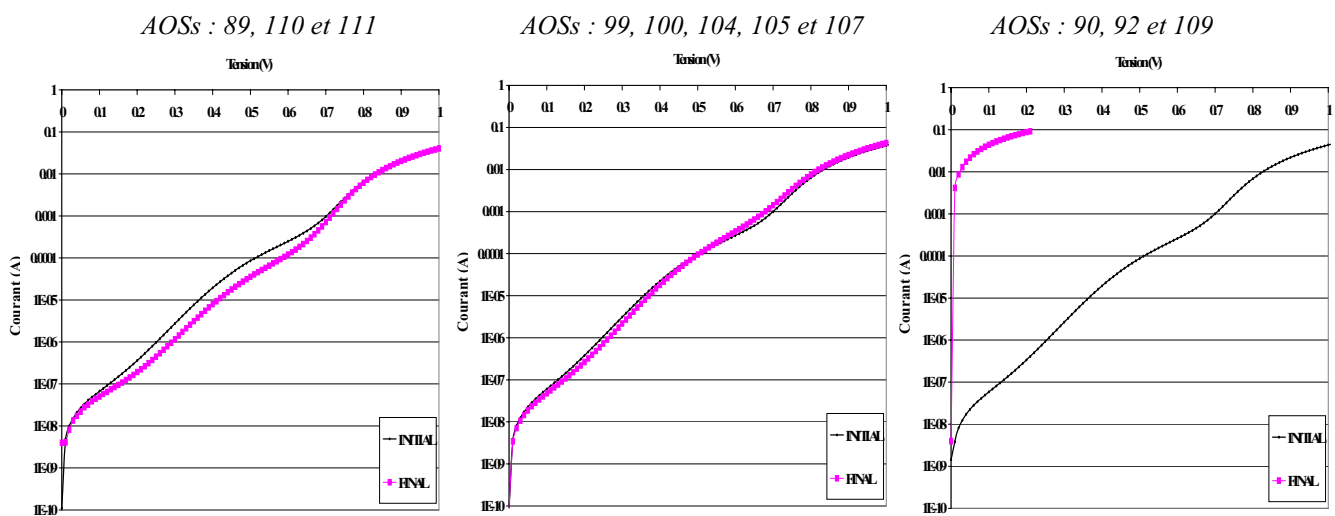


Figure 64 : Evolution des caractéristiques I(V), mesurées à 25°C, des composants du lot 1 (initial et final : phases 1, 2 et 3)

En appliquant cette méthode d'étude à un AOS, et en considérant en première approximation, que le schéma électrique équivalent d'un AOS est identique à celui de la diode laser BRS, il est alors possible d'émettre des hypothèses quant aux dégradations des AOSs du lot 1. Le circuit électrique équivalent d'un AOS est présenté en figure 65 [36, 62, 63].

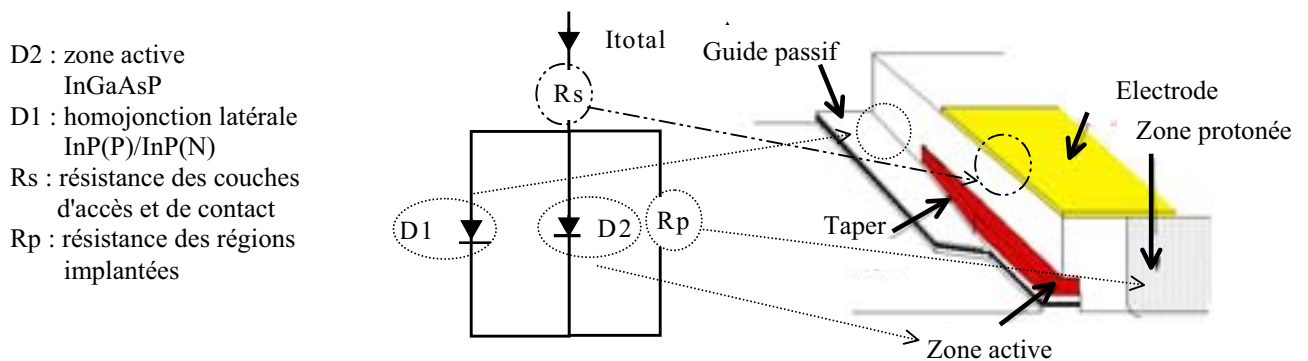


Figure 65 : Schéma électrique équivalent en régime statique d'un AOS

Le tableau 12, ci-dessous, synthétise l'ensemble des hypothèses émises quant aux mécanismes d'accélération de défauts observés sur le lot 1.

N°AOS	Tension de localisation du dédoublement I(V) <i>Figure 51</i>	Evolution de la caractéristique I(V) <i>Figure 51</i>	Conditions de test lors du dédoublement <i>Figure 62</i>	Hypothèses émises sur les dégradations <i>Figure 62</i>
89 110 111	0,2V<0,6V	Diminution faible du courant	- 1 pas de 16 h : $I=210\text{ mA}$ et $T = 120^{\circ}\text{C}$ ou $I = 270\text{ mA}$ et $T=100^{\circ}\text{C}$	Diminution du courant due à la stabilisation technologique des phases I et II
99 100 104	0,6V<0,8V	Augmentation faible du courant	- 1 pas de 16 h : $I=320\text{ mA}$ et $T = 100^{\circ}\text{C}$ ou $I = 270\text{ mA}$ et $T=100^{\circ}\text{C}$	Dégradation de D2 (zone active)
90 92 109	Court-circuit	Caractéristique d'une résistance et non plus d'une diode	- 1 pas de 168h : $I = 270\text{ mA}$ et $T=100^{\circ}\text{C}$	Dégradation catastrophique à caractère soudain

Tableau 12 : Synthèse et hypothèses de diagnostic de défaillance sur le lot 1

Les évolutions de la puissance optique et de la caractéristique I(V) ne sont pas mises en relation car aucune corrélation entre ces deux paramètres n'a pu être établie. Ces hypothèses constituent une première analyse qui s'enrichira au fur et à mesure de notre étude expérimentale.

En conclusion, ce premier test a permis :

- l'établissement des contraintes de déverminage de l'AOSs : 100°C, 270mA durant 100h,
- l'estimation du courant maximum (320mA) donnant lieu à des dégradations catastrophiques d'un AOS, établissant les limites de robustesse de la technologie : 320mA et 100°C,
- d'émettre des hypothèses quant aux facteurs d'aggravation des dégradations observées sur les caractéristiques I(V) des AOSs de ce premier lot,
- on constate qu'il n'existe pas de corrélation entre les composants en court-circuit et la distribution initiale de leur paramètre $P_{opt}@200\text{mA}$, de même pour les composants dégradés et la distribution initiale de leur paramètre $P_{opt}@200\text{mA}$. Ce constat souligne la difficulté accrue de notre étude car le paramètre $P@200\text{mA}$ ne constitue pas, à lui seul, un indicateur précoce de défaillance.

3.2.2/ Détermination des conditions optimales de déverminage : résultats du lot 2

A/ Choix des paramètres caractéristiques analysés

La seconde campagne de test a été menée en collaboration avec ALCATEL R&I à partir du banc de mesure GRC. Il a été alors possible, pour cette campagne de test, de suivre l'ensemble des paramètres cités ci-dessus (figure 66). Le choix de ces paramètres, suivis au cours de cette seconde campagne de test sur 8 puces durant 2000h, répond à plusieurs critères :

- ☞ la puissance optique et la caractéristique courant-tension sont suivies comme pour le lot 1,
- ☞ l'évolution de la figure de bruit et de puissance de saturation constituera de nouveaux résultats à analyser pour l'étude des mécanismes de dégradation du AOS.

B/ Conditions de test

Le synoptique des conditions de test du second lot de composants est présenté en figure 66.

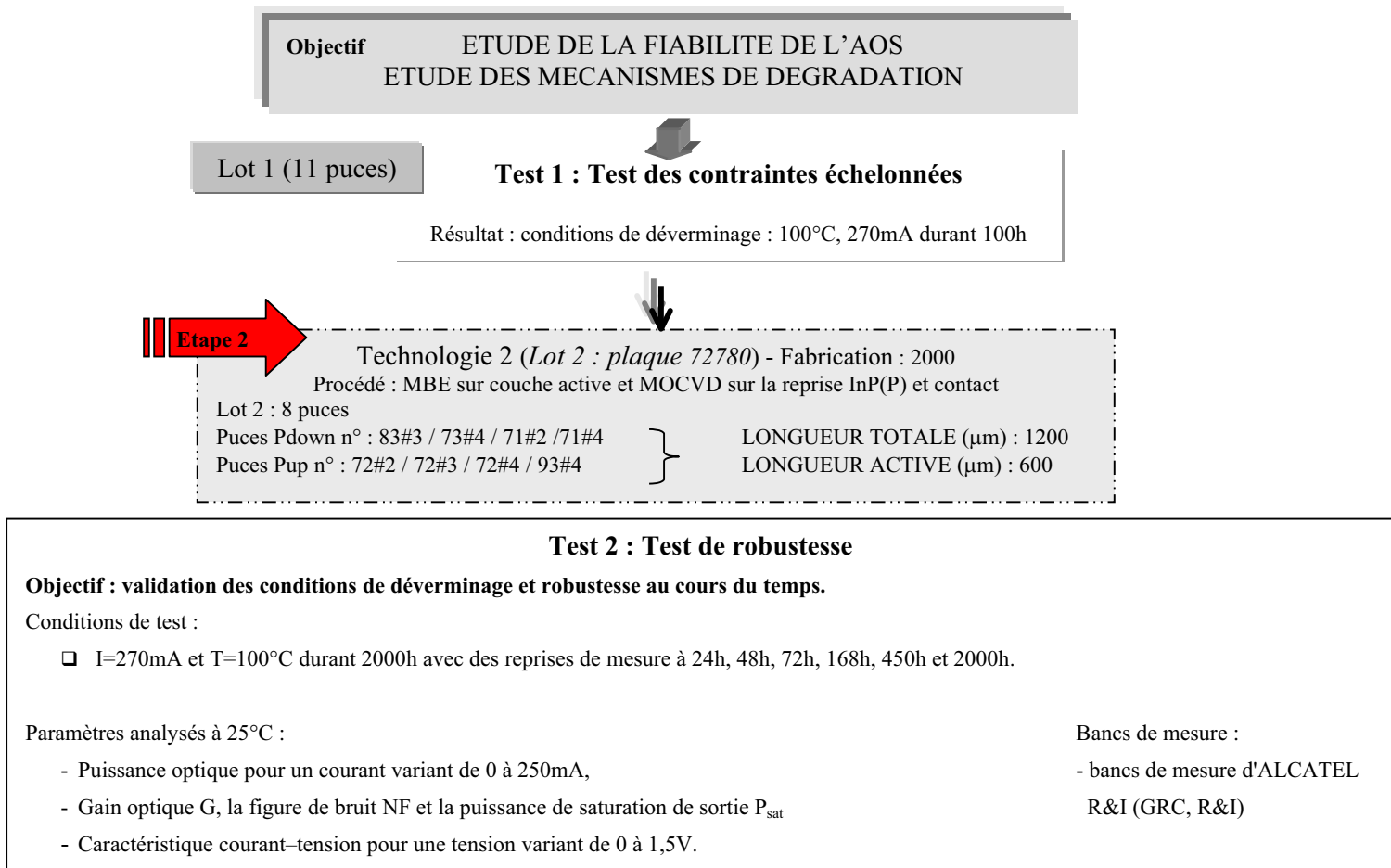


Figure 66 : Détails des contraintes appliquées au lot 2 de la technologie AOS transférée

C/ Résultats et analyse

Les résultats expérimentaux sont présentés sous la forme d'une synthèse générale en tableau 14. Les relations liant les différentes évolutions des paramètres suivis seront, quant à elles, présentées sous la forme de graphes (figure 67) dans le paragraphe D/. Le suivi de la puissance optique étant caractérisé, comme nous l'avons vu précédemment, par le paramètre $P_{opt@200mA}$, seule l'évolution de ce dernier est analysée et de façon à obtenir des résultats homogènes, il en sera de même pour le gain optique (G) et la figure de bruit (NF).

Trois modes de défaillance ont pu être mis en évidence :

- Lent par une diminution faible du rendement par rapport à la durée du test effectué, par exemple, la dérive observée étant inférieure à 5% pour une durée de 128h.
- Graduel lorsqu'une diminution du rendement est significative par rapport à la durée du test effectué, par exemple, la dérive observée étant comprise entre 5% et 15% pour une durée de 128h.
- Catastrophique par la mise en court-circuit du composant testé.

Le tableau 13 permet de constater que les composants du lot 2 ont un comportement relativement similaire à celui des composants du lot 1, observé lors du test de contraintes échelonnées.

Déverminage (0-100h)		Vérification des contraintes de déverminage des composants AOSs : 100°C, 270mA durant 100h			
Vieillessement (0-2000h)	<i>Popt@200mA</i> [8 puces suivies]	<i>I(V)</i> [8 puces suivies]	<i>G@200mA et NF@200mA</i> [4 puces suivies]	<i>Psat=f(I)</i> [4 puces suivies]	<i>Phases de vieillissement</i>
	6 Puces (83#3/71#2/71#4/ 72#2/72#3/72#4) Diminution < à 2mW	6 Puces (83#3/71#2/71#4/ 72#2/72#3/72#4) Faible diminution du courant entre 0,1V à 0,3V	2 Puces (71#2/72#4) Diminution de G et de NF = à 1,5dB	2 Puces (71#2/72#4) Diminution = à 1,5dBm	Variations Faibles et non significatives
	1 Puce (73#4) Diminution > à 2mW	1 Puce (73#4) Forte augmentation du courant entre 0,3V à 0,9V I(V) dédoublé	1 Puce (73#4) Diminution de G et de NF = à 2,5dB	1 Puce (73#4) Diminution = à 2,5 dBm	Vieillessement par défaillance graduelle
1 Puce (93#4) En court-circuit après 450h	1 Puce (93#4) Caractéristique d'une résistance et non plus d'une diode		-----	Dégradation catastrophique par défaillance rapide et soudaine	

Tableau 13 : Evolution des caractéristiques suivies des composants du lot 2 mesurées à 25°C

Comme pour le lot 1, l'analyse des caractéristiques I(V) des composants du lot 1, peuvent être associée aux résultats exposés dans l'étude bibliographique sur les mécanismes de dégradation des diodes laser BRS. En effet, certaines similitudes de comportement peuvent être établies entre l'évolution des caractéristiques I(V) pour les AOSs du lot 2 et celles des diodes lasers BRS. En considérant en première approximation, que le schéma électrique équivalent d'un AOS est identique à celui de la diode laser BRS, il est alors également possible d'émettre des hypothèses quant aux facteurs d'accélération de défauts des AOSs du lot 2 :

- Pour le composant ayant un mode de dérive graduelle, l'hypothèse d'une dégradation de la couche active (dédoublément I(V) entre 0,3V et 0,9V) est retenue. La préparation de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P) pour la diode laser BRS (gravure chimique à base de HBr+H₂O₂ puis de H₂SO₄) n'est pas identique à celle de l'AOS (gravure chimique à base de H₂SO₄). Néanmoins, ces étapes de procédé de fabrication sont critiques, pour la qualité des interfaces InP(N)/InP(P) et InGaAsP/InP(P) de la diode laser BRS et de l'AOS. Ces gravures peuvent générer des défauts cristallins aux interfaces. Ces défauts donnent lieu à une augmentation des centres recombinants non radiatifs proches de la zone active entraînant une diminution de la durée de vie des porteurs dans cette zone.
- Pour le composant ayant subi une forte dérive avec un mode de défaillance rapide et soudain, les causes probables de cette dégradation sont des problèmes liés au montage des puces. En effet, Juan Jiménez [95] montre que le mode de dégradation rapide et soudain des diodes laser peut être

lié à l'endommagement de leurs miroirs. Rappelons aussi que suite aux manipulations subit par les AOSs du lot 1, les miroirs de certains composants ont pu être dégradés, comme nous le verrons dans le chapitre 4.

- Pour les composants ayant un mode de dégradation lent (dédoublément I(V) entre 0,1V et 0,3V), il paraît prématuré d'émettre des hypothèses quant aux dégradations de ces composants, les dérives observées étant trop faibles et voisines de la précision des mesures.

De plus, dans les premières 22h de test, une augmentation de 15% en moyenne de la puissance optique à 200mA, a été constatée pour tous les composants. Comme pour le lot 1, cette évolution de la puissance optique à 200mA a été attribuée à une phase de stabilisation technologique. Enfin, lorsqu'un dédoublement de la caractéristique I(V) est constaté, une diminution de la puissance optique est observée. Néanmoins, il n'a pas pu être mis en évidence une relation stricte entre ces deux paramètres.

D/ Relation entre les variations du gain et de la puissance optique

Le second objectif du lot 2 est la mise en évidence d'une relation de proportionnalité entre les paramètres suivis de l'AOS pour permettre d'en diminuer le nombre lors des études expérimentales. La figure 67 présente la variation du gain optique en fonction de celle de la puissance optique à 200mA pour deux composants du lot 2. En effet, à 200 mA, on est dans une phase de saturation du gain par l'émission spontanée et le gain est alors directement relié à la puissance de l'ASE.

Au-dessus du "seuil" ASE, les niveaux de Fermi sont fixés et le gain devient linéaire avec le courant d'alimentation :

$$P_{ASE} = G_{ff} \cdot A / C_{in}$$

De plus, à ce courant, on constate que P_{ASE} dépend du couplage par C_{in} .

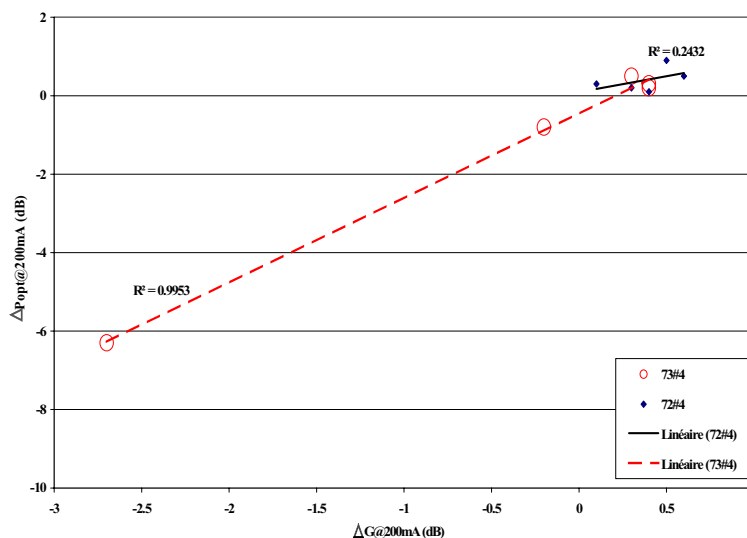


Figure 67 : Variation de la puissance optique à 200 mA en fonction de la variation du gain

La mesure du gain est délicate à cause de la difficulté de la reproductibilité du couplage (coefficient de couplage C_{in}) entre la puce et la fibre optique (cf. chapitre 2). L'existence d'une relation de proportionnalité entre l'évolution du gain et de la puissance optique permettrait de simplifier la mise en œuvre des études expérimentales : l'évolution du gain d'un AOS, paramètre qui permet la caractérisation physique du composant, au cours du vieillissement, pourrait être suivie uniquement grâce à la mesure de la caractéristique P(I). La figure 67 permet de constater que :

- Pour le composant 73#4, une relation linéaire liant l'évolution du gain à celle de la puissance optique existe. En effet, une variation de 1dB de gain mesuré à 200mA correspond une variation de 2dB de puissance optique mesurée à 200mA pour ce composant.
- Néanmoins, le composant 72#4 apparaît comme un contre-exemple de cette hypothèse : pas de loi linéaire entre l'évolution des deux paramètres suivis. La relation linéaire définie ci-dessus, aux incertitudes de mesure près, ne semble pas valable. Cependant, les variations observées pour les deux paramètres suivis étant inférieures à 2dB (proches des incertitudes de mesures du banc GRC), ce cas particulier ne suffit pas à rejeter l'existence d'une relation de proportionnalité liant l'évolution du gain à celle de la puissance optique.

De plus, lors des premiers essais de robustesse réalisés sur l'AOS d'ALCATEL R&I, la relation entre les évolutions du gain et de la puissance optique, paramètres mesurés à 25°C et 200mA, avait été mise en lumière [42, 43, 50]. Ces premiers résultats ont montré qu'une perte de 1dB de gain correspond à 1dB de perte de puissance optique pour l'AOS quel que soit le courant de mesure et pour une température de mesure proche de 25°C. Ces résultats sont en accord avec les résultats publiés par NTT qui a également procédé à deux études expérimentales sur un composant AOS de structure quasiment identique à celle de l'AOS d'ALCATEL R&I [51, 53].

L'ensemble de ces résultats ainsi que les atypismes mis en évidence nécessitent donc une étude complémentaire afin de valider (ou non) l'hypothèse faite quant à la relation linéaire liant le gain à la puissance optique des AOSs. Le gain et la puissance optique seront donc suivis lors du prochain test expérimental. Ce test permet donc de démontrer que les mesures des paramètres, puissance optique et gain optique, sont pertinentes pour la précision du suivi de l'évolution des composants au cours du vieillissement.

La relation liant l'évolution du gain à celle de la puissance de saturation en sortie est également analysée. Le tableau 13 nous permet de constater que la variation de 1dB du gain d'un AOS correspond à la variation de 1dB de la puissance de saturation de sortie de ce même composant. La puissance de saturation en sortie du composant est donc un paramètre complémentaire à suivre car ce paramètre suit la même évolution que le gain.

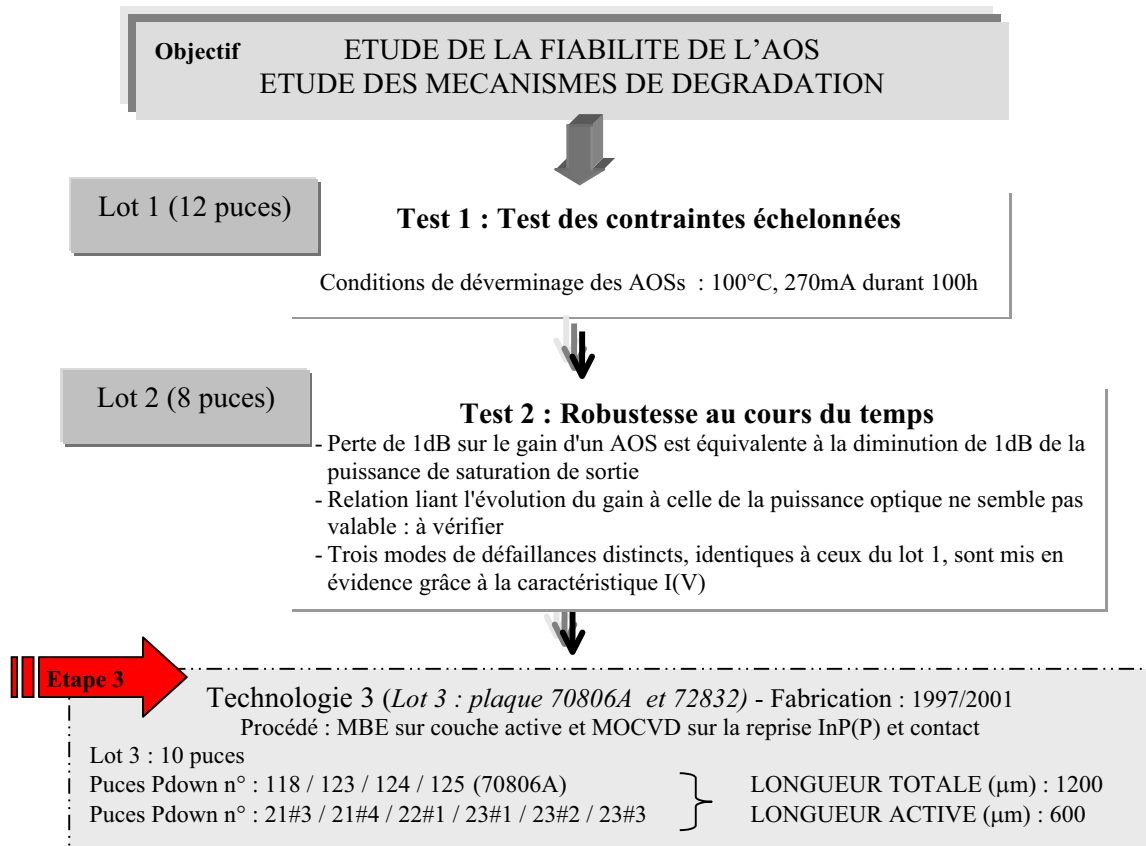
Après ces deux campagnes de tests, une dernière campagne est menée avec un objectif principal : l'étude des mécanismes de dégradation des AOSs. En effet, les conditions de déverminage

optimales et les constats d'évolution des paramètres suivis tels que le gain optique ou la figure de bruit établis du lot 1 et du lot 2, l'étude du lot 3 permettra alors d'envisager l'étude des mécanismes de dégradation des AOSs ainsi que l'étude de la fiabilité de ceux-ci.

3.2.3/ Tests de vieillissement accéléré : résultats du lot 3

A/ Conditions de test

Le synoptique des conditions de test du second lot (lot 2) est présenté en figure 68 :



Test 3 : Analyse après vieillissements accélérés

Objectif : étudier les mécanismes de dégradations des AOSs, étudier la fiabilité et estimer la durée de vie de ces composants, déterminer la pertinence du choix des paramètres à suivre pour les tests de qualification d'AOS

Conditions de test :

- I=270mA et T=100°C durant 1500h avec des reprises de mesure de 168h,
- I=270mA et T=80°C durant 1500h avec des reprises de mesure de 168h.

Paramètres analysés à 25°C :

- Puissance optique pour un courant variant de 0 à 250mA,
- Courant de seuil à 0.6mW, I@0.6mW,
- Gain optique G, la figure de bruit NF et la puissance de saturation de sortie P_{sat}
(pour la moitié des puces du lot 3 : 21#3, 23#2, 118 et 125)
- Caractéristique courant-tension pour une tension variant de 0 à 1,5V.

Bancs de mesure (ALCATEL Optronics) :

- banc TP082
- banc TP057
- analyseur de type HP4145

Figure 68 : Détails des contraintes appliquées au lot 3 de la technologie AOS transférée

B/ Choix des paramètres caractéristiques analysés

La mise en place du banc TP082 de mesures dynamiques et statiques dédié aux AOSs, du banc TP057 et du système d'acquisition basé sur un analyseur de type HP4145, a permis de réaliser cette campagne de vieillissements accélérés. Celle-ci a donc été menée chez ALCATEL Optronics afin d'effectuer une analyse complète des différents paramètres électro-optiques des AOSs. Le choix des paramètres suivis durant 1500h se focalise sur :

- ☞ La puissance optique et la caractéristique courant-tension sont analysées car elles ont été préalablement suivies lors de l'étude du lot 1 et 2.
- ☞ Le pseudo-courant de seuil à 0,6mW (défini dans le chapitre 2) sera également suivi afin d'établir une relation, si cela est possible, entre l'évolution de la puissance optique et celle de la caractéristique I(V).
- ☞ Ceci dans l'objectif de déterminer la pertinence du choix des paramètres à suivre pour les tests de qualification d'AOS effectués par ALCATEL Optronics prévus à la suite de ces travaux de thèse.
- ☞ L'extraction d'une possible relation entre le gain et la figure de bruit permettant de relier (ou non) leurs évolutions à celles des paramètres électriques en fonction du temps de vieillissement.

Les conditions de test appliquées sont choisies en fonction des objectifs du lot 3. En effet, après l'étude des deux lots précédents, les conditions de test maximum ont été fixées à : 270mA/100°C.

C/ Résultats et analyse

Avant de présenter les résultats de ces tests, la distribution initiale (figure 69) de la puissance optique à 200mA ($P_{opt}@200mA$) a été étudiée afin de s'assurer de la stabilité du procédé technologique des AOSs.

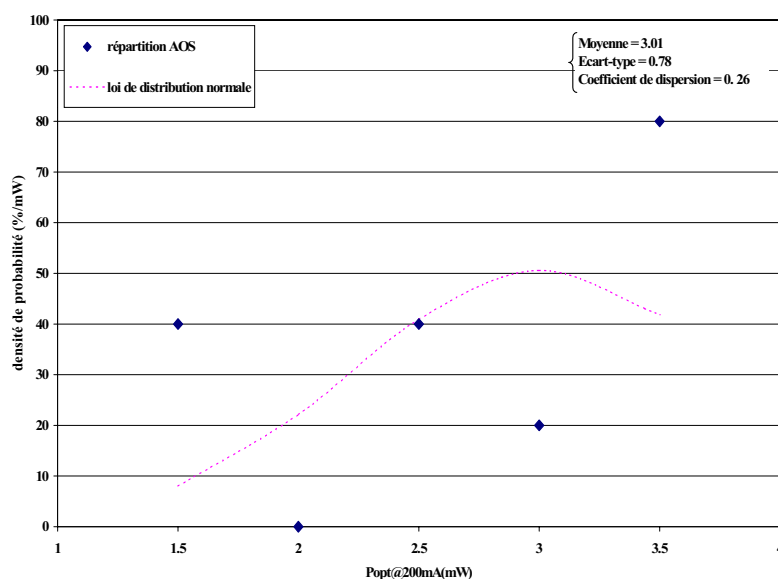


Figure 69 : Distribution initiale de la puissance optique à 200mA

La figure 69 nous permet de constater que le coefficient de dispersion de la loi de distribution normale est aussi inférieur à 1,3 de manière identique au lot 2. Néanmoins, on peut souligner que la distribution de la puissance optique à 200mA est difficile à lisser par une Gaussienne, soulignant peut être un manque de maturité de la technologie. De plus, la distribution du pseudo-courant de seuil initiale (figure 70) est également difficile à lisser par une Gaussienne car la valeur de ce paramètre résulte d'une extraction à partir de la caractéristique de la puissance optique P(I) et donc soumis à de fortes dispersions.

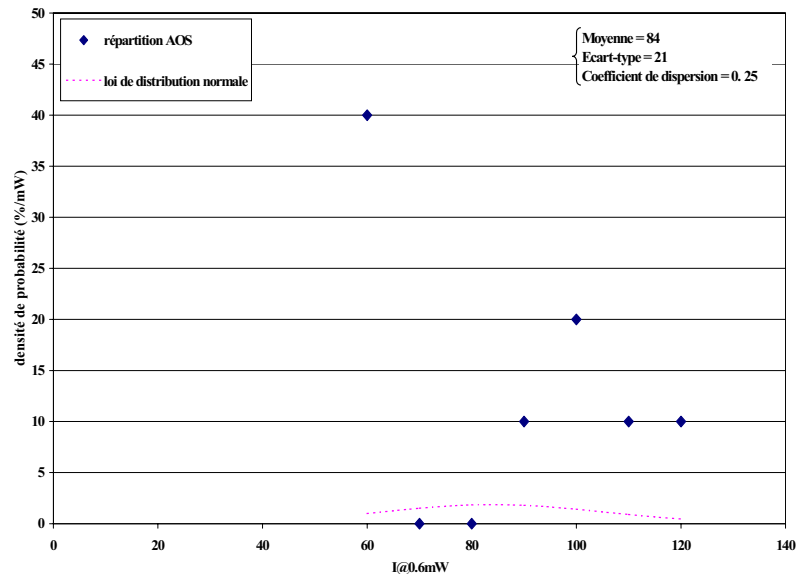


Figure 70 : Distribution initiale du pseudo-courant de seuil mesuré à 0,6mW

- Phase de déverminage : *Etablissement des conditions définitives*

Un test de déverminage, sous les conditions 270mA, 100°C et 100h, a été préalablement mené sur les 9 puces du lot 3. Quatre résultats expérimentaux importants sont synthétisés, sans montrer de graphe car aucun élément nouveau n'est apparu durant cette phase de déverminage :

- ✓ Le niveau de contraintes : 50kA/cm² ou 270mA, 100°C et 66h est suffisant pour déverminer les composants. En effet, on observe, après 66h de déverminage, qu'une stabilisation du pseudo courant de seuil à 0,6mW et de la puissance optique à 200mA est atteinte. Après 88h, d'autres variations apparaissent et peuvent éventuellement refléter l'enclenchement de mécanismes d'usure spécifiques.
- ✓ On remarque que les composants de la plaque 72832 ont un comportement déjà identifié lors des deux campagnes de déverminage et de vieillissement menées sur le lot 1 et 2. En effet, on constate, de nouveau, la présence d'une phase de stabilisation technologique (augmentation de la puissance optique et une diminution du courant à 0,6mW). Ces composants subissent dans les

premières 22h, une augmentation de 15% en moyenne de $P_{opt}@200mA$ et une diminution du pseudo courant de seuil de 12%.

- ✓ Les composants de la plaque 70806 ont un comportement opposé à ceux de la plaque 72832, puisqu'une diminution de la puissance optique et une augmentation du courant à 0,6mW sont remarquées. D'après les éléments bibliographiques, on peut assimiler cette évolution des paramètres à un début de vieillissement et donc à un déclenchement de mécanisme d'usure prématurée.

=>Les différences importantes de comportement constatées sur les deux plaques sous test sont essentielles à analyser pour déterminer dans quelle mesure celles-ci ont de l'influence sur les mécanismes de dégradation des puces. Ces différences seront étudiées et détaillées à la suite des résultats sur le test de vieillissement mené sur ce lot de composants.

- ✓ L'analyse de deux composants (124 et 118 de la plaque 70806A) ont souligné un comportement atypique durant 22h : la puissance optique et le pseudo courant de seuil augmentent de 10%, ces paramètres sont généralement affectés par des variations contraires. Cette évolution est à suivre au cours du vieillissement afin de déterminer si celle-ci est atypique ou, si au contraire, elle peut donner lieu à des dégradations soudaines. L'analyse de ce phénomène se fera donc en fin de paragraphe.

- Phase de vieillissement : *Hypothèses de dégradation*

Après la phase de déverminage des composants du lot 3, les conditions du test de vieillissement appliquées sont : 270mA/80°C et 270mA/100°C. Pour les puces 118, 125, 21#3 et 23#2, le suivi, du gain et de la figure de bruit, sont effectuées sur le banc TP082. Néanmoins, le banc TP082 n'étant pas tout à fait dans sa configuration définitive, une puce de référence (23#3) a été choisie parmi les 9 composants afin de prendre en compte l'évolution du banc dans les prochaines mesures de puces du lot 3.

Le tableau 14 présente la variation relative de la puissance optique à 200mA ($P_{opt}@200mA$) et celle du pseudo courant de seuil à 0,6mW ($I_{th}@0,6mW$) en fonction du temps de vieillissement pour les deux essais.

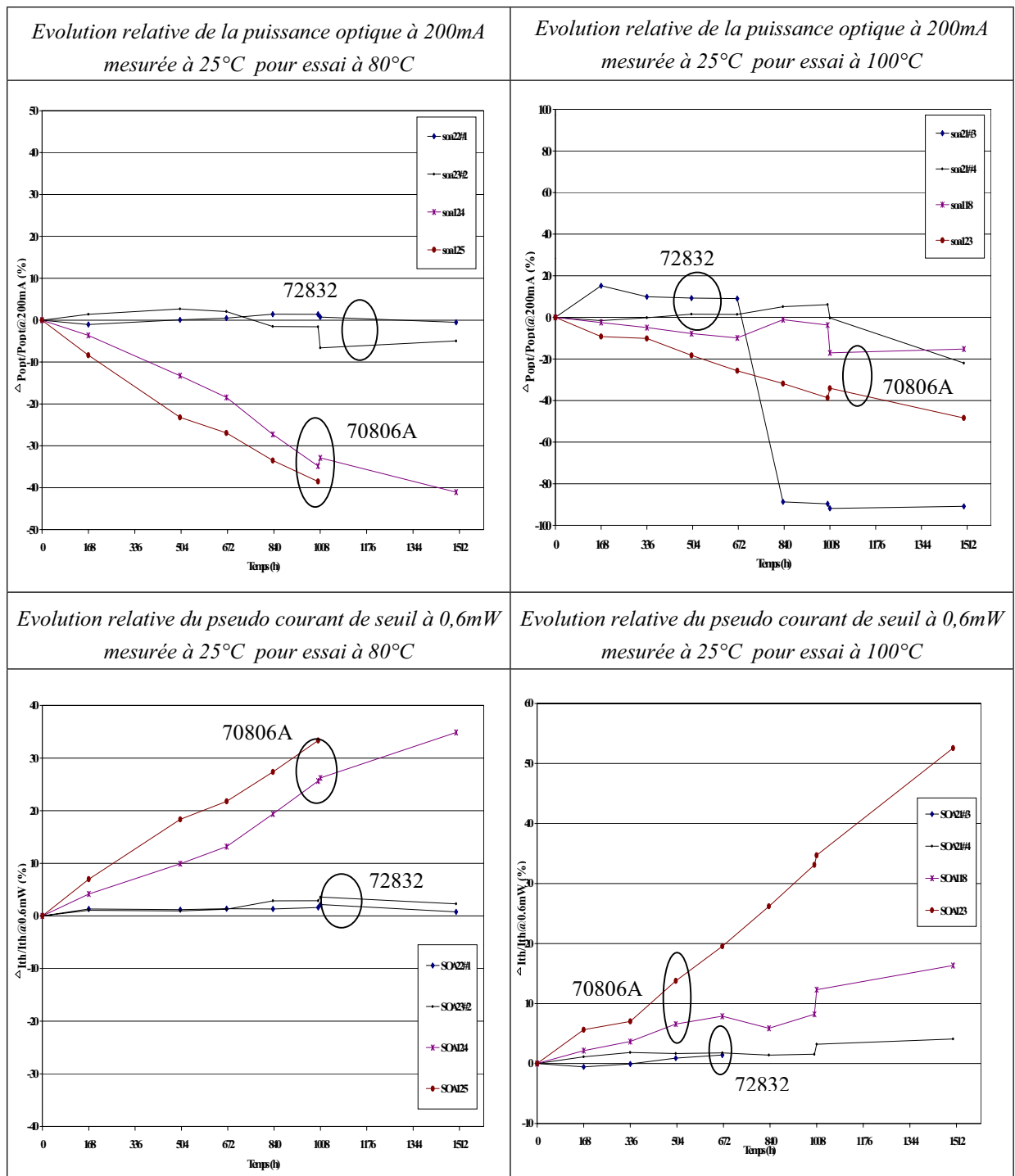


Tableau 14 : Evolution des paramètres électriques caractéristiques du lot 3 en fonction du temps de vieillissement pour 2 températures de test différentes

Après le test de vieillissement sous les conditions 270mA, 80°C/100°C durant 1500h environ, mené sur les 9 puces du lot 3, trois résultats expérimentaux importants découlent :

- Pour 2 composants, l'AOS 22#1 et l'AOS 23#2 de la plaque 72832, la diminution de leur puissance optique est inférieure à 15% et l'augmentation de leur pseudo courant de seuil est inférieure à 2%. Ils ont donc un mode de dégradation lent, comportement identique aux composants du lot 2, jusqu'à 1500h environ.

- Pour 4 composants, l'AOS 21#4 de la plaque 72832 et les AOSs 118, 123 et 124 de la plaque 70806, la diminution de leur puissance optique est supérieure à 15% et l'augmentation de leur pseudo courant de seuil est supérieure à 5%. Ils ont donc un mode de dégradation graduel, mode de dégradation préalablement défini pour le lot 2. En considérant le critère de défaillance défini par une diminution de 15% de perte de puissance optique, 50% des composants sont défectueux, soulignant ainsi le mécanisme d'usure accéléré de ces composants. Le calcul de l'énergie d'activation et du facteur d'accélération du mécanisme de dégradation de ces composants sera effectué dans le prochain paragraphe.
- Après observation optique des AOS 21#3 et AOS 125, il s'avère que ces 2 composants ont subi une agression mécanique lors de leur mise en essai à 672h pour l'AOS 21#3 et à 1008h pour l'AOS 125. Ils sont donc non significatifs et ne seront plus considérés dans la suite de l'analyse.

⇒ De plus, les composants 118 et 124 de la plaque 70806A qui ont présenté un comportement atypique durant les 22 premières heures de déverminage (variation identique pour $P_{opt}@200mA$ et $I@0,6mW$), ne montrent pas un comportement différent des autres composants lors du test de vieillissement (figure 71 pour le composant 118). La figure 71 permet également de constater, comme pour le composant 21#4, qu'il n'existe pas de relation entre une forte variation initiale ($>10\%$) après 22h de déverminage pour le paramètre $P_{opt}@200mA$ et une forte dérive ($>20\%$) après 1500h de vieillissement. De plus, pour ce composant, on constate que l'analyse de $I@0,6mW$ accentue la difficulté de notre étude car malgré la variation initiale de 5% après 22h de déverminage, une faible dérive ($< 2\%$) après 1500h de vieillissement a été constatée. Leur comportement en déverminage ne semble donc pas avoir de conséquence directe sur leur mode de défaillance.

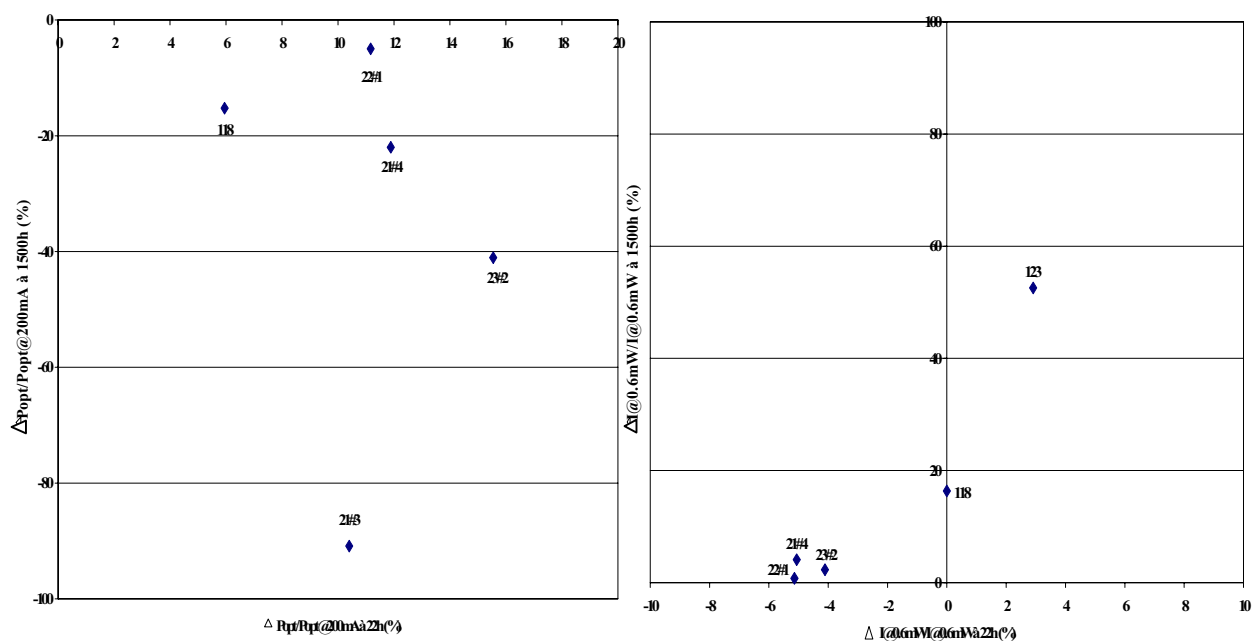


Figure 71 : Corrélation entre la dérive à 1500h et la dérive après 22h pour $P_{opt}@200mA$ et $I@0,6mW$

⇒ L'étude menée sur les différences existant entre les deux plaques de ce test a donné lieu à deux constatations. La première différence technologique réside en la nature des contacts des puces. Pour la plaque 72832, les contacts sont constitués de l'empilement Ti/Pt/Ti/Au et pour la plaque 70806, la filière technologie des contacts est Ti/Pt/Au. Cependant, ces deux types de contacts sont fréquemment utilisés dans les procédés technologiques pour les composants optoélectroniques et n'ont jamais présenté de problème quant à la diffusion d'impuretés métalliques du contact vers la couche active du composant. De plus, la diffusion est activée par la température or la température de jonction de l'AOS à 200mA ne permet pas d'expliquer un processus de diffusion. Enfin, la résistance série des caractéristiques $I(V)$ n'a pas évolué, il semble donc que cette différence de contact ne permette pas d'expliquer la différence de comportement entre ces deux plaques [41, 87].

Les hypothèses de dégradation envisagées de la plaque 70806 peuvent donc être associées à :

- une meilleure stabilité du contact de la plaque 72832,
- la qualité de la reprise d'épitaxie peut donner lieu à la propagation de dislocations proches de la zone active, comme il a été démontré dans la synthèse bibliographique [40, 41]. En effet, la cause probable, comme pour la diode laser BRS, est l'augmentation des centres recombinants non radiatifs proches de la zone active entraînant une diminution de la durée de vie des porteurs dans celle-ci. La présence de centres de recombinaison non radiatifs proches de la zone active est due à la gravure chimique permettant la préparation de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P).

De plus, la plaque 72832 ayant été fabriquée quatre ans après la plaque 70806, la reprise d'épitaxie était alors un procédé de fabrication mieux maîtrisé notamment avec l'utilisation du bâti MO4.

Afin de compléter ces résultats, l'évolution des caractéristiques $I(V)$ des différents composants du lot 3 a été suivie. L'analyse des résultats de ce suivi a donné lieu à une classification des différentes évolutions, présentées ci-dessous en figure 72, en deux types de comportements distincts.

On constate que la classification de l'évolution des caractéristiques $I(V)$ du lot 3 se fait en fonction du procédé de fabrication considéré. En effet, comme nous l'avons souligné précédemment, le comportement des composants du lot 3 est différent suivant le type de procédé technologique considéré, cette hypothèse ayant été précisée ci-dessus.

De plus, en appliquant la méthode d'étude de la caractéristique $I(V)$ déjà appliquée aux lots 1 et 2, il est possible d'émettre des hypothèses quant aux localisations et aux causes probables des dégradations des AOSs du lot 3 :

- Pour la plaque 72832, les caractéristiques $I(V)$ sont stables. En effet, le dédoublement observé étant faible et dans l'ordre de l'erreur de mesure, il n'est pas envisageable d'émettre des hypothèses

quant aux dégradations de ces composants. Les composants de cette plaque, excepté l'AOS 21#3 en cours-circuit à 672h, ne présentent donc pas de mode de dégradation après 1500h de test.

- Pour la plaque 70806, les caractéristiques I(V) présentent un dédoublement entre 0,5V et 0,8V. Comme nous l'avons vu précédemment, l'hypothèse d'une dégradation de la couche active est alors retenue. La cause probable est l'augmentation des centres recombinants non radiatifs dans la zone active. Cette hypothèse est également corrélée par le calcul du rendement optique pour ces composants (figure 73). En effet, une diminution significative du rendement optique et l'augmentation du pseudo courant de seuil peuvent être rapprochés des résultats des travaux de M. Fukuda. Ces derniers ont montré qu'une diminution du rendement, liée à une augmentation du courant de seuil pour les diodes laser BRS peuvent également être associées à une dégradation de la couche active (cf. mécanisme de dégradation C) causée par une diminution de la durée de vie des porteurs dans cette zone. Ce paramètre sera particulièrement analysé dans le cadre des modélisations physiques explicitées dans le chapitre 4.

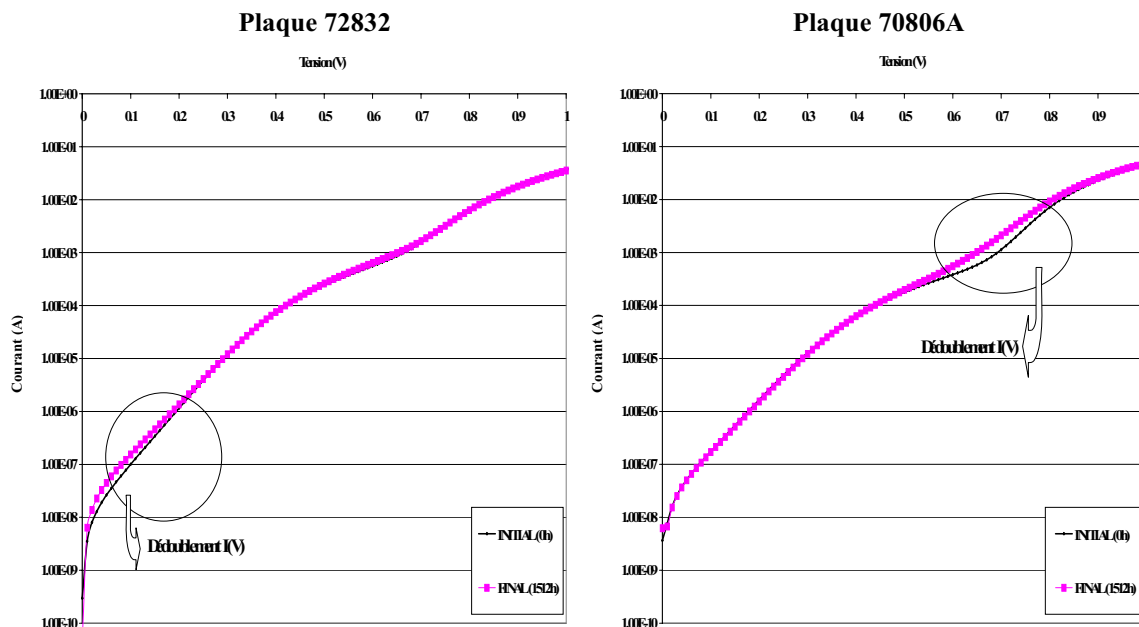


Figure 72 : Evolution des caractéristiques I(V), mesurées à 25°C, des AOS du lot 3

- ⇒ De plus, les composants 118 et 124 de la plaque 70806A, qui ont eu un comportement atypique lors du suivi de la puissance optique et du pseudo courant de seuil, durant les 22 premières heures de déverminage, n'ont pas eu un comportement différent des autres composants lors du suivi des caractéristiques I(V). Ce comportement ne sera donc pas pris en compte pour l'analyse des mécanismes de défaillance de ces composants.
- ⇒ La première hypothèse de dégradation de la plaque 70806 était que les contacts de cette plaque soient moins stables en température que les contacts de la plaque 72832. Cependant, aucune évolution de la résistance série n'étant observée pour corréler cette hypothèse, celle-ci n'est donc

pas satisfaisante. Seule la seconde hypothèse quant à la qualité de la reprise d'épitaxie donnant lieu à la propagation de dislocations proches de la zone active, reste donc valable.

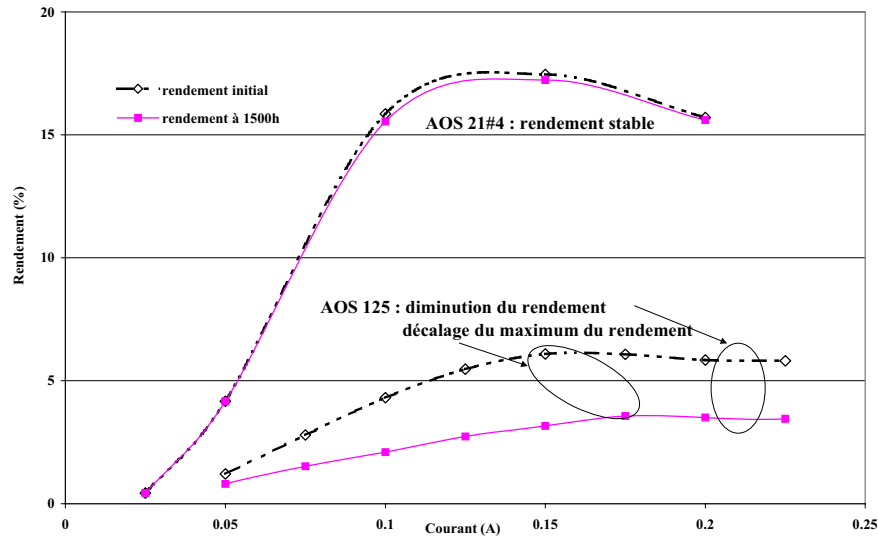


Figure 73 : Evolution du rendement pour l'AOS 21#4 (plaque 72832) et l'AOS 125 (plaque 70806)

Afin de compléter cette analyse, la variation absolue du gain et de la figure de bruit, mesurés à 200mA et à 25°C pour cinq puces dont une de référence sont présentés en figure 74. Cependant, les mesures n'ont été possibles que jusqu'à 1000h de vieillissement. En effet, le banc TP082 n'était plus disponible après 1000h de test pour les mesures de puces nues, les mesures sur les modules (barrette de 4 AOSs) ayant fait l'objet d'une priorité.

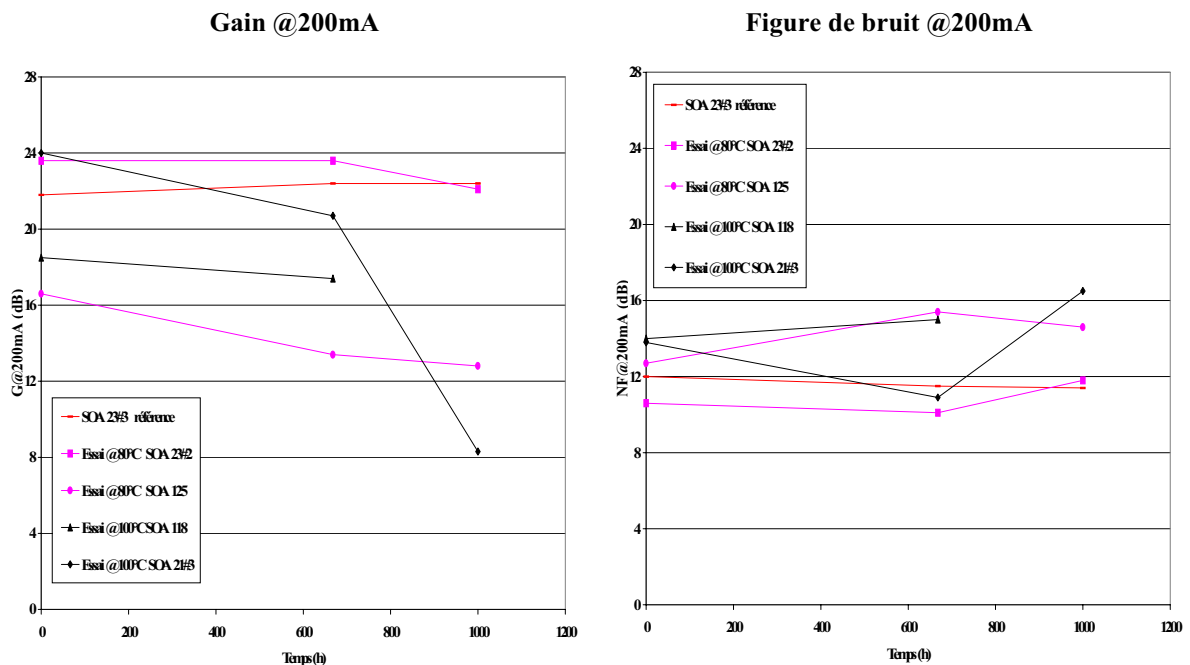


Figure 74 : Variations du gain et de la figure de bruit au cours du temps de vieillissement mesurées à 200mA et à 25°C

L'un des objectifs du lot 3 était de vérifier les différentes relations liant l'évolution du gain optique à celle de la figure de bruit et à celle de la puissance optique. La figure 75 présente la relation liant l'évolution du gain optique par rapport à celle de la puissance optique à 672h de test de vieillissement pour un courant de mesure de 200mA.

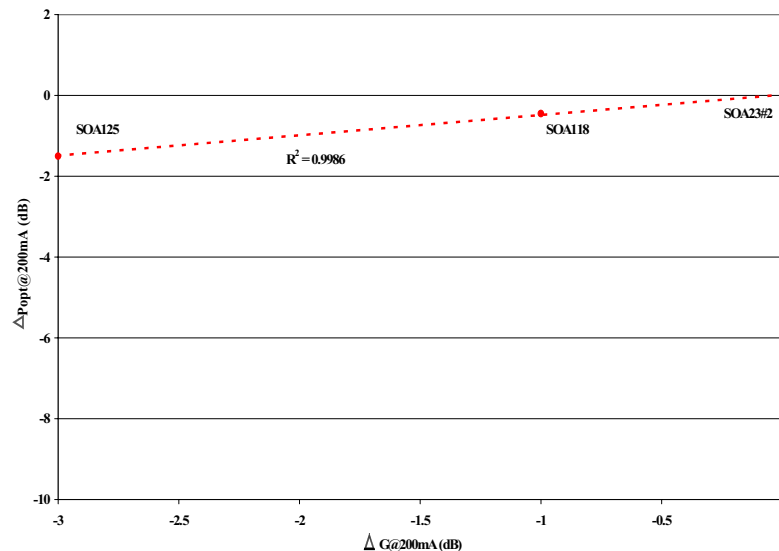


Figure 75 : Corrélation entre la variation absolue du gain optique et la variation absolue de puissance optique à 200mA après 1000h de test accéléré

La figure 75 permet de constater que :

- ⇒ la relation, liant, d'après les résultats du lot 2, l'évolution du gain par rapport à celle de la puissance optique (1dB de perte de gain correspond à 2dB de perte de puissance optique d'un AOS) a été confirmée par ce test de vieillissement.

Ce test permet donc de démontrer que le suivi du gain optique peut être effectué grâce au suivi de la puissance optique en sortie.

De plus, la relation liant l'évolution du gain optique à celle de la figure de bruit est également analysée. Le tableau 14 nous a permis de constater la corrélation qui existe entre la perte du gain optique et l'augmentation de la figure de bruit en fonction du temps de vieillissement :

- la perte de 1dB sur le gain optique d'un AOS est équivalente à l'augmentation 1dB de la figure de bruit de ce même composant.
- ✓ La figure de bruit du composant peut donc être considérée comme un paramètre de second ordre dans une étude de fiabilité car celui-ci suit la même évolution que le gain. En revanche, il reste fondamental dans le dimensionnement d'une liaison optique.

Ce dernier test de vieillissement a donc permis de confirmer des hypothèses quant aux types et à la localisation des dégradations observées sur les caractéristiques I(V) et l'évolution des paramètres $Popt@200mA$ et $I@0,6mW$ des AOSs de ce lot 3.

En effet, le seul mécanisme de dégradation observé sur ce lot de composants est identique à celui de la plaque 70806 ; les caractéristiques I(V) présentant un dédoublement progressif entre 0,5V et 0,8V. L'hypothèse d'une dégradation de la couche active est alors retenue dont la cause probable est l'augmentation des centres recombinants non radiatifs dans la zone active, liée à la préparation de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P) pouvant donner lieu à la propagation de dislocations proches de cette zone active. De plus, le comportement atypique de composants lors du suivi de la puissance optique et du pseudo courant de seuil durant les vingt deux premières heures de déverminage n'a pas d'incidence sur leur comportement en vieillissement.

Enfin, la distribution paramétrique P@200mA avant et après vieillissement est présentée en figure 76 afin de constater l'évolution de cette distribution.

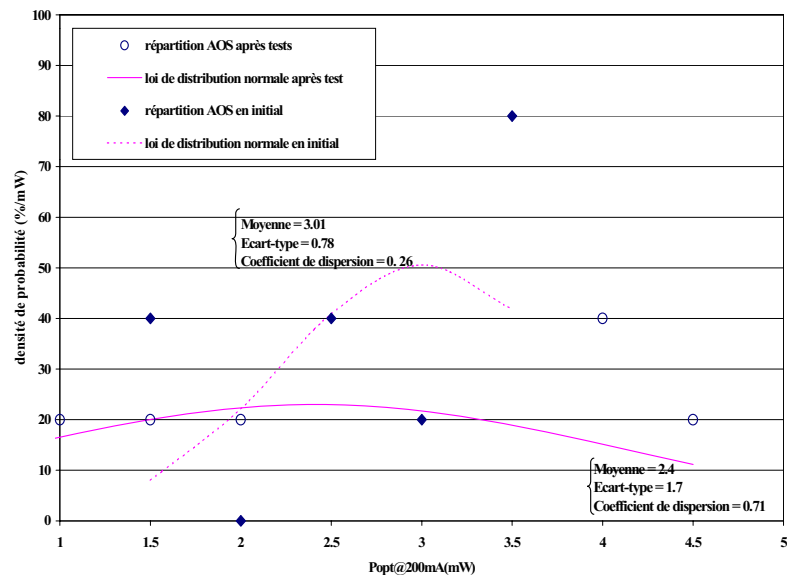


Figure 76 : Evolution de la distribution de la puissance optique à 200mA (initiale et finale) du lot 3 (plaques 70806 et 72832)

La figure 76 permet de constater la diminution de la puissance optique à 200mA pour l'ensemble des composants du lot 3 (diminution de 20% de la moyenne). De plus, l'augmentation de l'écart-type, de 70%, montre la dispersion de la technologie après les tests de contraintes échelonnées. Ces phénomènes sont opposés à la distribution observée en initial et à ceux constatés pour le lot 1 et montrent une évolution corroborant le constat d'une relative stabilité technologique. Ce comportement peut être expliqué par le fait que l'ensemble des composants du lot 3 a subi un déverminage et un test de vieillissement de 270mA, 100°C et 1500h qui ont peut être permis le recuit de défauts d'une couche matériau de la structure AOS [86].

Comme nous l'avons souligné, les hypothèses émises quant à l'évolution des différentes caractéristiques I(V) des AOSs lors de ce test seront évaluées dans le dernier chapitre de ces travaux de recherche. En effet, une analyse de défaillance couplée à une modélisation du composant AOS

constituera une aide au diagnostic de défaillance de ce composant. Après avoir observé les mécanismes de dégradation de l'AOS, une première estimation de l'énergie d'activation de ces phénomènes ainsi que le calcul du facteur d'accélération de ces derniers est effectué.

➤ Estimation de l'énergie d'activation des dégradations et du facteur d'accélération

Grâce aux résultats obtenus sur le lot 3, une estimation de l'énergie d'activation des mécanismes de dégradation est possible. Cette estimation, à partir d'une loi d'Arrhénius (cf. chapitre 1), nécessite de considérer deux essais à deux températures distinctes. Le paramètre, choisi pour cette estimation, est la puissance optique mesurée à 200mA car la mesure de ce paramètre est la plus précise, et la plus reproductible, parmi les caractéristiques suivies au cours des tests sur le lot 3.

La courbe de tendance correspondant à la majorité des évolutions de $P_{opt}@200mA$ en fonction du temps a été lissée en première approximation par une loi linéaire. La figure 77 présente l'évolution de $P_{opt}@200mA$ et l'extrapolation faite pour chacun des composants testés.

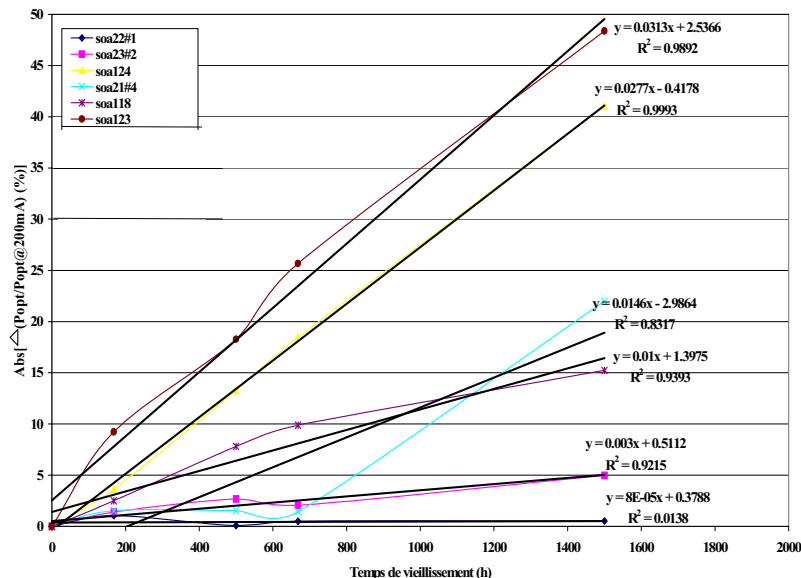


Figure 77 : Extrapolation linéaire de la puissance optique mesurée à 200mA en fonction du temps de vieillissement pour les deux essais en température 80°C et 100°C

De manière empirique, le critère de défaillance est défini par la perte de 20% de puissance optique des composants sous tests pour des conditions d'utilisation de 200mA, 25°C sur 15ans. Celui-ci associé aux équations d'extrapolation linéaire effectuées en figure 77 peuvent déterminer le temps de fin de vie de chacun des composants étudiés. Ces temps de fin de vie sont alors reportés sur un graphique en fonction de la température de test effectué (figure 78). L'estimation de l'énergie d'activation est alors obtenue à partir de l'extrapolation de ce graphique par une loi d'Arrhénius. **L'énergie d'activation des mécanismes de dégradation d'un AOS est donc estimée à 0,75eV, valeur obtenue dans le cadre de l'étude des dégradations des diodes lasers BRS dont l'énergie d'activation est de 0,7eV.**

Il faut noter que deux composants n'ont pas été pris en compte à cause de leur comportement extrême (très forte dérive 123 et très faible dérive 22#1).

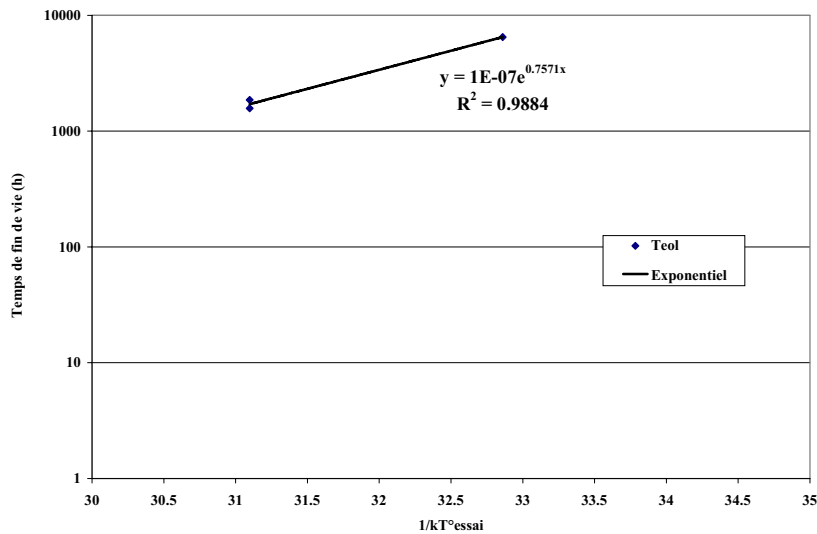


Figure 78 : Estimation de l'énergie d'activation des mécanismes de dégradation des AOSs par extrapolation de la loi d'Arrhénius

Afin de compléter cette étude, le facteur d'accélération (AF) du test effectué à 100°C (ou à 80°C) et 270mA peut alors être calculé en supposant une loi linéaire de dérive paramétrique. En effet ce coefficient est important pour l'estimation de la fiabilité des composants étudiés car il lie le taux de défaillance (λ_2) sous test de vieillissement accéléré et le taux de défaillance (λ_1) en mode de fonctionnement normal par la relation : $\lambda_2 = AF * \lambda_1$. Ce coefficient est alors défini par l'équation :

$$AF = \exp\left[\frac{Ea}{mk} \left(\frac{1}{T_{\text{utilisation}}} - \frac{1}{T_{\text{test}}} \right)\right] \quad (1-73)$$

avec $T_{\text{utilisation}} = 25^\circ\text{C}$

Le calcul du facteur d'accélération pour ces conditions de test donne une valeur égale à :

- 94,82 pour une température de 80°C,
- 355 pour une température de 100°C.

La température de test de 100°C n'a pas pu être dépassée lors de notre étude expérimentale car au-delà de 100 °C, la puissance optique émise par l'AOS est trop faible pour la sensibilité de la photodiode de la baie de vieillissement. Dans ces conditions, la baie ne peut alors se déclencher.

Néanmoins, une étude plus précise de la fiabilité des AOSs en conditions opérationnelles sera effectuée lors de la présentation des résultats du plan de qualification dans le dernier paragraphe de ce chapitre.

3.2.4/ Synthèse des résultats obtenus : lot1, lot 2 et lot 3

Les tests de déverminage et de vieillissement ont permis d'identifier trois signatures de défaillances distinctes et d'émettre des hypothèses quant à la localisation des dégradations observées grâce à l'étude des caractéristiques I(V) et de l'évolution des paramètres $P_{opt@200mA}$ des AOSs des lots 1, 2 et 3.

En effet, trois mécanismes de dégradation ont été observés et des hypothèses sur leur origine et leur localisation peuvent être faites. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, le procédé de fabrication et la structure de l'AOS étant proches de ceux de la diode laser BRS, les mécanismes de dégradation peuvent être, en première approximation, envisagés comme base pour établir des hypothèses de dégradation par rapport aux modes de défaillance observés sur les AOSs :

- ✓ La courbe I(V) présentant un dédoublement entre 0,3V et 0,9V, une diminution de la puissance optique et une augmentation du pseudo courant de seuil. *L'hypothèse d'une dégradation de la couche active est alors retenue.*
- La cause probable est, si l'on se réfère aux résultats de la synthèse bibliographique, la présence de centres de recombinaison non radiatifs aux bords de la zone active, liés à des défauts cristallins dus à la gravure chimique permettant la préparation de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P).
- La courbe I(V) présentant un dédoublement entre 0,1V et 0,3V. *L'hypothèse d'une dégradation de l'homojonction latérale InP(N)/InP(P) est alors retenue.* De plus, si l'on se réfère aux résultats de la synthèse bibliographique, la présence de centres de recombinaison non radiatifs à l'interface InP(N)/InP(P), liés à des défauts cristallins dus à la gravure chimique permettant la préparation de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P) est également retenue comme hypothèse de dégradation mais elle n'a cependant pas été démontrée.
- ✓ La courbe I(V) présente la caractéristique d'une résistance et non plus d'une diode signifiant la dégradation catastrophique à caractère soudain des AOSs. La cause probable de cette dégradation correspond à un problème lié à la dégradation des miroirs des puces.

Comme nous l'avons souligné, les hypothèses émises quant à l'évolution des différentes caractéristiques I(V) des AOSs lors de cette étude seront évaluées dans le dernier chapitre de ces travaux de recherche. En effet, une analyse de défaillance couplée à une modélisation du composant AOS constituera une aide au diagnostic de défaillance de ce composant.

De plus, l'ensemble de l'étude expérimentale a également montré que :

- ✓ Le niveau de contraintes (50kA/cm² ou 270mA, 100°C et 66h) pour un AOS, dont la longueur de la zone active est de 600µm et dont la largeur du ruban est comprise entre 1µm et 1,2µm, est suffisant pour déverminer les composants AOSs.
- ✓ Les évolutions du gain optique et de la puissance optique (2dB de perte de gain optique ⇔ 1dB de perte de puissance optique d'un AOS) permet de démontrer que le suivi du gain optique peut être effectué grâce au suivi de la puissance optique en sortie.
- ✓ La figure de bruit du composant est un paramètre de second ordre car ce paramètre suit la même évolution que le gain (la perte de 1dB sur le gain optique d'un AOS correspond à l'augmentation de 1dB de la figure de bruit).
- ✓ Une corrélation existe entre la perte du gain optique et la perte de puissance optique (la perte de 1dB sur le gain optique d'un AOS correspond à la diminution de 1dB de la puissance de saturation de sortie). La puissance de saturation en sortie du composant apparaît donc également comme un paramètre de second ordre.
- ✓ L'énergie d'activation des mécanismes de dégradation, a été estimée à 0,75eV en supposant une loi d'Arrhénius et un comportement linéaire de variation paramétrique.
- ✓ Le comportement atypique de composants lors du suivi de la puissance optique et du pseudo courant de seuil durant les vingt deux premières heures de déverminage n'a pas d'incidence sur leur comportement en vieillissement.

Après avoir présenté l'étude expérimentale de ces travaux, les premiers résultats du plan de qualification ainsi qu'une première estimation de la fiabilité de la technologie transférée dans un véritable cadre industriel sont exposés.

3.3/ Résultats expérimentaux du plan de qualification

Un plan de qualification ayant pour objectif d'évaluer la robustesse et la fiabilité d'un composant au regard de normes spécifiques de qualification en vue de sa commercialisation, la difficulté consiste en l'application de ces normes telles que les standards Bellcore/Telcordia relatives aux composants optoélectroniques pour les applications de télécommunication [46, 65]. Dans un premier temps, nous exposerons les caractéristiques des composants testés, les paramètres suivis et les conditions de tests de ce plan de qualification. Puis, les premiers résultats de ce plan de qualification seront présentés [100].

3.3.1/ Caractéristiques des composants testés et paramètres suivis

Les AOSs analysés sont des composants émettant à 1,55µm, dont la longueur des puces est 700µm. Ces composants ont une structure et des caractéristiques identiques aux AOSs étudiés lors de nos études précédentes. Cette phase de qualification a été rendue possible suite au transfert

technologique du procédé complet de fabrication de plaques (ou "wafers") entre ALCATEL R&I et ALCATEL Optronics de cinq plaques fabriquées en 2003 et 2004 soit un total de 230 AOSs.

Grâce à la mise en place du banc TP082 dédié aux AOSs, au banc TP057 et au système d'acquisition basé sur un analyseur de type HP4145, il a été effectué un suivi complet des différents paramètres électro-optiques des AOSs, cités ci-dessous :

- ☞ la puissance optique : $P(I)$ à 25°C pour un courant variant de 0 à 250mA et le pseudo courant de seuil à 0,6mW, I_{th} , suivis grâce à la même caractéristique,
- ☞ la caractéristique courant-tension : $I(V)$ à température ambiante pour une tension variant de 0 à 1,5V,
- ☞ le gain, la figure de bruit et le spectre optique en fonction du courant, mesurés sur le banc TP082.

Suite aux résultats obtenus sur les lots 1, 2 et 3, les mesures de gain, de la figure de bruit et du spectre optique ont été classées comme des paramètres du second ordre dans ce plan de qualification. Le choix des paramètres à suivre s'est donc fait en fonction des résultats des travaux de thèse qui ont montré que la puissance optique mesurée à 200mA, la caractéristique courant-tension et le pseudo courant de seuil à 0,6mW sont les caractéristiques essentielles du AOS et peuvent permettre l'étude des mécanismes d'accélération des défauts et l'estimation de la fiabilité de ces composants.

3.3.2/ Conditions de test accéléré

Le plan de qualification a débuté en avril 2003 et s'est achevé en juin 2004. Les puces testées lors de ce plan de qualification sont issues de huit plaques différentes :

- ☞ 97 puces provenant des plaques 73766, 73773, 60354 et 60616 pour les tests de qualification,
- ☞ 133 puces provenant des plaques 73766, 73773, 60354 et 60616 mais aussi des plaques 60349, 60622 et 60624 pour les tests de déverminage.

Les différentes puces ont été réparties en 9 lots différents G1, G1_{bis}, G1_{transfert}, G2, G3, G4, G5, G6, G7. Chacun de ces lots se distingue par ses conditions de test.

Le premier test effectué est un test de déverminage sur un lot de 25 puces (groupe G1) afin de confirmer les conditions de déverminage issues de ces travaux de recherche. Les conditions appliquées lors de ce test ont donc été : 270mA/100°C durant 168h.

Le second type de tests effectués est relatif aux normes telles que les standards Bellcore/Telcordia relatives aux composants optoélectroniques pour les applications de télécommunication afin d'établir la robustesse des AOSs. Ces tests sont donc :

- ☞ Des cyclages thermiques de -55°C à $+150^{\circ}\text{C}$ variant de 100 à 500 cycles permettant d'étudier la tenue du report de la puce AOS sur son embase (préforme de brasure AuSn), groupe G3.

- ☞ Des tests ESD effectués dans la gamme 0V-2500V par pas de 500V, étudiant la sensibilité d'un AOS aux décharges électrostatiques, groupe G4.
- ☞ Un test de contraintes échelonnées en courant, groupe G2, afin d'évaluer la robustesse du produit et d'estimer l'accélération relative au courant et ainsi confirmer la condition limite en courant (320mA) à appliquer aux AOSs confirmant les résultats obtenus sur les lots 1, 2 et 3. Les conditions de ce test sont définies par : $T=80^{\circ}\text{C}$ et I variant de 200mA à 300mA avec le courant croissant toutes les 96h.

Le troisième type de test est défini afin de pouvoir estimer la durée de vie opérationnelle d'un AOS et la fiabilité de celui-ci, en considérant une extrapolation des paramètres suivis, à partir de la loi d'Arrhénius. Il est nécessaire de considérer deux essais à deux températures distinctes. Les conditions de test fixées sont alors :

- ☞ $I=270\text{mA}$ et $T=100^{\circ}\text{C}$ durant 2000h avec des reprises de mesure toutes les 500h, dont les lots de composants testés sont les groupes nommés G1, G1bis et G1 transfert.
- ☞ $I=270\text{mA}$ et $T=53^{\circ}\text{C}$ durant 2000h avec des reprises de mesure toutes les 500h, groupe nommé G9.

De plus, afin de compléter les tests du plan de qualification, d'autres tests de vieillissement accéléré ont été effectués :

- ☞ $I=200\text{mA}$ et $T=53^{\circ}\text{C}$ durant 5000h avec des reprises de mesure toutes les 500h, dont le lot de composants testés est le groupe nommé G5.
- ☞ $I=200\text{mA}$ et $T=80^{\circ}\text{C}$ durant 5000h avec des reprises de mesure toutes les 500h, groupe G6.
- ☞ $I=200\text{mA}$ et $T=100^{\circ}\text{C}$ durant 5000h avec des reprises de mesure toutes les 500h, groupe G7.

Tous les composants soumis à ces tests de vieillissement ont été au préalable déterminés sous les conditions : $50\text{kA}/\text{cm}^2$ et 100°C durant 32h.

De plus, les critères de défaillance (critère EOL) des AOSs sont définis, pour des conditions d'utilisation de 200mA, 25°C durant 15ans, par :

- ☞ la perte de 20% de la puissance optique mesurée à 200mA,
- ☞ l'augmentation de 20% du pseudo courant de seuil mesuré à 0,6mW de puissance optique émise.

3.3.3/ Analyse et discussion des résultats expérimentaux

L'analyse de l'ensemble des résultats de tests du plan de qualification est donnée ci-dessous.

☞ Phase de déverminage

La mise en évidence des conditions de déverminage optimales (270mA, 100°C) au travers des études sur les lot1, lot2 et lot 3 ont été corrélées avec ce plan de qualification. Les résultats du test de déverminage ne sont pas exposés car les tendances observées lors de ce test sont identiques à l'ensemble des résultats observés sur les puces des lots 1, 2 et 3 : une augmentation relative de

maximum 5% puis une stabilisation de la puissance optique à 200mA après 32h de test. Seule la durée du test de déverminage est donc modifiée et elle a été ramenée à 32h.

- ✓ Les conditions optimales de déverminage pour le composant AOS sont donc ramenées à : 50kA/cm², 100°C, 32h.
- ✓ Les puces dont les dérives de puissance optique mesurée à 200mA sont supérieures à $\pm 6\%$ seront donc rejetées après le test de déverminage (80% des puces retenues).

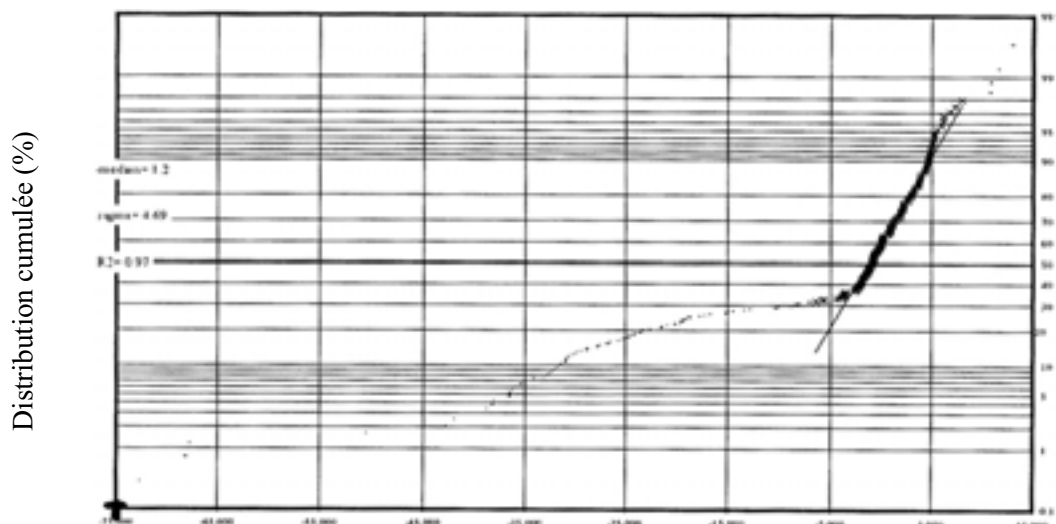
➤ *Test de robustesse*

L'analyse des résultats des tests de robustesse sur l'AOS est en cours à ALCATEL Optronics mais certains résultats sont déjà connus :

- ✓ Après cyclages thermiques, les paramètres électro-optiques sont stables au cours du temps montrant ainsi la stabilité du report du AOS sur son embase et la tenue des métallisations.
- ✓ Les tests ESD ont révélé une faible sensibilité de cette technologie.
- ✓ Les tests effectués en contraintes échelonnées ont permis d'établir que la valeur du courant maximale à appliquer est de 320mA.

➤ *Test de vieillissement*

Avant de présenter les résultats de ces tests, la distribution de la puissance optique à 200mA (Popt@200mA) après déverminage a été étudiée afin de s'assurer de la stabilité du procédé technologique du AOS (figure 79).



Dérive de la puissance optique à 200mA
après 100°C/270mA/32heures

Figure 79 : Distribution de la puissance optique à 200mA pour les 230 composants du plan de qualification

L'étude menée par d'Annick Denolle (figure 79) permet de démontrer la stabilité du procédé de fabrication des AOSs du plan de qualification de par le fait que plus de 90 % des AOSs sont contenus dans l'intervalle $[-3\sigma, +3\sigma]$.

Les résultats des tests effectués sur les groupes G5, G6 et G7 ont montré qu'en considérant le critère de défaillance défini par une perte de 20% de $P_{opt@200mA}$:

- ✓ environ 60% des composants sont défaillants pour les essais dont les conditions sont 53°C ou 80°C à 200mA, soulignant ainsi le mécanisme d'usure accéléré de ces composants.
- ✓ moins de 10% des composants sont défaillants pour l'essai dont les conditions sont 100°C à 200mA, soulignant ainsi la stabilité des AOSs pour ces conditions de test.

L'interprétation d'un taux de défauts anormalement élevé (>50%) pour une température de test relativement faible (<80°C) n'a pas été solutionné lors du plan de qualification car ces défauts n'ont pu être reliés à un défaut de plaque, ni à un défaut lors d'une étape de fabrication. Néanmoins, l'influence des zones passives, les pointes de la zone active (création de points chauds) ou l'impact du traitement anti-reflet constituent des hypothèses avancées pour l'accélération des mécanismes d'usure à 53°C et 80°C. De plus, ce phénomène à basse température n'a pas été étudié lors de ces travaux de recherche car celui-ci n'avait pas été observé sur les AOSs des lots 1, 2 et 3. En effet, seules les premières étapes des contraintes échelonnées auraient pu permettre d'observer la diminution de $P_{opt@200mA}$ à basse température (<80°C) des AOSs du lot 1. Néanmoins la durée de ces étapes de test étant faible, ce phénomène a été classé comme phénomène atypique, nécessitant des perspectives de recherche complémentaire.

Après avoir déterminé les composants des lots G1, G1 bis et G1 transfert, les conditions du test de vieillissement appliquées sont : 270mA-100°C. Les évolutions de la puissance optique à 200mA et du pseudo courant de seuil à 0,6mW pour l'ensemble des composants de ces trois lots peuvent être classées en deux types de comportements distincts (certains composants atteignant le critère de défaillance défini et les autres n'atteignant pas ce critère). La figure 80 présente donc ces deux types de comportements pour les paramètres suivis ($P_{opt@200mA}$ et $I_{th@0,6mW}$).

**Evolution relative de la puissance optique à 200mA
mesurée à 25°C**

**Evolution relative du pseudo courant de seuil à
0,6mW mesurée à 25°C**

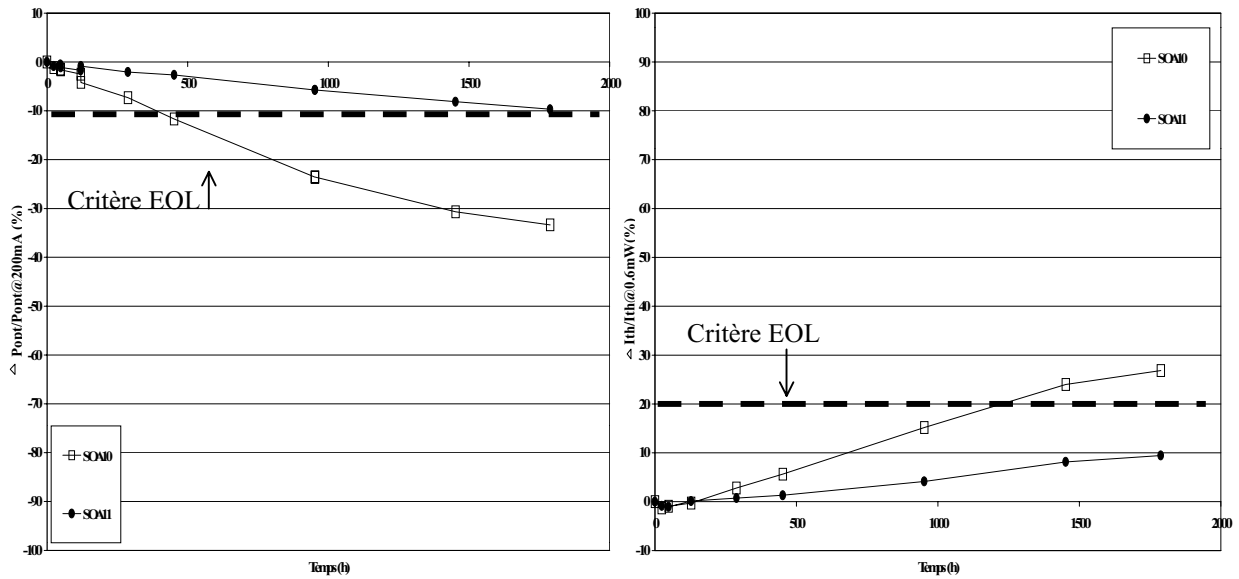


Figure 80 : Evolution des paramètres électriques caractéristiques des lots G1, G1 bis et G1 transfert

Après le test de vieillissement sous les conditions 270mA et 100°C durant 1300h, mené sur les trois lots de composants, deux résultats expérimentaux importants sont constatés :

- Pour 5 composants sur 24, la diminution de leur puissance optique est inférieure à 20% et l'augmentation de leur pseudo-courant de seuil est inférieure à 15%. Ils ont donc un mode de dégradation lent, mode de dégradation préalablement défini pour le lot 2 et 3, jusqu'à 1300h.
 - Pour 19 composants sur 24, la diminution de leur puissance optique est supérieure à 20% et l'augmentation de leur pseudo-courant de seuil est supérieure à 15%. Ils ont donc un mode de dégradation graduel et rapide, mode de dégradation préalablement défini pour le lot 2 et 3.
 - En considérant le critère de défaillance défini par une augmentation de 20% du pseudo-courant de seuil, 80% des composants sont défectueux, soulignant ainsi le mécanisme d'usure accéléré de ces composants.
- ⇒ *Les fortes dérives lors des tests de vieillissement du plan de qualification mené sur les deux plaques 73773 et 73766 de composants semblent pouvoir être expliquées par des problèmes de report sur l'embase ou sur le câblage des puces AOSs. En effet, le procédé de fabrication paraissant stable, les différents comportements des composants ne pourraient alors provenir que de l'étape du montage des puces.*

Afin de compléter ces résultats, l'évolution des caractéristiques I(V) des différents AOSs du plan de qualification a été suivie. L'analyse des résultats de ce suivi a donné lieu à une classification des différentes évolutions, présentées en figure 81, en deux types de comportements distincts.

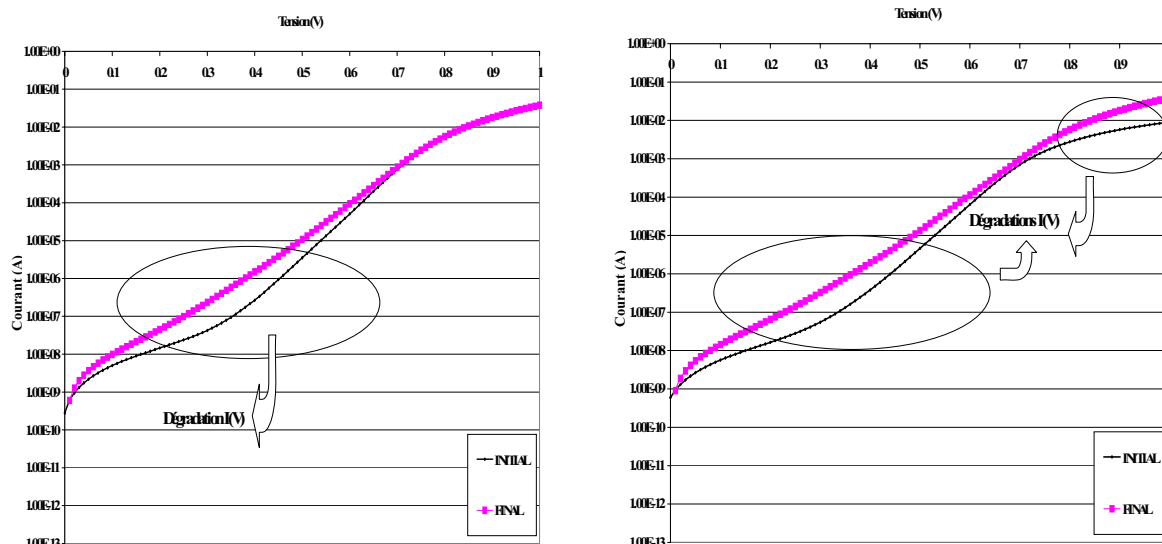


Figure 81 : Evolution des caractéristiques I(V), mesurées à 25°C des AOSs des lots G1, G1 bis et G1 transfert

En appliquant le même type d'analyse de la caractéristique I(V) appliquée aux lots 1, 2 et 3, il est possible de confirmer les hypothèses, déjà envisagées pour les composants du lot 3 :

- Les caractéristiques I(V) présentent un dédoublement entre 0,1V et 0,3V ; l'hypothèse d'une dégradation de l'homojonction InP/InP est alors retenue.
- Les caractéristiques I(V) présentent un dédoublement entre 0,3V et 0,8V, une diminution de la puissance optique et une augmentation du pseudo-courant de seuil ; l'hypothèse d'une dégradation de la couche active est alors envisagées.

Le chapitre 4 est dédié à la validation des hypothèses présentées ci-dessus. Néanmoins, aucune corrélation entre les évolutions de $P_{opt}@200mA$, $I_{th}@0,6mW$ et I(V) n'a pu être établie.

De plus, les premiers résultats de fiabilité des AOSs du plan de qualification corroborent plusieurs résultats mis en lumière sur les lots 1, 2 et 3 obtenus lors de notre étude expérimentale :

- ✓ Lors des contraintes échelonnées, la diminution de $P_{opt}@200mA$ observée sur les AOSs du lot 1 à basse température ($<80^{\circ}C$) ayant été classée comme un phénomène atypique, constitue un phénomène récurrent pour les AOSs nécessitant des perspectives de recherche complémentaire.
- ✓ Les résultats obtenus lors des essais de robustesse et de vieillissement dont les conditions sont $100^{\circ}C$, $270mA$, $1500h$ sont corrects mais pas entièrement satisfaisants de par les fortes dérives observées des paramètres suivis au cours de ces essais.
- ✓ L'évolution du gain par rapport à celle de la puissance optique qui a été observée est sensiblement différente de celle déduite des tests expérimentaux du lot 3. Lors du plan de qualification, 1dB de perte de gain correspond à 1dB de perte de puissance optique d'un AOS.
- ✓ L'évolution du gain par rapport à celle de la figure de bruit qui a été observé est également différente : 1dB de perte de gain correspond à 0,5dB de perte de figure de bruit d'un AOS.

4/ METHODOLOGIE DE PREVISION DE DUREE DE VIE

Une défaillance qui surviendrait sur un AOS entraînerait alors non seulement la diminution des performances de ce dernier mais également le dysfonctionnement de la liaison optique dans laquelle il sera intégré et ceci quel que soit le rôle de ce composant (Booster, pré-amplificateur ou porte optique). Pour pallier ce problème, un critère de défaillance empirique, déterminé à partir des tests de vieillissement accéléré décrits ci-dessus, a été défini comme une augmentation de 20% du courant mesuré pour une puissance optique de sortie de 0,6mW de l'AOS sous test. Ce critère correspond donc à un état limite pour le composant. Lorsque les composants, dont on souhaite déterminer la durée de vie dans les conditions normales de fonctionnement préalablement définies, et ainsi de garantir la fiabilité de ces produits aux utilisateurs, n'atteignent pas le critère de défaillance établi, les industriels tels qu'ALCATEL Optronics ont, en général, recours à des méthodes de prévision. Comme nous l'avons présenté dans le paragraphe précédent, plusieurs AOSs du plan de qualification n'ont pas atteint le critère de défaillance. L'ensemble des résultats décrits ci-dessous s'attache à présenter une méthodologie originale de prévision de durée de vie à partir de l'approche de Monte-Carlo appliquée aux faibles dérives (inférieures à 10%) et aux faibles populations (inférieures à 25 composants) [64, 65].

4.1/ Contexte de l'étude

Les très longues durées de vie, associées aux très faibles taux de défaillance, atteintes par les composants électroniques et optoélectroniques actuels rendent très difficile, voire impossible, l'évaluation expérimentale des caractéristiques usuellement données pour caractériser la fiabilité : durée de vie moyenne, ou médiane, et le taux de défaillance. En effet, les tests classiques de vieillissement accéléré sous contraintes tels que ceux menés dans le cadre de cette thèse ou ceux du plan de qualification présentés ci-dessus, trouvent leurs limites dans le compromis entre la durée du test, le nombre d'échantillons sous test et un facteur d'accélération raisonnable compte tenu de la complexité croissante des technologies (cf. chapitre 1). Il semble donc impossible d'obtenir une distribution complète (ou quasi-complète) des instants de défaillance à des coûts prohibitifs. Des outils de statistiques peuvent alors être mis en œuvre pour estimer les paramètres pertinents à partir d'informations minimales couramment issues de tests tronqués en durée et à faible population. Ces outils interviennent à plusieurs niveaux dans les démarches de "simulation de fiabilité" :

- estimation optimale des paramètres fondamentaux issus d'expérience,
- extrapolation fiable dans le temps grâce à une loi analytique,
- reconstitution mathématique d'une distribution des durées de vie.

La puissance actuelle des calculateurs numériques permet la mise en œuvre de "simulateurs", dans le domaine de la fiabilité comme dans d'autres domaines lorsque la prévision purement analytique est impossible soit par la complexité propre des lois d'extrapolation, soit par le nombre de variables envisagées et la définition des distributions paramétriques associées. En particulier, la méthode de Monte Carlo permet la génération empirique de la distribution d'une variable aléatoire par balayage numérique de la variable à caractériser lorsque les paramètres décrivent leur propre distribution. Sous réserve d'un nombre de points simulés suffisants, on peut alors construire une fonction de répartition fiable de cette variable aléatoire permettant alors d'estimer la fiabilité des composants étudiés malgré la faible population de composants testés et les durées de test tronquées. Nous allons donc présenter le principe et la démarche utilisée pour prédire une distribution de durées de vie à partir de l'évolution de certains paramètres.

4.2/ Principe de la méthode

Dans le cas d'une étude classique de fiabilité, on connaît habituellement la fonction d'extrapolation (par exemple : la loi d'Arrhénius) et ce sont les attributs propres au composant considéré qui sont distribués (technologie, paramètres électriques ou optiques, ...). Dans le cas où les durées de vie des composants étudiés sont très longues, différentes difficultés se posent :

- La fonction définissant "l'instant de défaillance" est basée sur un critère arbitraire encore appelé tolérance d'une dérive maximale (notée δ), de courant ou de puissance, relative ou absolue. Nous prendrons, comme critère de défaillance une augmentation de 20% du courant mesuré pour une puissance optique de sortie de 0,6mW de l'AOS.
- La cinétique de la dérive, et non la dérive elle-même, paramétrée en fonction des résultats de test, est soumise au critère définissant "l'instant de défaillance" : loi empirique évoluant en at^m où a et m dépendent du lot de composants et des conditions de vieillissement, cette dérive n'étant observée que pendant une période inférieure à la première défaillance. Nous allons nous attacher à montrer que la cinétique de dérive des paramètres analysés sur un AOS peut être décrite, en première approximation, par une loi de ce type.
- L'instant conventionnel de défaillance est calculé par extrapolation à partir des deux conditions précédentes, non mesuré directement : $t_{EOL} = (\delta/a)^{1/m}$.

Si l'on considère l'ensemble des résultats obtenus après les tests de vieillissement accélérés sur les AOSs, on constate que certains de ces composants atteignent le critère de défaillance permettant alors d'estimer la durée de vie de ces composants. Néanmoins, la faible population de ces tests combinée à une durée réduite constituent des facteurs limitatifs pour l'étude de la fiabilité des AOSs justifiant donc l'utilisation d'une telle approche. De manière générale, cette procédure exige :

- I. Une extraction la plus précise possible des couples (a, m) associé à chaque composant suivi en vieillissement.
- II. L'estimation du comportement statistique des couples (a, m) associés à chaque lot en vieillissement (la fonction de répartition complète, ajustée à une loi classique dans le cas présent).
- III. La génération de couples (a, m) virtuels représentatifs du lot considéré, en nombre suffisant pour permettre le calcul des instants de défaillance correspondants à ces composants afin de pouvoir prédire ensuite la durée de vie moyenne des composants étudiés.

L'observation montre que les coordonnées des couples (a, m) ne sont pas indépendantes. La recherche d'une fonction de répartition conjointe ($F_{a, m}$) est dans ce cas, en général, sans solution unique. La détermination d'une loi tendance de corrélation entre a et m permet alors ici d'obtenir la répartition conjointe des couples considérés. Ainsi appliquée, la simulation statistique permet d'affirmer que, sous réserve de la validité des données entrantes (couples (a, m) et loi de tendance choisie), tout couple virtuel généré par tirage aléatoire correct sera homogène en respect des lois de répartition ajustées. L'instant de défaillance déduit sera donc représentatif d'un composant issu d'un lot possédant ces mêmes caractéristiques. Cependant, l'inconvénient majeur de cette approche est qu'elle n'autorise pas la quantification certaine du niveau de confiance à accorder aux résultats pour une population virtuelle de taille donnée. Les résultats exposés ci-dessous sont donc présentés comme les premiers éléments d'analyse dans le cadre d'une première prévision de la fiabilité des AOSs tout en tenant compte du fait que ces composants n'ont pas atteint la maturité technologique pour leur commercialisation.

4.3/ Résultats obtenus

L'étude de la fiabilité des composants AOSs est menée grâce aux résultats expérimentaux du groupe G1 (10 composants) issus du plan de qualification car la durée de test de vieillissement accéléré, pour ces composants, a été la plus importante (1500h).

↻ Extraction des couples (a, m) à partir des paramètres suivis en vieillissement

Le groupe G1 a subi un test de vieillissement accéléré dont les conditions sont : **270mA-100°C pendant 1500h avec des reprises de mesures à 24h, 48h, 120h, 288h, 450h, 950h et 1500h.** Le paramètre suivi durant ce test et choisi, pour l'estimation de la durée de vie des composants AOSs, est le pseudo courant de seuil défini par la valeur du courant lorsque la puissance optique mesurée est de 0,6mW à 25°C. Les dérives relatives de $I_{th@0,6mW}$, après 1500h de test, sont présentées en figure 82. Le critère de défaillance correspond à une augmentation de 20% de ce même paramètre.

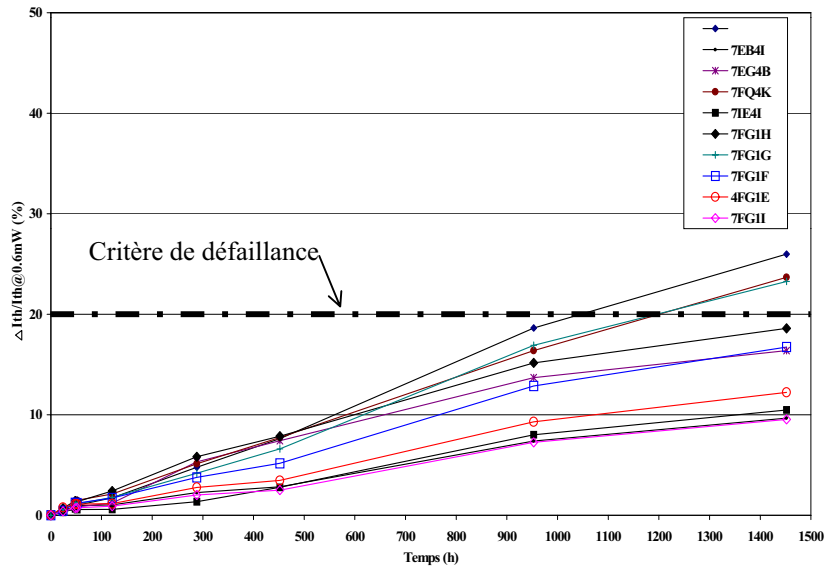


Figure 82 : Evolution relative Ith@0,6mW du lot G1 en fonction du temps de vieillissement

Les dérives relatives de Ith@0,6mW peuvent être lissées par une loi puissance de type : $y=at^m$.
La figure 83 présente deux exemples de lissage sur ce groupe de composants.

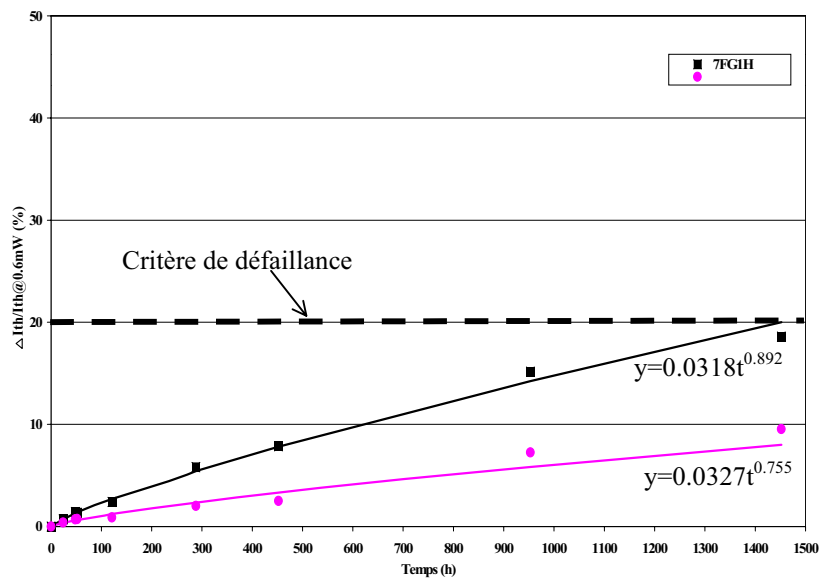


Figure 83 : Exemples de lissage de l'évolution du pseudo courant de seuil

Le tableau 15 synthétise les couples (a, m) calculés pour le groupe G1 du plan de qualification suivis en vieillissement.

N° AOS	Coefficient a	Coefficient m	Durée de vie (h) en conditions accélérées
1	0,0292791	0,918	1221
2	0,0441309	0,716	5141
3	0,0173133	0,964	1500
4	0,027829	0,925	1222
5	0,0177122	0,846	4058
6	0,0566901	0,806	1452
7	0,0318422	0,892	1373
8	0,0389027	0,826	1912
9	0,0727788	0,673	4205
10	0,032796	0,755	4885

Tableau 15 : Calcul des couples (a, m) des 10 AOSs du groupe G1

Le tableau 15 montre que 3 composants du lot G1 atteignent le critère de défaillance : AOS 1, AOS 4 et AOS 7. En revanche, les autres AOSs ne présentent que des dérives comprises entre 10% et 15%. Une durée de vie a donc été extrapolée analytiquement en conditions accélérées. L'approche précédemment explicitée va nous permettre de prédire une durée de vie de ces composants en conditions opérationnelles (en tenant compte du facteur d'accélération) et en particulier de calculer les premiers instants de défaillance à partir d'un nombre suffisant de composants d'un point de vue statistique. La figure 84 présente la distribution des couples (a, m) calculés pour les 10 AOSs du groupe G1.

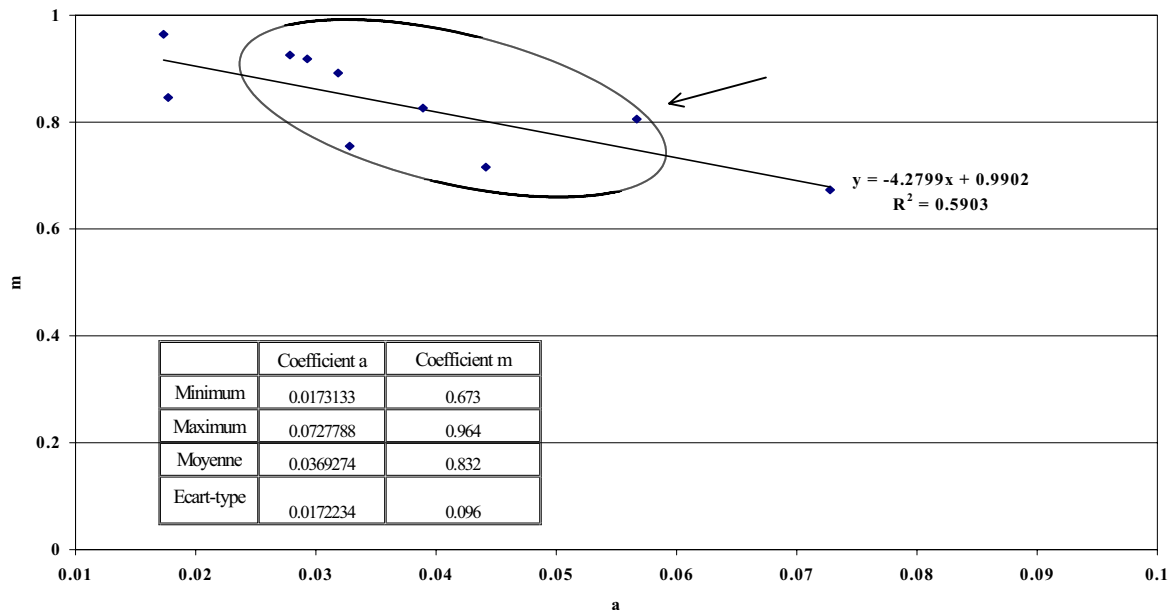


Figure 84 : Distribution des couples (a, m) expérimentaux en conditions accélérées

La distribution tracée en figure 84 révèle plusieurs points non homogènes qui peuvent être le reflet de la dispersion des composants : composants présentant une valeur faible de a traduisant l'amplitude de la dégradation de l'état initial. La détermination d'une loi tendance de corrélation entre a et m permet d'obtenir la répartition conjointe des couples considérés. On émet l'hypothèse que la corrélation entre les coefficients a et m expérimentaux peut se mettre sous la forme :

$$m = \alpha \ln(a) + \beta \quad (1-74)$$

La loi de corrélation linéaire entre a et m est déduite de la figure 84. Elle est donc de la forme :

$$m = -4,227 \ln(a) + 0,99$$

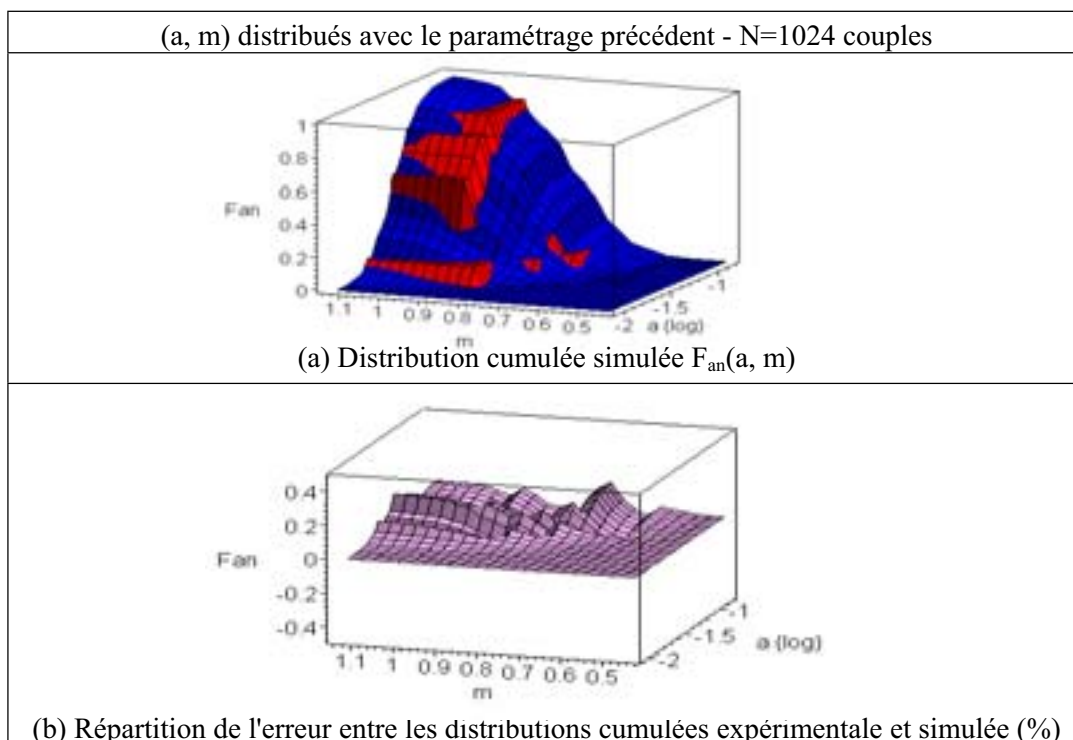
avec un coefficient de corrélation (R^2) proche de 0,6.

On suppose que la distribution du coefficient (a) obéit à une loi log-normale. Cette hypothèse est à rapprocher des hypothèses émises pour l'estimation des distributions de durées de vie des diodes laser BRS 1,55 μm réalisée dans une étude du plan de qualification de ces composants par ALCATEL Optronics [61]. Celui-ci est donc distribué marginalement selon une loi log-normale :

$$f_a(a) = G(m, \sigma) \quad (1-75)$$

où m est la moyenne des $\ln(a)$ et σ est l'écart type des $\ln(a)$.

La méthode d'approximation de la distribution des couples est sensible à l'estimateur utilisé. Dans le cas de cette étude, on utilisera l'estimateur du maximum de vraisemblance [74]. La figure 85 présente les résultats obtenus pour un tirage de 1024 couples virtuels par la méthode Monte-Carlo.



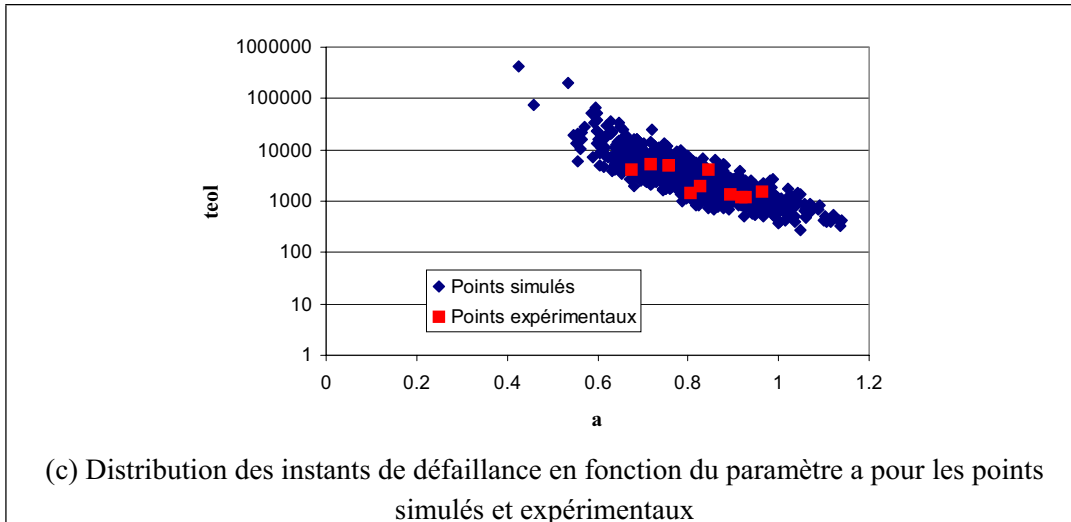


Figure 85 : Distribution des instants de défaillance en fonction du paramètre a

La distribution cumulée simulée $F_{an}(a, m)$ et la répartition de l'erreur entre les distributions cumulées expérimentale et simulée sont tracées respectivement en figure 85(a) et 85(b). L'erreur maximale entre les deux distributions est de 0,4% soulignant la justesse des hypothèses de départ, notamment sur le lissage et le calcul des couples (a, m) de départ. Malgré le fait que cette erreur soit très faible et donc que cette méthode tend vers une distribution non biaisée, l'inconvénient majeur de celle-ci est qu'elle n'autorise pas la quantification certaine du niveau de confiance à accorder aux résultats pour une population virtuelle de taille donnée. Cependant, le nuage de points tirés prend en compte tous les points expérimentaux de notre étude. Grâce aux 1024 couples virtuels supplémentaires (a, m) calculés par un tirage de Monte-Carlo, le nombre de FITs des AOSs peut alors être extrapolé pour des conditions opérationnelles de 25°C et 200mA.

Le critère de défaillance étant défini par l'augmentation de 20% de $I_{th@0,6mW}$ des composants sous tests dont le facteur d'accélération est supérieur à 355. Rappelons que le facteur d'accélération (AF) lié à l'extrapolation sur une loi en puissance dépend de la valeur de m et s'exprime comme :

$$AF = \exp\left[\frac{Ea}{mk} \left(\frac{1}{T_{utilisation}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right]$$

La figure 86 montre la distribution cumulée de composants défaillants en fonction des instants de défaillance de chacun des composants (simulés et expérimentaux). Il est à noter que les premiers instants de défaillance peuvent être considérés comme relativement pessimistes pour deux raisons :

- En réalité, le facteur d'accélération dépend de la valeur de m pour chaque couple. A titre d'exemple, le facteur d'accélération calculé à partir de la valeur moyenne de m ($\langle m \rangle = 0,83$) des 10 couples du lot G1 conduirait à une valeur de 1158.
- Nous faisons l'hypothèse que la loi at^m est valable sur la durée de vie opérationnelle du composant. Ceci pouvant être différent en fonction des mécanismes de dégradation (saturation

apparaissant au cours du vieillissement). Cependant l'apparition du point d'inflexion est très disparate dans le temps. Une solution consisterait à utiliser une loi logarithmique ayant apportée un élément de réponse sur les technologies MOS submicroniques mais avec des temps de vieillissement bien inférieurs (qqes heures) à ceux utilisés pour les AOSs [94].

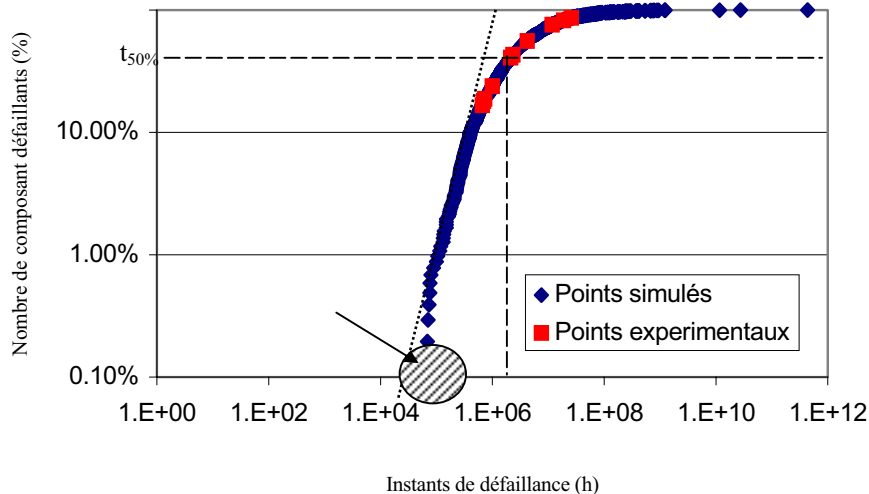


Figure 86 : Distribution des instants de défaillance extrapolés en conditions opérationnelles (AF = 355 – N = 1024 échantillons)

La figure 86 permet d'estimer les premiers instants de défaillance proches de 50000h de fonctionnement (équivalent à 5ans) et de constater que 50% de composants sont défaillants après $20 \cdot 10^6$ h (équivalent à 230ans). **Le taux de défaillance extrapolé atteint une valeur proche de 140 FITs pour des conditions d'utilisation de 25°C et 200mA sur une durée de 15ans.** Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, le nombre de FITs estimé pour les diodes laser BRS, obtenu par ALCATEL Optronics est de l'ordre de 100FITs dans les conditions d'utilisation de 25°C/40mW et en considérant que le critère de fin de vie des composants sous test est l'augmentation de 15% du courant de seuil. La technologie AOS semble donc prometteuse dans le cadre des conditions d'utilisation préalablement définies.

5/ CONCLUSION

Ce troisième chapitre s'est attaché à reporter le protocole expérimental complet de notre travail focalisé en particulier sur l'extraction et l'analyse de signatures de défaillance. L'intérêt du suivi des caractéristiques électro-optiques mais aussi les limites de notre méthode d'étude ont été mis en lumière. Les AOSs testés ont été processés entre 1997 et 2001 selon un procédé MBE/MOCVD. La longueur totale des puces est comprise entre 700µm et 1200µm, la longueur de la zone active de l'ensemble des puces est de 600µm. Les différents lots étudiés sont constitués de 8 à 10 échantillons au maximum.

Les très longues durées de vie, associées aux très faibles taux de défaillance, atteintes par les composants optoélectroniques actuels rendent de plus en plus difficile l'évaluation expérimentale effectuée usuellement pour caractériser la fiabilité : durée de vie moyenne, ou médiane, taux de défaillance. Une approche statistique originale utilisant le tirage Monte-Carlo a donc été proposée pour la prévision de la distribution de durées de vie de composants AOSs n'atteignant pas le critère de défaillance défini, à partir de l'extrapolation de lois analytiques sur les paramètres analysés au cours des vieillissements.

Les résultats expérimentaux les plus significatifs de ce chapitre sont les suivants :

- ✓ Les conditions de déverminage des AOSs ont été établies grâce aux tests de contraintes échelonnées : 50kA/cm², 100°C et 32h.
- ✓ Les conditions limites de test en vieillissement accéléré sont : 50kA/cm², 100°C.
- ✓ La limite des premiers instants de défaillance est de 5.10⁴h de fonctionnement (équivalent à 5 ans) et le taux de défaillance estimé sur cette technologie est de 140 FITs dans les conditions du profil de mission empiriquement défini par une densité de courant de 40kA/cm² et une température d'utilisation de 25°C. Le critère de fin de vie des composants sous test correspond à l'augmentation de 20% du pseudo-courant de seuil (I@0,6mW). L'estimation de ce taux de défaillance résulte d'un certain nombre d'hypothèses :
 - la cinétique de dérive des paramètres analysés sur un AOS peut être décrite, en première approximation, par une loi empirique évoluant en at^m où a et m dépendent du lot de composants et des conditions de vieillissement avec une valeur moyenne de m proche de 0,8 et une énergie d'activation des dégradations de 0,75 eV (valeur proche des diodes laser BRS),
 - la distribution du coefficient (a) obéit à une loi log-normale,
 - la corrélation entre les coefficients a et m expérimentaux peut se mettre sous la forme : $m=\alpha\ln(a)+\beta$,
 - la loi at^m est supposée extrapolable sur la durée de vie opérationnelle du composant.

La limite essentielle est caractérisée par :

- ✓ Une difficulté à interpréter l'évolution des caractéristiques électro-optiques, corrélée par exemple à l'existence d'une phase de stabilisation technologique observée pour l'ensemble de ces composants. Il a été mis en évidence qu'il n'existe pas de relation absolue entre une forte variation initiale (>10%) après 22h de déverminage et une forte dérive (>20%) après 1500h de vieillissement quel que soit le paramètre analysé (P@200mA ou I@0,6mW).

Les hypothèses émises quant à la localisation et à l'origine des mécanismes de dégradation sont basées sur les évolutions des caractéristiques I(V) :

- ✓ La courbe I(V) présente un dédoublement entre 0,3V et 0,9V, une diminution de la puissance optique et une augmentation du pseudo-courant de seuil : *L'hypothèse d'une dégradation de la couche active est alors retenue*. La cause probable est, si l'on se réfère aux résultats de la synthèse bibliographique exposée en début de chapitre, la présence de centres de recombinaison non radiatifs aux bords de la zone active, liés à des défauts cristallins dus à la gravure chimique permettant la préparation de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P).
- ✓ La courbe I(V) présente un dédoublement entre 0,1V et 0,3V : *L'hypothèse d'une dégradation de l'homojonction latérale InP(N)/InP(P) est alors retenue*. De plus, si l'on se réfère aux résultats de la synthèse bibliographique, la présence de centres de recombinaison non radiatifs à l'interface InP(N)/InP(P), liés à des défauts cristallins dus à la gravure chimique permettant la préparation de la surface des matériaux InP(N) et InGaAsP avant la reprise d'épitaxie avec le matériau InP(P) est également retenue comme hypothèse de dégradation mais elle n'a cependant pas été démontrée.
- ✓ La courbe I(V) présente la caractéristique d'une résistance et non plus d'une diode signifiant la dégradation catastrophique à caractère soudain des AOSs. La cause probable de cette dégradation correspond à un problème lié à la dégradation des miroirs des puces.

Le potentiel de notre méthode d'analyse repose sur :

- L'extraction de trois signatures de défaillance distinctes grâce à la caractéristique courant-tension (I(V) dédoublés et I(V) identique à celui d'une résistance), pour l'ensemble des composants AOSs sous test permettant ainsi de généraliser les résultats de l'analyse du mode de vieillissement d'un composant à tous ceux ayant eu un comportement sous test identique.
- L'estimation possible du nombre de FITs, pour un nombre restreint de composants de qualification et une durée de test faible (lot G1, 10 puces, 1500h de test), permettant ainsi de répondre aux deux problématiques actuelles conjointes des niveaux de fiabilité des composants optoélectroniques, illustrées dans le chapitre 1 : la stabilisation des procédés de fabrication et de report (taux de défaillance extrêmement faibles dans la zone de vie utile du composant) et l'optimisation et réduction des tests de qualification : réévaluation du compromis "nombre de composants/durée de tests accélérés" pour satisfaire à l'obtention des niveaux de défaillance requis.

L'ensemble des résultats obtenus dans le chapitre 3 est synthétisé en figure 87.

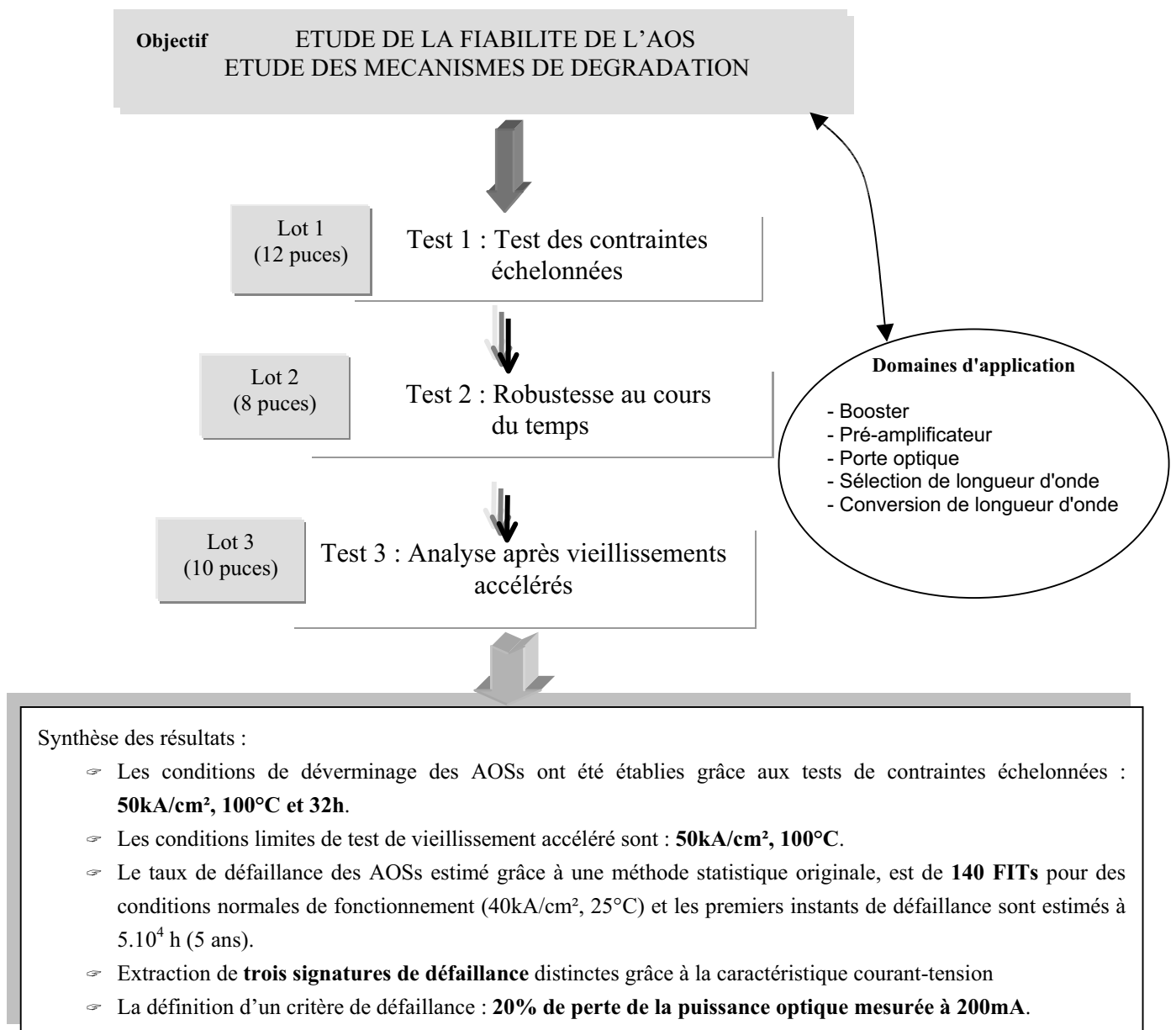


Figure 87 : Synthèse de l'étude expérimentale sur la technologie AOS 1,55µm transférée

Chapitre 4

Contribution des simulations physiques 2D
à l'analyse des dégradations d'un AOS

1/ INTRODUCTION

L'ensemble des travaux, exposés jusqu'ici, s'est focalisé sur l'évolution des caractérisations électriques et optiques, après l'application d'un champ de contraintes accélérées. L'objectif est l'identification des mécanismes de dégradation des AOSs 1,55 μ m reportés sur embase AlN et d'estimer leur fiabilité.

L'intégration actuelle de la fiabilité est directement liée à la conception et à la maîtrise des procédés vis à vis des étapes critiques pouvant générer des défauts et doit prendre en compte les modélisations physiques des dégradations. Bien que la base reste expérimentale, les simulations physiques ou fonctionnelles, sont devenues des étapes indispensables. Dans le cadre d'une étude de fiabilité d'une filière technologique en phase de développement, la modélisation physique s'inscrit dans le prolongement des analyses de défaillance avec pour objectif de quantifier l'impact d'une dégradation des propriétés physiques des matériaux sur les caractéristiques électriques des composants.

La méthodologie suivante a donc été mise en place :

1. Evaluation technologique et diagnostic de défaillance des AOSs dégradés menée grâce à un protocole d'analyses de défaillance afin de vérifier les hypothèses émises relatives aux mécanismes de dégradation de ces composants proposées dans le chapitre 3.
2. Modéliser l'AOS avec un double objectif :
 - caractériser les mécanismes physiques mis en jeu (transport électrique),
 - proposer une interprétation des défaillances observées au travers, par exemple, d'une évolution de paramètres physiques uniquement accessibles à partir de simulations numériques compte tenu de la relation étroite entre la physique de fonctionnement du dispositif et les étapes de fabrication.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons :

- ☞ effectué, dans un premier temps, des analyses de défaillance spécifiques pour valider les hypothèses faites dans le chapitre précédent quant à l'identification et à la localisation des dégradations révélées au cours tests de vieillissement accélérés,
- ☞ puis, procédé à l'évaluation du logiciel de simulation par éléments finis ISE guidée par les spécificités d'un AOS : définition de la structure bi-dimensionnelle (2D), précision du jeu des paramètres physiques en entrée, équations des modèles de transport, optimisation du maillage aux interfaces, ...
- ☞ enfin, mis en évidence l'apport des modélisations physiques à l'analyse des mécanismes de dégradation identifiés sur cette filière en particulier liés au procédé de fabrication (qualité de la reprise d'épitaxie).

2/ DESCRIPTION ET RESULTATS DES ANALYSES DE DEFAILLANCE

2.1/ Contexte des techniques d'analyse utilisées

Le chapitre 3 a permis de mettre en évidence plusieurs signatures de défaillance des AOSs transférés lors de l'étude expérimentale. Des investigations relatives aux défaillances de ces composants, survenues après les vieillissements accélérés, ont été réalisées dans deux Laboratoires distincts : le Laboratoire d'Analyse d'ALCATEL Optronics et le Département CROQ de l'Institut d'Electronique Fondamental (IEF) de l'Université Paris-Sud. Trois techniques d'analyse ont été appliquées :

- L'électroluminescence et la cathodoluminescence par des moyens propres à ALCATEL Optronics [41, 85].
- La mesure du spectre d'électroluminescence, par l'intermédiaire d'un banc spécifique en température développé par l'IEF [80, 81, 82, 83, 84].

Dans les domaines de haute technologie (microélectronique, optoélectronique, aéronautique, mécatronique, métallurgie, ...), les exigences de fiabilité des matériaux s'accroissent. Un contrôle de la morphologie, d'intégrité de la structure, de la composition des surfaces, interfaces et couches minces est devenu indispensable. Les techniques d'analyse de défaillance, pouvant être appliquées aux composants de type puce nue, sont nombreuses : SEM, TEM, EBIC, SIMS, Elles ont, pour objectif principal, la localisation et l'identification de l'origine de défauts donnant lieu aux mécanismes de dégradation des composants électroniques. A titre d'exemple, les investigations en utilisant la microanalyse ionique de type SIMS permet, par exemple, de vérifier l'absence de mécanisme de diffusion métallique tel que la diffusion d'or dans la couche de contact InGaAs existant dans les diodes laser BRS (cf. chapitre 1). Cependant, l'ensemble de ces techniques d'analyse présente de nombreux inconvénients. Elles sont complexes, et la mise en œuvre d'une préparation minutieuse des échantillons, constitue une étape clé, mais très difficile. Le risque de dégradation de l'échantillon au cours de la préparation rend l'interprétation incertaine quant à l'origine du défaut. Dans la suite de ce paragraphe, l'électroluminescence, la cathodoluminescence et la mesure du spectre d'électroluminescence seront décrites, puis les résultats de chacune d'elles en particulier sur les AOSs du lot 1, ayant subi les tests sous contraintes échelonnées décrits dans le chapitre 3, seront exposées.

2.2/ Description des techniques d'analyse utilisées

2.2.1/ Electroluminescence

La technique d'électroluminescence (EL) consiste à créer des paires électrons-trous dans l'échantillon analysé en alimentant en courant ce dernier. Le signal lumineux résultant des recombinaisons radiatives des paires électrons-trous dans l'échantillon est alors collecté par un détecteur Germanium refroidi à l'azote liquide et fourni une image de l'échantillon par la récupération du signal lumineux. L'utilisation de cette technique permet, grâce à la comparaison du signal lumineux avant et après dégradation, de constater un changement de ce signal et donc d'en déduire une dégradation des zones de luminescence de l'échantillon analysé. Dans le cas des AOSs reportés Pup, la zone active émettant à $1,55\mu\text{m}$ est située sur le dessus de la puce. Après le retrait de la métallisation de l'électrode, la zone active est localisée à moins de $1\mu\text{m}$ de la surface ; cette faible distance permet donc de collecter le signal lumineux de la zone active avec un excellent rapport signal sur bruit sans autre préparation chimique de l'échantillon testé [41]. **La mise en évidence d'une dégradation de la zone active (ruban) du composant observé est alors identifiable, et les zones noires éventuelles correspondent à des défauts importants aux interfaces.**

2.2.2/ Cathodoluminescence

La technique de cathodoluminescence (CL) consiste à créer des paires électrons-trous par interaction entre des électrons à haute énergie cinétique (source) et un cristal semiconducteur (échantillon). Les recombinaisons après diffusion sont radiatives, donnant lieu à un phonon ou à un photon. Les photons recueillis correspondent à des longueurs d'onde dans le visible ou l'infrarouge provenant d'une profondeur de $0,3$ à $1\mu\text{m}$. Le signal lumineux résultant des recombinaisons radiatives des paires électrons-trous dans le cristal est collecté par un photomultiplicateur, photodétecteur et permet d'imager l'échantillon par balayage du faisceau d'électrons. On réalise soit des images, avec ou sans filtre de radiation, soit des spectres caractéristiques d'émission des points analysés ou des lignes profil. L'utilisation d'électrons à haute énergie permet d'exciter la plupart des cristaux semiconducteurs y compris ceux dont la largeur de bande interdite est élevée. La taille du spot du faisceau d'électrons primaires est de l'ordre de quelques nanomètres, avec les technologies actuelles de condensation de faisceau, conférant à cette technique une très bonne résolution spatiale (figure 88). Par conséquent, on utilise fréquemment un faisceau d'électrons provenant d'un équipement MEB comme source d'excitation. On peut ainsi disposer dans le même instrument de plusieurs techniques d'imagerie (électrons secondaires, rétrodiffusés...). De plus, cette technique a l'avantage d'être sans contact. L'échantillon est placé au foyer image d'un miroir elliptique de façon à concentrer les photons sur le détecteur placé au foyer image [41, 85]. Tout phénomène de création, mouvement ou recombinaison ainsi qu'une modification de la transparence de l'échantillon, est susceptible de provoquer un contraste avec une sensibilité qui serait invisible sur une image en sonde de Castaing (technique WDX). **On**

peut généralement mettre en évidence des défauts cristallins, des couches de surface ou des variations locales de dopant.

Dans le cas des AOSs reportés Pdown, il semble donc possible de détecter une dégradation de la zone active de ce composant. En effet, après un retrait de la métallisation de l'électrode et un traitement chimique afin d'enlever les couches d'InP d'épaisseur proche de $4\mu\text{m}$, recouvrant, la zone active, le signal lumineux de la zone active, émettant à $1,55\mu\text{m}$, peut alors être collecter [41, 85]. De plus, la présence de dislocations proches de la zone active dans un échantillon dégradé se traduit en général par une diminution du signal collecté par rapport à un échantillon de référence.

La présence de dislocations est également mise en évidence par une tâche noire (défaut dans le plan perpendiculaire à la surface) ou par une ligne noire (défaut dans le plan parallèle à la surface) sur la zone de luminescence.

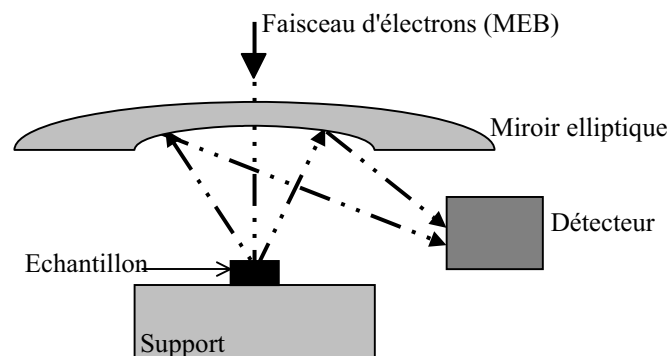


Figure 88 : Dispositif classique utilisé en cathodoluminescence

2.2.3/ Spectre d'électroluminescence

Cette méthode d'analyse est identique, dans son approche, à la cathodoluminescence en utilisant, en plus des filtres ou un spectromètre autorisant la détection du signal spectralement résolu ; c'est à dire que l'on obtient un signal de luminescence proportionnel à la longueur d'onde du signal émis par cet échantillon (figure 89). Cette technique a été développée et mise en œuvre à l'IEF avec le dispositif suivant [81, 82] :

- ⊖ Une détection synchrone pour maximiser le rapport signal/bruit.
- ⊖ Un générateur d'impulsions : source de l'impulsion électrique fournie à l'échantillon analysé avec une voie de synchronisation externe vers la détection synchrone. La fréquence des impulsions est de l'ordre de quelques dizaines de Hz (30Hz) pour rester dans la gamme de fréquence du détecteur germanium.
- ⊖ Un détecteur germanium refroidi à l'azote liquide couvrant la bande de 900nm à plus de 1700nm.
- ⊖ Un monochromateur de 460mm de focale avec un réseau de Bragg intégré de 600traits/mm.
- ⊖ Un objectif, un miroir et une lentille définis pour collecter le maximum de signal optique vers la fente d'entrée du monochromateur.

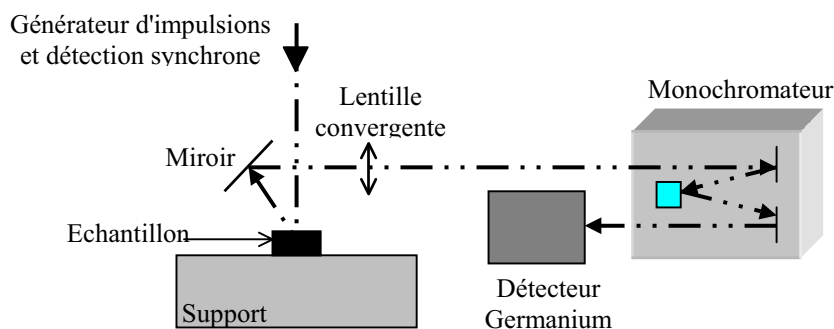


Figure 89 : Dispositif utilisé pour la mesure du spectre d'électroluminescence à l'IEF [81,82]

Cette méthode d'analyse nécessite de garantir un taux de couplage identique lors des mesures en initial et après vieillissement et, suivant le report des composants analysés, un traitement chimique différent (retrait de la métallisation pour les composants reportés Pup et retrait de la métallisation sous plasma pour les composants reportés Pdown). **La détection d'une dégradation de la zone active du composant testé est uniquement possible si un décalage en longueur d'onde du signal émis par la cavité laser de ce composant est observé.**

2.3/ Résultats des analyses de défaillance

⇒ *Historique et caractéristiques des puces testées*

Un historique des composants expertisés est présenté dans le tableau 16. Dans un premier temps, il est nécessaire d'analyser également des composants n'ayant subi aucun test de vieillissement, ces composants constitueront les références de notre analyse. Afin de préciser le contexte de l'analyse de défaillance des AOS du lot 1, les conditions de test, l'évolution de leurs caractéristiques I(V) ainsi que les hypothèses émises, relatives à leurs mécanismes de dégradation, sont rappelées ci-dessous. Le tableau 16 rassemble les trois modes principaux de défaillance observés sur les composants du lot 1. Rappelons que dans la conclusion du chapitre 3, nous avons mis en évidence que :

- Le premier mode de défaillance serait associé à une dégradation de l'homojonction latérale InP/InP des AOSs 89, 110 et 111. Ces composants ne semblent pas avoir subi de dégradation de leur zone active, aucune analyse de défaillance n'a été réalisée sur ces composants.
- Le second mode de défaillance observé peut être relié à une dégradation de la zone active pour les composants 99, 100, 104, 105 et 107. Ces composants sont donc ceux sur lesquels s'est portée notre attention et les résultats sont présentés dans ce paragraphe.
- Le troisième mode de défaillance donne lieu à une dégradation catastrophique des composants 90, 92 et 109 ; ils seront également analysés car leur mode de défaillance pourrait être associé à une dégradation soudaine de la zone active.

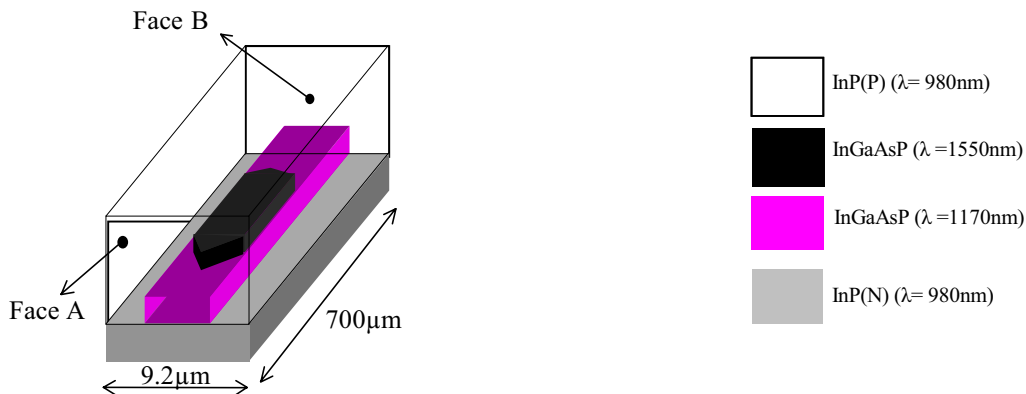
REFERENCES	Numéro	Report	Caractéristique P(I)		Caractéristique I(V)	
	206	Pup	Popt _{0h} @200mA = 2,8mW		Initiale identique aux I(V) initiaux de tous les AOSs	
	207	Pup				
	208	Pdown				
	209	Pdown				
	210	Pdown				
PUCES DEGRADEES	Numéro	Report	Type des tests accélérés	Evolution de Popt@200mA	Evolution I(V)	Localisation de la zone de dégradation sur I(V)
	99	Pdown	Contraintes échelonnées en température	Perte de 11% après 250h	Augmentation faible du courant entre 0,3V et 0,8V	Dégradation de D2 (zone active)
	104	Pup	Contraintes échelonnées en température	Perte de 9% après 500h	Idem	Dégradation de D2 (zone active)
	107	Pup	Contraintes échelonnées en courant	Perte de 11% après 500h	Idem	Dégradation de D2 (zone active)
	100	Pdown	Contraintes échelonnées en température	Perte de 6% après 250h	Idem	Dégradation de D2 (zone active)
	90	Pdown	Contraintes échelonnées en température	Perte de 3,5% après 168h	Caractéristique d'une résistance et non plus d'une jonction	Dégradation catastrophique à caractère soudain
	92	Pdown	Contraintes échelonnées en température	Perte de 3,5% après 168h	Idem	Dégradation catastrophique à caractère soudain
	109	Pup	Contraintes échelonnées en température	Perte de 3,5% après 168h	Idem	Dégradation catastrophique à caractère soudain

Tableau 16 : Caractéristiques des puces analysées

L'objectif principal des analyses de défaillance, **menées sur les composants du lot 1**, est donc de montrer une possible relation entre les dérives des caractéristiques électro-optiques et les résultats des techniques d'électroluminescence et de cathodoluminescence.

➤ **Résultats des techniques d'électroluminescence et de cathodoluminescence**

Comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs méthodes d'analyse de défaillance ont été menées sur les puces du lot 1 (99, 100, 104, 105, 107, 90, 92 et 109) et sur les puces de référence (206, 207, 208, 209 et 210). Les résultats de l'observation en microscope optique, de l'analyse par électroluminescence pour les puces montées Pdown et par cathodoluminescence pour les puces montées Pup sont respectivement présentés sous la forme de trois tableaux 17, 18, 19. La figure 90 montre de façon schématique, les faces latérales A et B de chaque AOS.



Conditions d'analyse :

InP (P) (λ=980nm) : possible visualisation de cette couche car au-dessus de la couche active

InGaAsP (λ=1550nm) : possible visualisation de la couche active après démétallisation et traitement chimique afin d'enlever les couches d'InP d'épaisseur proche de 4µm

InGaAsP (λ=1170nm) : pas d'étude de la couche passive

InP(N) (λ=980nm) : pas d'étude de la couche substrat

Figure 90 : Vue tridimensionnelle d'un AOS

Les observations, effectuées par électroluminescence (EL) et par cathodoluminescence (CL), présentées ci-dessous, correspondent à des vues de dessus de la totalité de la puce observée.

Numéro de puce	Observations latérales sous microscope optique	Résultats par EL	Résultats par CL	Remarques
206 (Pup)	<p>Face A</p> <p>Face B</p>	-----	<p>[Préparation pour CL => plasma 7 mn]</p> <p>Signal (image) sur toute la longueur de la puce mais une seule λ (InP) localisée au centre du ruban</p>	Ceci démontre que la préparation de l'échantillon effectuée pour enlever les couches d'InP au-dessus de la couche active n'est pas suffisante





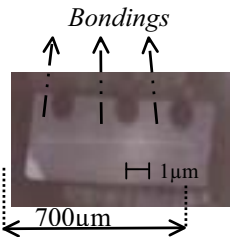
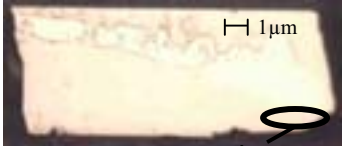
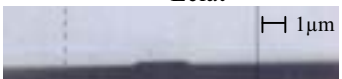
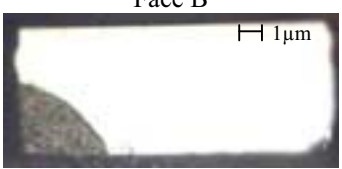


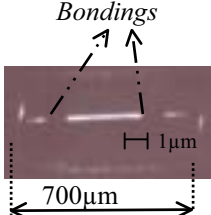
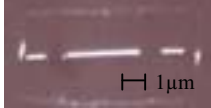



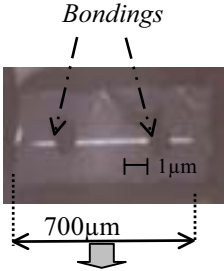
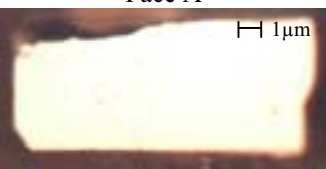
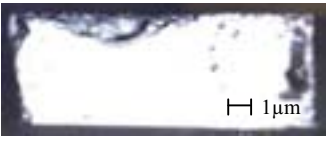
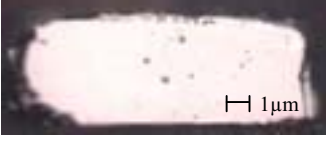
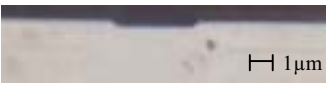
<p>207 (Pup)</p>	<p>Face A</p>  <p>Face B</p> 	<p>-----</p>	<p>-----</p>	<p>Faces observées au microscope optique : éclat observé au niveau du guide actif</p>
<p>208 (Pdown)</p>	<p>Face A (MEB)</p>  <p>Face B (MEB)</p> 	<p>Signal faible à 450 mA</p> <p><i>Bondings</i></p> 	<p>-----</p>	<p>Faces observées au MEB : aucun éclat observé au niveau du guide passif</p>
<p>209 (Pdown)</p>	<p>Face A</p>  <p>Eclat</p>  <p>Face B</p>  	<p>Pas de signal</p>  <p>Identique à celle d'une résistance après plasma (puce endommagée après préparation)</p>	<p>-----</p>	<p>Faces observées au microscope optique : "bavure de brasure" observée</p>
<p>210 (Pdown)</p>	<p>-----</p>	<p>Signal continu à 100 mA</p> <p><i>Bondings</i></p>  <p>à 150 mA</p> 	<p>-----</p>	<p>Augmentation de la puissance optique émise quand le courant augmente => relation de proportionnalité entre la luminescence et le courant</p>

Tableau 17 : Observations menées sur les puces de référence

Numéro de puce	Observations latérales sous microscope	I(V)	Résultats EL	Résultats CL	Remarques
99 (Pdown)	<p>Face A</p>  <p>Face B</p>  <p>Eclat</p> 	dédoubleée entre 0,3V et 0,8V	<p>Bondings</p>  <p>Signal intense et continu à 100mA sur toute la zone active (600 μm)</p>	-----	Faces observées au microscope optique : éclats observés en bords de puce
104 (Pup)	<p>Face A</p>  <p>Face B</p> 	dédoubleée entre 0,3V et 0,8V	-----	<p>[Préparation pour CL => plasma 5 mn]</p> <p>Signal (image) sur toute la longueur mais spectre une seule λ(InP)</p>	Faces observées au microscope optique : éclats observés en bords de puce et touchant le guide actif
107 (Pup)	<p>Face A</p>  <p>Face B</p> 	dédoubleée entre 0,3V et 0,8V	-----	-----	Faces observées au microscope optique : éclats observés au niveau du guide actif

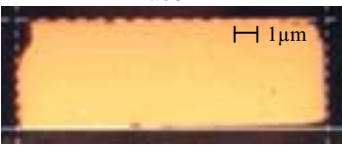
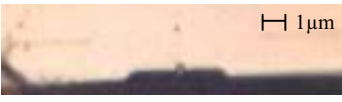

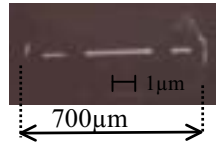
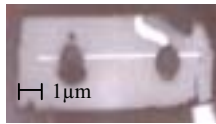
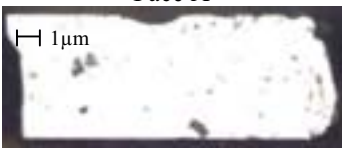
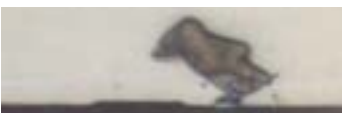
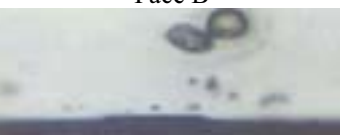


<p>100 (Pdown)</p>	<p>Face A</p>  <p>1µm</p>  <p>1µm</p> <p>Face B</p>  <p>1µm</p>	<p>dédoublee entre 0,3V et 0,8V</p>	<p>Signal intense et continu à 100mA sur toute la zone active.</p> <p>face B</p>  <p>1µm 700µm</p>  <p>1µm</p>	<p>-----</p>	<p>Faces observées au microscope optique : éclats observés au niveau du guide actif</p>
------------------------	--	---	--	--------------	---

Tableau 18 : Observations des puces présentant un dédoublement de la caractéristique I(V)
entre 0,3V et 0,8V

Numéro de puce	Observations latérales sous microscope	I(V)	Résultats EL	Résultats CL	Remarques
<p>90 (Pdown)</p>	<p>Face A</p>  <p>1µm</p>  <p>Face B</p>  <p>1µm</p>	<p>Identique à celle d'une résistance</p>	<p>-----</p>	<p>-----</p>	<p>Faces observées au microscope optique : éclats observés au niveau du guide actif</p>
<p>92 (Pdown)</p>	<p>Face A</p>  <p>Face B</p>  <p>1µm</p>	<p>Identique à celle d'une résistance</p>	<p>-----</p>	<p>-----</p>	<p>Faces observées au microscope optique : éclats observés au niveau du guide actif</p>



109 (Pup)	<p style="text-align: center;">Face A</p>  <p style="text-align: center;">Face B</p> 	Similaire à I(V) de tous les AOSs testés	-----	-----	Puce (déclarée H.S) mais elle fonctionne ↓ remise sous test
--------------	---	---	-------	-------	--

Tableau 19 : Observations des puces présentant une caractéristique I(V) identique à celle d'une résistance

D'après les tableaux 17, 18 et 19, deux constatations générales peuvent être établies :

1. L'observation au microscope optique des puces du lot 1 dégradées montre que ces puces ont subi des agressions mécaniques. Différents éclats sont constatés et la répercussion de ceux ci, sur le fonctionnement et la dégradation de ces puces, est analysée dans la suite de ce paragraphe. Ces éclats sont essentiellement reliés à la manipulation et à la mise sous test de ces échantillons. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, les premiers essais sur AOSs ayant nécessité une adaptation spécifique des moyens de mesure et de test, les premières mesures sous pointes ont pu endommager les composants.
2. L'observation au microscope optique de l'ensemble des puces a montré que le décochement observé sur tous les miroirs de ces puces est utile pour localiser la zone active ; elle est centrée juste au-dessus du décochement observé facilitant ainsi le couplage en espace libre avec une fibre optique monomode de 5 μm de diamètre de cœur.

L'analyse des différents résultats des tableaux 17, 18 et 19 permet d'effectuer plusieurs observations :

☞ *Puces de référence*

- ❑ Pour la puce de référence 206, reportée Pup, l'observation des miroirs (face A et face B) ainsi que sa caractéristique I(V) ne présentent aucune dégradation. Par contre, après la préparation chimique de cette puce pour la cathodoluminescence, seul le signal luminescent de l'InP a été collecté. Ce phénomène sera analysé dans la suite de ce paragraphe.
- ❑ Pour la puce de référence 207, reportée Pup, l'observation des miroirs (face A et face B) révèle un éclat sur la face B de ce composant se situant près de la zone active qui pourrait donner lieu à une diminution des performances de celui-ci. Néanmoins sa caractéristique I(V) ne présente aucune dégradation.
Or, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, une diminution des performances d'un AOS entraîne une dégradation de ses caractéristiques électro-optiques. Par

conséquent, cet éclat ne peut donc pas être relié à une dégradation de la puce considérée. De plus, cette puce n'a pas été préparée pour la cathodoluminescence dans l'objectif de garder un échantillon de référence Pup non dégradé.

- Pour la puce de référence (208), reportée Pdown, l'observation des miroirs (face A et face B) au MEB ne montre aucune dégradation. Par contre d'après sa caractéristique $I(V)$, cette puce est en court-circuit.

En effet, la dégradation catastrophique de la caractéristique $I(V)$, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3 pour différents composants, est équivalente à la mise en court-circuit de la puce considérée. De plus, on constate un signal faible en électroluminescence de la zone active à 450mA. Le courant d'alimentation nécessaire à obtenir un signal est donc au-delà de la limite du courant d'alimentation maximum admissible par un AOS ($>$ à 320mA) [42, 43]. Ce phénomène confirme donc le fait que la puce 208 soit en court-circuit et sera rejetée comme puce de référence.

- Pour la puce de référence (209), reportée Pdown, l'observation des miroirs (face A et face B) ainsi que sa caractéristique $I(V)$ ne présentent aucune dégradation.

Seule une remontée de brasure est constatée sur la face B de la puce. Mais, cette trace n'étant pas située au niveau de la zone active, elle ne semble pas pouvoir être à l'origine d'un mécanisme de dégradation relié à cette zone. Par contre, après la préparation chimique (retrait de la métallisation) de cette puce pour l'électroluminescence, aucun signal optique n'a été détecté. Cette puce semble par conséquent avoir été dégradée lors de la préparation chimique sous plasma.

- Pour la puce de référence (210), reportée Pdown, l'observation des miroirs (face A et face B) ainsi que sa caractéristique $I(V)$ ne présentent aucune dégradation. De plus, on constate un fort signal en électroluminescence de la zone active à 100mA et proportionnel à la valeur du courant d'alimentation. Ces signaux constituent donc une référence pour la suite de cette analyse.

☞ *Dédoublage de la caractéristique $I(V)$ entre 0,3V et 0,8V*

- Les caractéristiques $I(V)$ des puces 99 et 100, reportées Pdown, présentent un dédoublement entre 0,3V et 0,8V. Une préparation chimique de ces échantillons pour l'électroluminescence est alors effectuée. On constate alors un fort signal en électroluminescence de la zone active de deux composants (sauf au niveau des bondings des puces) à 100mA. La méthode d'analyse par électroluminescence ne permet donc pas, pour ces puces, de conclure sur l'hypothèse de dégradation effectuée au chapitre 3. Afin de compléter cette analyse, une analyse du spectre d'électroluminescence a été réalisée, les résultats sont présentés dans la suite de ce

paragraphe. De plus, l'observation des miroirs (face A et face B) montre un éclat sur la face B de la puce 99 et des éclats sur les faces A et B de la puce 100. Les éclats de la puce 100 étant situés au niveau de la zone active, ils peuvent être à l'origine d'un mécanisme de dégradation relié à la zone active car ils sont susceptibles de provoquer une diminution de la puissance optique de sortie par un phénomène d'emballement thermique (COD) lié à la modification des coefficients de réflexion des miroirs.

Au contraire, l'éclat de la puce 99 n'étant pas proche de la zone active, il ne semble pas être lié au mécanisme de dégradation de la puce.

Néanmoins, d'après le tableau 16, la puissance optique mesurée à 200mA de ces deux puces après les tests de vieillissement détaillés dans le chapitre 3, a diminué de seulement 10%. L'hypothèse de la dégradation des miroirs provoquant un emballement thermique (COD) ne semble pas être validée. La dégradation des miroirs des puces 99 et 100 n'est donc pas liée au dédoublement I(V) pour une polarisation comprise entre 0,3V et 0,8V.

- La caractéristique I(V) de la puce 104, reportée Pup, présente un dédoublement entre 0,3V et 0,8V. Une préparation chimique de cet échantillon pour la cathodoluminescence est alors effectuée.

Cette analyse montre, comme pour la puce de référence 206, uniquement le signal luminescent de l'InP. De plus, l'observation des miroirs (face A et face B) révèle des petits éclats sur la face B de ce composant se situant près de la zone active. Comme pour la puce 100, ces éclats ne sont pas associés à une forte diminution de la puissance optique de sortie de ce composant (inférieure à 10% après 500h de test de vieillissement) et ne sont donc pas liés au dédoublement I(V) pour une polarisation comprise entre 0,3V et 0,8V.

- La puce 107, reportée Pup, n'a pas subi d'analyses dans l'objectif de préserver cette puce pour disposer de cet échantillon pour d'éventuels essais complémentaires.

☞ *Puces en court-circuit*

- Les caractéristiques I(V) des puces 90 et 92, reportée Pdown, montrent que ces deux puces sont en court-circuit. L'observation au microscope montre que ces deux puces ont des éclats importants sur les deux miroirs au niveau de la zone active. Les dégradations soudaines de ces composants sont donc probablement reliées à la présence de ces éclats.
- Pour la puce 109, reportée Pup, contrairement à la mesure après vieillissement, sa caractéristique I(V) ne présente aucune dégradation.

Une erreur de mesure de caractéristique I(V) a donc été effectuée lors de la dernière reprise de mesure des tests de vieillissement. Cette erreur est probablement due à la mise en court-circuit de la puce par un bonding provoquant lui-même le court-circuit entre la puce et les pistes de l'embase permettant d'alimenter ce composant. Nous avons donc décidé de remettre cette puce sous test.

➤ Apport des mesures spectrales

Les caractérisations par électroluminescence de AOSs ont été réalisées à l'IEF à température ambiante pour :

- ☞ caractériser le spectre d'émission de ces composants,
- ☞ mesurer le décalage et l'étalement de la gamme d'émission.

Le spectre optique de l'AOS 107, après 500h de contraintes échelonnées en courant, et le spectre de l'AOS de référence 210 sont présentés pour un courant d'alimentation de 50mA et un courant d'alimentation de 200mA respectivement en figures 91 et 92. Pour l'AOS 107, il est à noter que seule la longueur d'onde centrale est connue initialement ($\lambda_c = 1550\text{nm}$). De plus, lors de notre étude expérimentale, les spectres n'ont pas fait l'objet d'un suivi régulier mais les caractéristiques spectrales des AOSs initiales et après vieillissement sont exploitées ci-dessous dans le cadre spécifique de l'analyse de défaillance détaillée dans ce chapitre.

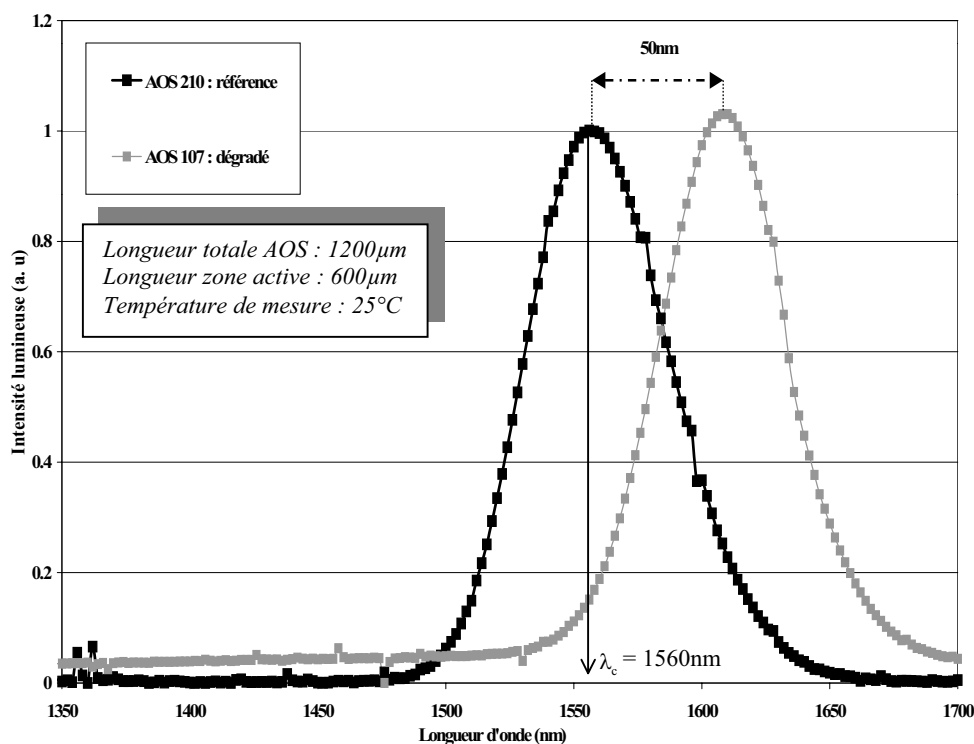


Figure 91 : Spectres d'électroluminescence expérimentaux du AOS de référence (210) et du AOS dégradé (107) pour un courant d'alimentation de 50mA

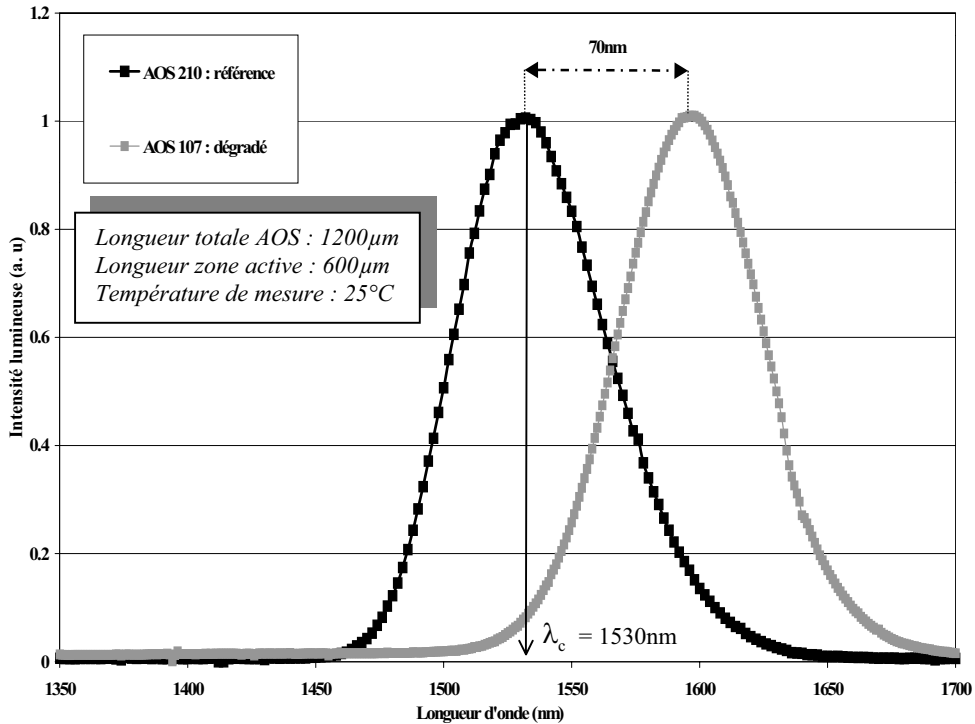


Figure 92 : Spectres d'électroluminescence expérimentaux du AOS de référence (210) et du AOS dégradé (107) pour un courant d'alimentation de 120mA

Les figures 91 et 92 montrent que lorsque le courant augmente dans l'AOS, le spectre optique se décale vers les faibles longueurs d'onde ; ce phénomène est relatif au déplacement du pic du gain optique (effet de "tracking" en courant déjà explicité dans le chapitre 2). Rappelons que plus le courant augmente dans la zone active, plus la densité de porteurs est élevée et plus les quasi-niveaux de Fermi pénètrent dans les bandes. Ceci entraîne alors une augmentation de la population des états de haute énergie de la bande de conduction. De ce fait, la longueur d'onde des photons émis par recombinaisons radiatives (inversement proportionnelle à l'énergie nécessaire à ces recombinaisons) diminue (cf. tableau 20) et induit un déplacement du spectre optique vers les faibles longueurs d'onde.

	AOS 210 (référence)	AOS 107 (dégradé)
Tracking en courant ($\Delta\lambda_{c@50mA} - \Delta\lambda_{c@120mA}$)	$\approx 30\text{nm}$	$\approx 10\text{nm}$
Largeur à mi-hauteur à 50 mA	1590-1530 = 60 nm	1640-1585 = 55 nm
Largeur à mi-hauteur à 120 mA	1570-1500 = 70 nm	1630-1565 = 65 nm

Tableau 20 : Synthèse des dérives obtenues sur la mesure du spectre d'électroluminescence entre un AOS de référence et un AOS dégradé

Les premiers résultats révèlent un décalage du maximum du pic de luminescence de (-30nm) pour le composant de référence 210 et de (-10nm) pour le composant 107 dont la caractéristique I(V) est dégradée. L'augmentation de la population des états de haute énergie de la bande de conduction, due à l'augmentation de courant, est moindre pour l'AOS dégradé. Or, le courant d'alimentation pour les deux composants (référence et dégradé) étant identique, l'effet de "tracking" en courant devrait être du même ordre de grandeur. La différence observée suggère donc l'existence de niveaux énergétiques (pièges) dans la bande interdite, sur lesquels les électrons ont une probabilité non négligeable de se recombiner de manière non-radiative.

L'évolution du spectre optique du composant dégradé est reliée à une variation des paramètres fonctionnels : diminution relative de 30% de la puissance optique mesurée à 200mA et dédoublement de la caractéristique I(V) entre 0,3V et 0,8V après 500h de contraintes échelonnées en courant. Ces évolutions sont également corrélées à une augmentation du pseudo courant de seuil ($I@0.6mW$) et une diminution du rendement optique pour les AOSs : AOS 125 du lot 3 présente un dédoublement entre 0,3V et 0,8V, il subit une augmentation du $I@0,6mW$ et une diminution de puissance optique.

Cette analyse permet donc d'émettre l'hypothèse de la dégradation de la zone active de ce composant. L'origine de ce mécanisme de dégradation semble être liée l'existence de pièges dans la bande interdite, sur lesquels les électrons peuvent se recombiner de façon non radiative (corrélation avec la diminution du rendement, cf. chapitre 3).

La corrélation, montrée dans le cas de diodes laser, liant le spectre optique d'un composant optoélectronique au comportement de sa cavité laser, semble donc être vérifiée pour le composant AOS [39, 49]. En effet, un certain nombre de travaux ont mis en évidence qu'une évolution de la longueur d'onde centrale ou de la largeur de raie, après un test de vieillissement, est généralement reliée à une dégradation de la zone active [49].

Des mesures complémentaires dans la bande 900-1600 nm doivent être réalisées sur des AOSs dégradés du lot 3 afin de valider les hypothèses retenues pour la détermination et la localisation des dégradations de ces composants.

De plus, cette analyse de défaillance montre que l'étude du spectre d'électroluminescence est relativement simple à mettre en œuvre et conduit à des résultats pouvant conclure à une possible dégradation de la zone active. Néanmoins cette technique ne conduit pas à la détermination absolue de l'origine des défauts affectant la zone active.

2.4/ Synthèse

L'objectif premier de cette analyse a été d'étudier la faisabilité des trois méthodes d'analyse citées ci-dessus sur les AOSs (EL, CL, spectre optique), celui-ci a été atteint. En effet, les méthodes décrites ont permis d'extraire plusieurs résultats et une première conclusion sur l'identification et l'origine de la dégradation d'un composant dont la caractéristique est dédoublée pour une polarisation comprise entre 0,3V et 0,9V. En effet, la dégradation se situe proche de la zone active et l'origine de ce mécanisme de dégradation semble être l'existence de pièges dans la bande interdite, où les électrons se recombinent de façon non radiative. Nous avons mis en évidence les limitations des techniques d'électroluminescence et de cathodoluminescence en matière de détection de défaut altérant le ruban enterré car elles ne permettent pas d'apporter clairement une relation quantitative entre le dédoublement de la caractéristique I(V) et la diminution du signal optique collecté en particulier dans la zone active. Cette constatation amène donc à se poser les questions suivantes :

- soit l'amplitude du dédoublement de la caractéristique I(V) entre 0,3V et 0,8 V ne peut pas être considérée comme significative malgré le fait que la diminution de la puissance optique soit importante (au moins de 10% de pertes après au minimum 168h de vieillissement)
- soit la dégradation n'a pas encore atteint le volume utile de la zone active pour stopper la luminescence du composant, tout en conservant à l'esprit, que nous n'avons pas de référence de mesure initiale pour les composants dégradés en électroluminescence et cathodoluminescence.

Afin de compléter ces différentes hypothèses émises sur les mécanismes de dégradation de l'AOS en particulier en conservant l'apport des analyses I(V), nous avons choisi de prolonger l'analyse des modes de défaillance détectés dans le chapitre précédent par une étude basée sur la simulation physique 2D. L'apport de ces simulations est envisagé pour quantifier l'impact d'une dégradation d'un ou plusieurs paramètres physiques sur la caractéristique électrique statique d'un AOS [48, 49]. L'intérêt est alors de corréliser les signatures des modes de défaillance observés expérimentalement avec les résultats de modélisation, permettant ainsi d'éviter la mise en œuvre de moyens lourds d'analyse tels que : TEM, SIMS, notamment quant à la mise en évidence de mécanismes de pièges relatifs à la présence de dislocations ou de diffusion de défauts en bord ou au sein de la zone active. Ce type de défauts est toujours très délicat à révéler du fait des exigences de la haute résolution, notamment avec la microscopie électronique en transmission, sollicitant une hypothèse sur la localisation et la topologie du défaut et nécessitant une préparation de couches très minces (amincissement ionique) parfaitement orientées suivant un axe cristallographique donné (< à 100nm) et malgré une forte résolution spatiale (1-2nm).

3/ MODELISATION PHYSIQUE BI-DIMENSIONNELLE D'UN AOS

L'étude de la qualité et la fiabilité de nouveaux composants est une étape importante dans l'industrialisation d'un produit pour les fabricants. La démonstration actuelle de la fiabilité des composants, à partir d'une approche physique, nécessite conjointement l'étude des mécanismes de défaillance, leur modélisation et leur simulation. Cette démarche procède d'une méthodologie particulière puisque la fiabilité ne résulte pas d'une mesure mais d'une estimation. De plus, pour obtenir des résultats fiables, il faut multiplier ces études en terme de composants et en nombre d'heures de vieillissement, signifiant une augmentation des coûts et des délais pour l'entreprise [45, 46]. Cependant, les niveaux actuels de fiabilité des composants optoélectroniques doivent répondre à deux exigences :

- ✓ le taux de défaillance, en exploitation, dans la zone de vie utile des composants optoélectroniques est actuellement extrêmement faible,
- ✓ les objectifs des industriels sont l'optimisation et la réduction des tests de qualification.

Une telle évolution requiert le développement de méthodes et d'outils plus orientés vers la physique du composant et des mécanismes de défaillance. Actuellement, la simulation physique devient un outil d'analyse complémentaire aux moyens expérimentaux aux travers desquels les paramètres fonctionnels sont analysés. Depuis deux décennies, les coûts engendrés par la fabrication des circuits intégrés ont motivé le développement de logiciels de simulation des composants, circuits et systèmes électroniques [37] :

1. La simulation des procédés technologiques a pour objectif la description du composant (profils de dopage, géométries) à partir des données relatives aux techniques et aux conditions de fabrication.
2. La simulation physique du fonctionnement des dispositifs vise à déterminer le comportement électrique à partir, par exemple, des données issues des simulateurs de procédés technologiques.
3. La simulation de schémas électriques prédit le fonctionnement des circuits intégrés à partir des paramètres extraits des simulateurs physiques ou de la caractérisation électrique.

Dans le cadre d'une étude de fiabilité d'une filière technologique, la simulation physique s'inscrit dans le prolongement d'une analyse de défaillance et a pour objectif de quantifier l'impact d'une dégradation des propriétés physiques des matériaux sur les caractéristiques électriques des composants. Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé à l'évaluation d'un logiciel de simulation (ISE) vis-à-vis des spécificités d'un AOS. Les résultats ainsi que les limites des modélisations effectués sur l'AOS sont donc présentés dans la suite de ce chapitre dans l'ordre chronologique dans lesquels ils ont été effectués :

- I. Modélisation de l'AOS à partir de son schéma électrique équivalent afin de déterminer les paramètres des éléments de ce schéma et limitations de ce modèle (cf. 3.2).

- II. Modélisation de la structure technologique de l'AOS avec un degré de difficulté croissante permettant de prendre en compte tous les phénomènes physiques mis en jeu (durée de vie, vitesse de recombinaison, nature des recombinaisons,...) et mise en évidence des limitations de cette modélisation (cf. 3.3).
- III. Grâce au modèle structurel établi dans l'étape précédente II, simulation des modes de défaillance de l'AOS afin d'identifier et de localiser l'origine des mécanismes de dégradation (cf. 3.4).

3.1/ Limitations des modélisations électriques sous IC-CAP

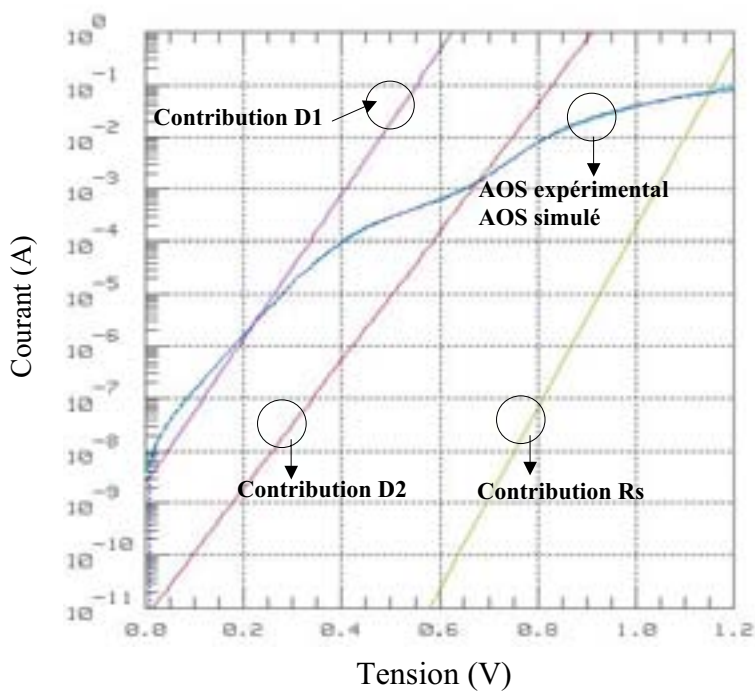
Comme nous l'avons vu dans la synthèse bibliographique relative aux diodes laser BRS au chapitre 3, de nombreuses publications se sont attachées à démontrer l'intérêt des modélisations électriques à partir de schémas statiques équivalents de diodes laser 1,55 μm InGaAsP/InP [36, 41]. A partir d'une approche équivalente, l'objectif de cette étude est de mettre en évidence des signatures de défaillance précoces affectant le composant AOS.

Le premier essai de lissage de la caractéristique expérimentale $I(V)$ de ce composant a été effectué grâce au modèle statique équivalent implanté sous le logiciel IC-CAP [96]. Ce logiciel permet, grâce au solveur SPICE, l'analyse et la caractérisation de dispositifs microélectroniques via l'extraction et l'optimisation des paramètres du schéma équivalent du modèle pour ce composant.

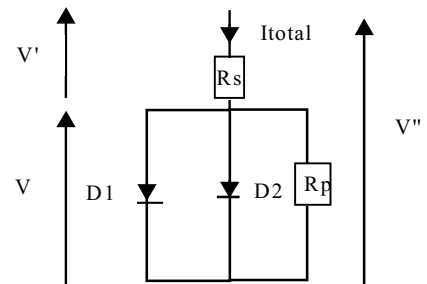
Après avoir défini, sous la forme d'un schéma électrique statique équivalent, le modèle du composant étudié, ce logiciel calcule les paramètres exacts du modèle et ainsi permet d'extraire la caractéristique $I(V)$ simulée de ce schéma équivalent. Un changement des paramètres du schéma équivalent entraîne une modification de la caractéristique $I(V)$ simulée obtenue.

La détermination du modèle statique équivalent, en particulier à partir de la connaissance de l'architecture du composant permet alors d'identifier les mécanismes physiques prépondérants associés mais également de remonter aux localisations de certaines dégradations. Cette approche a donc été mise en œuvre pour les AOSs. Le schéma équivalent statique électrique, en première approximation, d'un AOS implanté sous IC-CAP est celui présenté dans le chapitre 3 (figure 93), basé sur une diode D2 représentative de la zone active InGaAsP du composant est placée en parallèle avec une diode D1 correspondant à l'homojonction latérale InP/InP. La résistance R_s modélise la résistance des couches d'accès et de contact de la diode laser BRS et R_p est la résistance de shunt prenant en compte les courants de fuite dans les régions implantées.

La figure 93 présente également le résultat du lissage de la caractéristique expérimentale $I(V)$ d'un AOS de la plaque 72832 identique aux composants du lot 3 par la caractéristique $I(V)$ modélisée sous IC-CAP.



=> Schéma équivalent implanté



=> Paramètres extraits de la simulation

- Diode D1 : $I_{s1} = 12\text{nA}$
 $R_1 = 307\ \Omega$
 $n_1 = 1,58$
- Diode D2 : $I_{s2} = 31\text{pA}$
 $R_2 = 1\ \Omega$
 $n_2 = 1,55$
- $R_p = 4\text{M}\Omega$, $R_s = 3\ \Omega$

Figure 93 : Résultat final de la modélisation de l'AOS obtenu par le logiciel IC-CAP

Le logiciel IC-CAP permet de lisser, point par point, la caractéristique expérimentale de l'AOS en donnant des valeurs à chacun des paramètres du schéma équivalent programmé. Malgré le lissage correct entre le résultat de la simulation et la caractéristique expérimentale, les paramètres du modèle ne permettent pas de les rattacher aux différentes zones du composant AOS. En effet :

- la résistance R_1 de la diode D_1 est très élevée et comme la diode D_1 est supposée idéale sous IC-CAP, donc sans résistance série associée, elle devrait être proche de $1\ \Omega$,
- le courant de saturation de la diode D_2 est faible (3 décades en dessous d'une valeur typique pour une diode laser DH) et pour le modèle de diode établi, comme pour les diodes laser BRS [41], la valeur du courant de saturation est de l'ordre de 10^{-11}A ,
- la faible valeur de R_p suggère un niveau de fuites important relié à l'architecture spécifique d'un AOS (taper et guide passif).

De par la complexité des phénomènes physiques mis en jeu dans l'AOS, sa caractéristique $I(V)$ est difficilement lissable à partir d'un schéma statique électrique cohérent et équivalent de type diode laser BRS. Cette constatation nous amène à conclure que la modélisation électrique seule de l'AOS rend donc difficile l'analyse des mécanismes physiques mis en jeu dans ce composant. La modélisation par éléments finis est donc nécessaire pour l'analyse plus approfondie des phénomènes physiques (recombinaisons radiatives, recombinaisons parasites...).

3.2/ Modélisation physique de l'AOS

Les simulateurs physiques ont été développés à l'origine pour modéliser les dispositifs semiconducteurs à base de silicium. L'intérêt d'un tel simulateur est d'extraire, par exemple, la caractéristique physique $I(V)$ d'un composant sous différents régimes d'injection en tenant compte des résultats de simulation de procédés technologiques. La modélisation de l'AOS à partir de sa structure technologique est donc possible avec plusieurs logiciels de simulation. On peut citer SILVACO, POSEIDON, ISE ou encore ETHER.

- SILVACO est un logiciel de simulation qui permet des modélisations, par éléments finis, en 2 dimensions de structures à base d'hétérojonction et en 3 dimensions pour les composants en Silicium. Il prend en compte tous les phénomènes physiques mis en jeu dans le composant par les équations de Maxwell, d'Helmoltz, de Poisson, de continuité pour les trous et les électrons. Néanmoins, notre objectif initial étant d'effectuer des modélisations tri-dimensionnelles, ce logiciel n'a pas été utilisé lors de nos travaux de simulations [93].
- POSEIDON (logiciel interne développé au sein du CNET) est un logiciel de simulation qui permet des modélisations, par volumes finis, en 3 dimensions pour les hétérojonctions. Il prend en compte tous les phénomènes physiques mis en jeu dans le composant par les équations de Maxwell, d'Helmoltz, de Poisson, de continuité pour les trous et les électrons. Néanmoins, ce logiciel étant difficilement accessible, nous n'avons pas pu l'utiliser lors de nos travaux de simulations [37].

Après l'évaluation et l'analyse des logiciels de simulation ISE (logiciel commercial) et ETHER (logiciel interne développé par ALCATEL R&I), il est apparu que ceux-ci permettent, de par leurs spécificités, de modéliser une structure AOS. Le principe de résolution mathématique de ces deux logiciels est la modélisation par éléments finis.

- Le logiciel ETHER permet de simuler des dispositifs optoélectroniques mono-dimensionnel ou bi-dimensionnel. Ces modèles tiennent compte de tous les phénomènes physiques mis en jeu dans le composant par les équations de Maxwell, d'Helmoltz, de Poisson, de continuité pour les trous et les électrons. L'inconvénient majeur de ce logiciel réside dans le fait qu'il ne permet ni d'effectuer des modélisations tri-dimensionnelles ni de prendre en compte les effets de la température. Cependant, les données matériaux (InP et InGaAsP) utilisées dans ce logiciel, ont été mesurées expérimentalement au sein d'ALCATEL R&I avant d'être

implantées sous ETHER. Celui-ci est donc plus spécifiquement dédié aux technologies fabriquées par ALCATEL [29].

- L'objectif d'ISE est la simulation de différents composants électroniques et optoélectroniques de 1 à 3 dimensions. Le logiciel ISE permet de modéliser et simuler un composant en tenant compte de tous les phénomènes physiques mis en jeu dans le composant par les équations de Maxwell, d'Helmoltz, de Poisson, de continuité pour les trous et les électrons. L'inconvénient de ce logiciel est qu'il a été nécessaire de vérifier et de modifier les paramètres physiques, en particulier les composés ternaires et quaternaires des hétérojonctions à partir de caractérisations expérimentales ou de synthèses bibliographiques. De plus, l'avantage principal de ce logiciel est son évolution constante où la version 7 intègre par exemple un modèle optique propre à la diode laser.

Dans la suite de ce paragraphe, la méthodologie qui consiste à établir le modèle ainsi que les conditions optimales de simulation de l'AOS afin d'obtenir le lissage de sa caractéristique I(V) bas-niveau, est tout d'abord présentée. Les résultats obtenus de la modélisation du composant AOS sont exposés dans le prochain paragraphe (cf. 3.3) et enfin, dans un dernier paragraphe (cf. 3.4), l'analyse par la simulation des mécanismes de dégradation génériques identifiés sur cette filière technologique d'AOS 1,55 μm sera abordée.

3.2.1/ Méthode d'étude retenue pour la modélisation de l'AOS

L'étude des spécificités propres des logiciels ISE et ETHER montre que l'utilisation de ces deux logiciels apparaît comme complémentaire pour la modélisation d'un AOS et la simulation de ses mécanismes de dégradation. Tout d'abord, les équations de Maxwell, d'Helmoltz, de Poisson, de continuité pour les trous et les électrons associées aux structures des composants modélisés constituent les équations de base utilisées par ces deux logiciels. De plus, d'un point de vue technique (données matériaux exactes) et d'un point de vue pratique (accès au logiciel sur le site de Marcoussis et expérience de l'équipe de modélisation d'ALCATEL R&I), le logiciel ETHER apparaît comme l'outil le plus adapté pour les projets de modélisation de structures AOSs en 2 dimensions et a donc été identifié comme un logiciel de référence pour la simulation de l'AOS. Néanmoins, la structure du AOS étant particulière (architecture non symétrique et présence de tapers d'adaptation), comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, et les modélisations sous le logiciel ETHER étant limitées à 2 dimensions, celui-ci limite alors à l'étude de la structure complète du AOS.

D'un point de vue de la prise en compte de la structure bi-dimensionnelle du AOS, ISE sera donc évalué, à partir du logiciel ETHER, puis utilisé dans le but de permettre l'interprétation des modes de dégradation des AOSs. Les perspectives attendues sont donc les suivantes :

- Etudier le modèle à 2 dimensions de l'AOS grâce au logiciel ETHER.

- Exploiter les possibilités du logiciel ISE afin de prendre en compte la géométrie la plus complète possible d'un AOS transféré en particulier l'empilement des couches de la zone active et celle du guide passif.

Comme nous l'avons vu précédemment, la suite de ce paragraphe est dédié à la définition du modèle de l'AOS. Cette définition a été effectuée en deux étapes :

- I. Sélection des équations de transport : équations de premier plan issues de l'équation de transport générale de Boltzmann et les équations de second plan qui décrivent les lois de mobilité et les mécanismes de Génération/Recombinaisons.
- II. Programmation de la structure AOS en fonction des spécificités structurelles réelles de ce composant (matériaux, épaisseur, dopages, morphologie de surface).

3.2.2/ Hypothèses sur les modèles de transport

Dans cette partie, nous présentons les hypothèses relatives aux modèles de transport mis en œuvre pour l'AOS dans les logiciels ETHER et ISE. Ces modèles ont été exploités en tenant compte des hypothèses suivantes [37, 38, 39] :

1. Approximation parabolique du schéma de bandes qui permet de prendre en compte la notion de masse effective pour les électrons et les trous.
2. Dans la mesure où le matériau de base est très dopé (dégénéré), la fonction $f(\xi)$ de distribution de densité d'états de l'énergie ξ est régie par la statistique de Fermi-Dirac.
3. Résolution de l'équation de Boltzmann décrivant les conditions vérifiées par la fonction $f(\vec{r}, \vec{k}, t)$ décrivant la densité de probabilité de présence d'une particule dans l'espace des phases étendues où \vec{r} représente le vecteur position et \vec{k} le vecteur d'onde.
4. Modèle de "Dérive-Diffusion" : résolution de l'équation de Poisson, de continuité pour les trous et les électrons sans prise en compte de l'effet des porteurs chauds. Ce modèle suppose que l'énergie des porteurs et leur quantité de mouvement répondent instantanément aux variations locales du champ électrique. La mobilité est donc une fonction du champ électrique local et l'énergie des porteurs est constante et égale à leur énergie thermique. La description du transport électrique dans une structure de type ruban enterré montre que les possibilités d'obtention de porteurs "chauds" dues aux discontinuités de bandes provoquant des champs électriques locaux élevés (porteurs localisés sur des niveaux d'énergie très hauts dans la BC : phénomène de thermalisation), sont peu nombreuses. En effet, le temps de relaxation des porteurs entre les niveaux d'une même bande est négligeable devant leur durée de vie en émission spontanée notamment en faible régime laser (en dessous du seuil). L'utilisation du modèle "Dérive-Diffusion", dans lequel le courant est principalement déterminé par les recombinaisons des

porteurs confinés dans la couche active, pour l'étude des caractéristiques I(V) bas niveau, est alors justifiée.

5. Une température constante du composant à 300K est considérée. Cette hypothèse constitue une restriction du modèle mais l'équation de la chaleur est difficile à résoudre compte tenu des conductances et des capacités des matériaux mis en jeu dans la structure AOS. L'équation de la chaleur peut également compléter les modèles précédents mais elle ne fera pas l'objet de la présente évaluation.
6. Dans la mesure où le matériau de base (InP) est très dopé (niveau de Fermi dégénéré), la fonction $f(\xi)$ de distribution de la densité d'états de l'énergie ξ est régie par la statistique de Fermi-Dirac.
7. Les mécanismes de Génération/Recombinaison (cf. chapitre1) indirects par phonon, photons, ou électrons Auger sont pris en compte par le taux de recombinaisons de type Shockley-Read-Hall (SRH).

Après avoir décrit les modèles physiques mis en œuvre pour l'AOS, les travaux de modélisation, présentés ci-dessous, suivent le cheminement suivant :

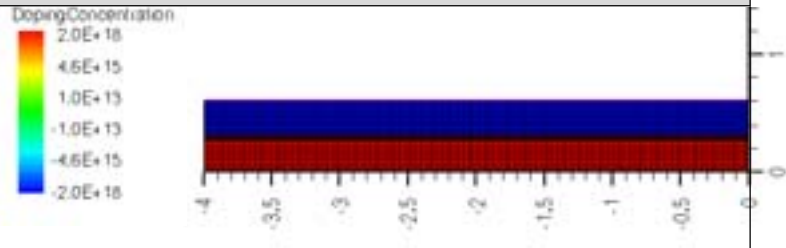
- Validation du maillage de la structure modélisée grâce à des résultats de simulation bien connus : caractéristique I(V) d'une homojonction sur Silicium.
- Validation des paramètres physiques du modèle utilisé sur InP, grâce à la comparaison des résultats de simulation obtenus sous ETHER et ISE : caractéristique I(V) d'une homojonction InP/InP.

3.2.3/ Conditions optimales du maillage : Homojonction sur Silicium

La définition du maillage de la structure simulée est une opération critique pour la validité des résultats et les temps de calculs. Puisque la résolution des équations de transport est basée sur leur discrétisation [37], le maillage final, outre la convergence vers la solution, vise un compromis entre la précision de la solution, adaptée aux variations des grandeurs physiques (potentiel, concentration en porteurs) et le temps de calcul. La densité spatiale du maillage augmente nécessairement aux interfaces ainsi que dans des zones à géométrie particulière (zone non planar sur le périmètre, triangle aigü, région dentelée, resserrement de spirale,..). De plus, la densité du maillage a été programmée sur les structures simulées de façon à augmenter le nombre d'éléments et de nœuds aux interfaces. Le nombre de nœuds maximum que l'on peut affecter à un modèle dans ISE est proche de 20000, sachant que le temps de simulation pour un AOS 2D peut varier entre 12h et 24h.

Dans le but de valider le maillage effectué dans ISE, une comparaison entre les résultats du calcul analytique en première approximation et de la modélisation dans ISE de la caractéristique courant-tension bas-niveau d'une diode à homojonction Silicium bi-dimensionnelle a été effectuée. En effet, si les résultats de calcul analytique sont identiques aux valeurs correspondantes de la caractéristique simulée, nous pourrions alors valider le maillage effectué de la structure de l'AOS modélisé.

La structure modélisée est donnée en figure 94 et la caractéristique I(V) bas niveau obtenue, modélisée dans ISE, est présentée en figure 95.

Structure simulée	Maillage et paramétrage de la structure simulée		
<p>Anode</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>Si - Na = $2e18 \text{ at/cm}^3$</td> </tr> <tr> <td>Si - Nd = $2e18 \text{ at/cm}^3$</td> </tr> </table> <p>Cathode</p>	Si - Na = $2e18 \text{ at/cm}^3$	Si - Nd = $2e18 \text{ at/cm}^3$	
Si - Na = $2e18 \text{ at/cm}^3$			
Si - Nd = $2e18 \text{ at/cm}^3$			
<p>Longueur = $1\mu\text{m}$ Largeur = $4\mu\text{m}$ Epaisseur = $0,6\mu\text{m}$</p>	<p>Nombre d'éléments rectangulaires : 5450 Nombre de nœuds : 10000</p>		

dopage=at/cm³ (dopage négatif : dopage P), e=épaisseur

Figure 94 : Structure et conditions de simulation de la diode Silicium modélisée sous ISE

L'estimation graphique effectuée grâce à la figure 95, considérée soit en coordonnées semi-logarithmiques soit en coordonnées linéaires, permet d'évaluer pour la diode de Silicium modélisée:

- ❑ le courant de saturation proche de 2.10^{-18} A ,
- ❑ la valeur du courant proche de 1.10^{-11} A pour une tension de $0,4\text{V}$,
- ❑ la valeur de la tension de seuil fixée à $0,7\text{V}$.

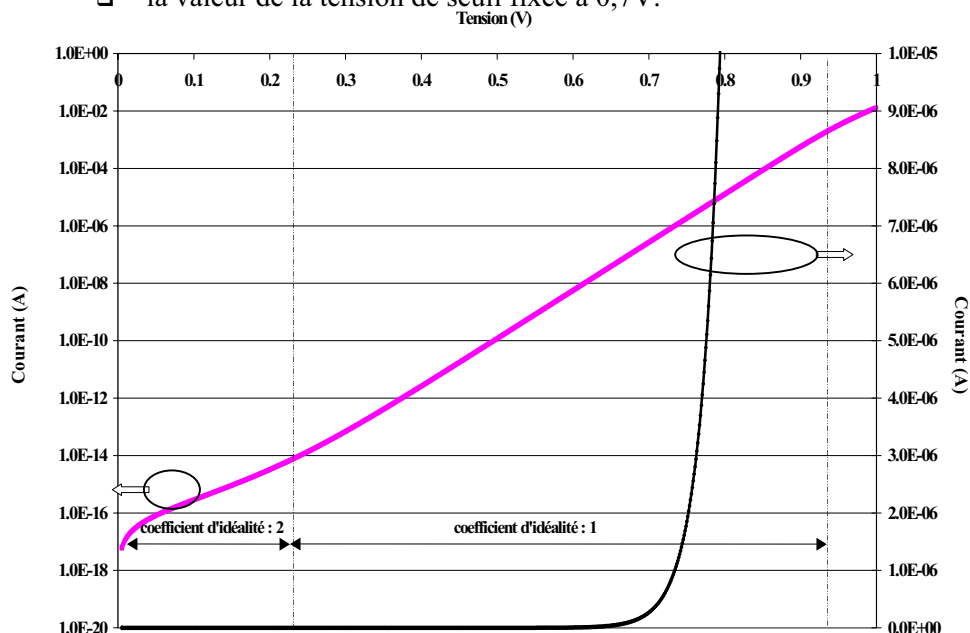


Figure 95 : Caractéristique de la diode Silicium à homojonction modélisée dans ISE (T=300K)

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, l'équation générale d'une diode d'homojonction est :

$$I=I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right)-1 \right) \quad (1-76)$$

En tenant compte de cette équation pour le calcul du courant de saturation et de la tension de seuil de la diode de Silicium modélisée, on obtient les valeurs suivantes :

- ❑ le courant de saturation à $3,6e-18A$,
- ❑ la valeur du courant proche de $1.10^{-11}A$ pour une tension de $0,4V$,
- ❑ la valeur de la tension de seuil à $0,7V$.

La correspondance entre les valeurs calculées et celles estimées grâce à la caractéristique simulée de la diode Silicium montre donc que le maillage effectué dans ISE en 2 dimensions est satisfaisant. De plus, on retrouve les valeurs des coefficients d'idéalité, $\eta = 2$ et $\eta = 1$, correspondant respectivement aux phénomènes prépondérants de Génération/Recombinaison ($n=2$) et de diffusion ($n=1$) mis en évidence dans le chapitre 3 [62].

De plus, à partir du modèle de la diode établi, les limites maximales et minimales du nombre de nœuds et d'éléments ont été déterminées, après plusieurs essais de modélisation effectués afin de calculer le pourcentage d'erreur commis par rapport à la valeur théorique du facteur d'idéalité à faible polarisation d'une diode Si ($\eta_{th} = 2$) en fonction du nombre de nœuds et d'éléments implantés (figure 96) :

- le nombre d'éléments pour une structure modélisée dans ISE doit être compris entre 5000 et 15000.
- le nombre de nœuds pour une structure modélisée dans ISE doit être compris entre 10000 et 20000.

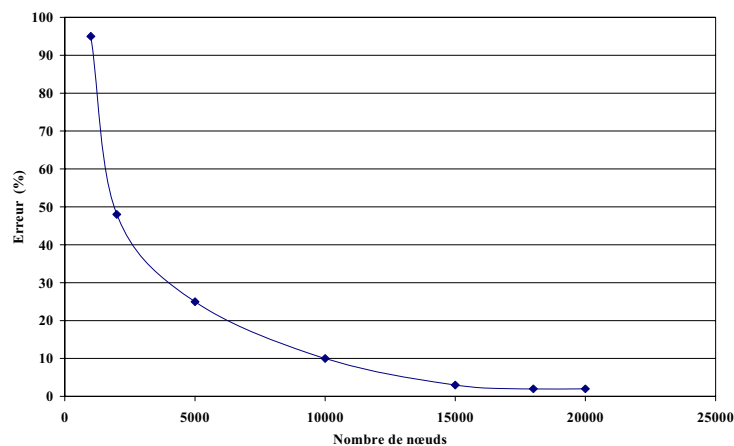


Figure 96 : Calcul de l'erreur sur le modèle obtenu de la caractéristique I(V) de la diode Si en fonction du nombre de nœuds implanté

3.2.4/ Validation des paramètres physiques : Homojonction InP(P)/InP(N)

Dans l'objectif de valider les paramètres physiques pour l'InP entrés dans le simulateur ISE, une comparaison entre les résultats des modélisations sous ETHER et ISE de la caractéristique courant-tension d'une homojonction InP(P)/InP(N) a été effectuée. Tout d'abord, les données physiques implantées sous ETHER sont considérées comme des données de référence car la plupart de ces données ont été mesurées expérimentalement par ALCATEL R&I à partir de matériaux composés ou de structures laser spécifiques. La comparaison des deux caractéristiques I(V) modélisées dans ISE

et ETHER de la même diode d'homojonction InP(P)/InP(N) est effectuée. La structure modélisée est donnée en figure 97 et les caractéristiques obtenues sont présentées en figure 98.

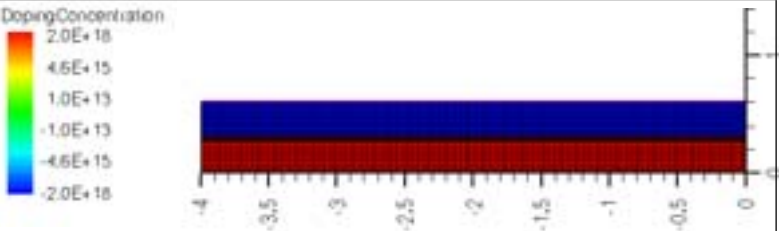
Structure simulée	Maillage et paramétrage de la structure simulée
<p>Anode</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px;"> <p>Si - Na = $2e18 \text{at/cm}^3$</p> <p>Si - Nd = $2e18 \text{at/cm}^3$</p> </div> <p>Cathode</p>	
<p>Longueur = $1\mu\text{m}$</p> <p>Largeur = $4\mu\text{m}$</p> <p>Epaisseur = $0,6\mu\text{m}$</p>	<p>Nombre d'éléments rectangulaires : 5050</p> <p>Nombre de nœuds : 10000</p>

Figure 97 : Structure et conditions de simulation de la diode d'homojonction InP/InP

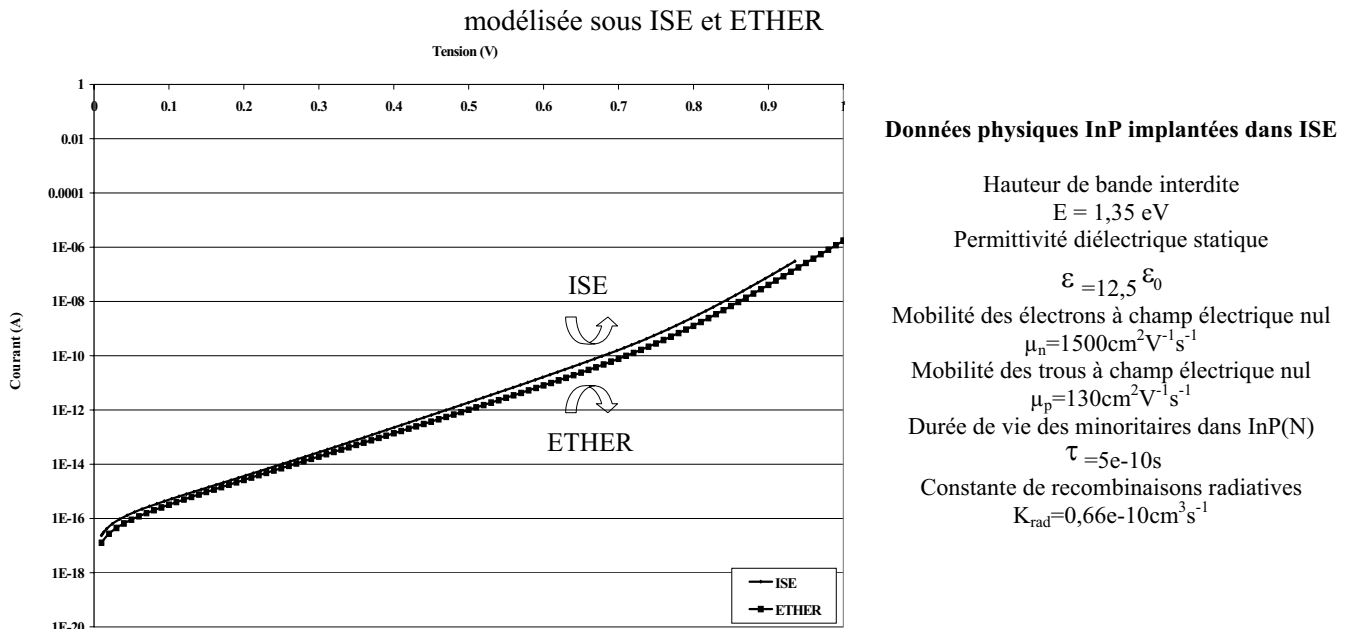


Figure 98 : Comparaison des caractéristiques de la diode d'homojonction InP(N)/InP(P) modélisée dans ISE et ETHER ($T=300\text{K}$)

La correspondance, observée en figure 98, entre les caractéristiques simulées dans ISE et ETHER de la même diode d'homojonction InP(P)/InP(N) confirme la validité des données physiques d'ETHER implantées dans ISE pour le matériau InP. Cela signifie également que les modèles de transport utilisés dans ISE sont corrects pour les matériaux III-V. De plus, l'ensemble des données physiques ont été validées par une comparaison avec les données issues de nombreuses publications sur la modélisation de l'AOS [88, 89, 90, 91]. Les données physiques d'ETHER pour InGaAsP sont donc également intégrées au fichier de paramètres physiques ISE. Ainsi, les paramètres physiques de la structure AOS (InP et InGaAsP) peuvent être considérés comme corrects pour l'ensemble des travaux de modélisation à venir sur cette technologie d'AOS. De plus, ce résultat de modélisation valide également le modèle de l'AOS implanté dans ISE [37, 38, 39].

3.3/ Modélisation physique 2D de l'AOS transféré

3.3.1/ Conditions de simulation - Impact de l'asymétrie structurale sur le niveau de courant

Les premiers essais de modélisation ont été effectués en 2 dimensions et sont basés sur la méthodologie de modélisation en 2 dimensions connue sur le laser BRS. Néanmoins comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, l'AOS est un composant possédant une géométrie spécifique. En effet, l'AOS n'est pas symétrique suivant le plan de coupe considéré. L'architecture globale d'un AOS est rappelée en figure 99. Rappelons que l'AOS est constitué d'une double section basée sur une section centrale à l'origine du gain optique terminée par deux sections passives. La structure guidante est une double structure dans laquelle le guide supérieur constitue la couche active optiquement couplée à un guide passif inférieur terminé par deux régions adaptatrices de modes optiques (tapers). Ce type de structure permet d'obtenir un facteur élevé de confinement optique dans la zone active et une large taille de spot aux miroirs. L'intérêt des tapers est de fournir une conversion de modes adiabatique et un couplage efficace entre la zone active et passive.

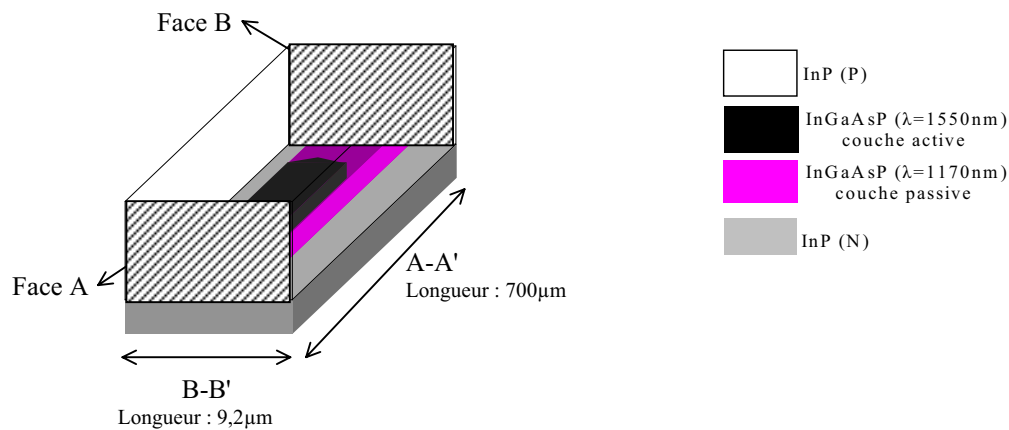


Figure 99 : Vue tridimensionnelle d'un AOS

La première difficulté rencontrée lors de la modélisation de l'AOS a donc été de faire le choix de la coupe à considérer pour la modélisation en deux dimensions de ce composant. En effet, l'observation de la coupe A-A' d'un AOS permet de constater la géométrie spécifique des adaptateurs de modes ou tapers alors que si l'on considère la coupe B-B', coupe sur laquelle on visualise un miroir d'un AOS, celle-ci est équivalente à la coupe transversale d'un laser BRS. Les figures 100 et 101 présentent les vues en coupe d'un AOS suivant les plans A-A' et B-B'. L'empilement des couches présenté sur les figures 99, 100 et 101 a été simplifié dans un souci de clarté. Nous rappelons que l'empilement réel des différentes couches a été détaillé dans le chapitre 1 (cf. figure 25).

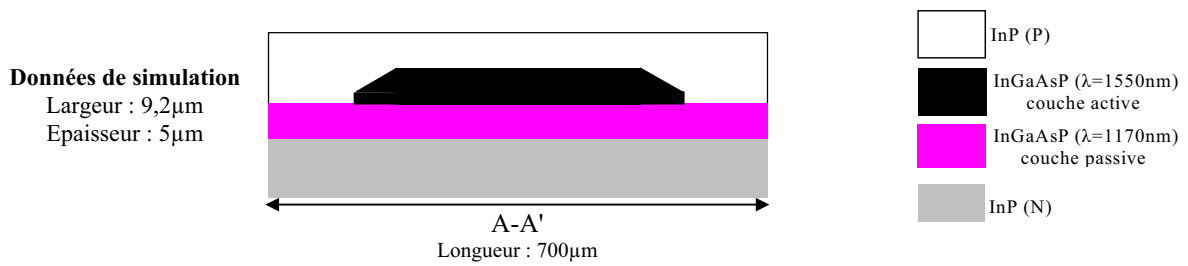


Figure 100 : Vue en coupe suivant le plan A-A' d'un AOS (effet longitudinal)

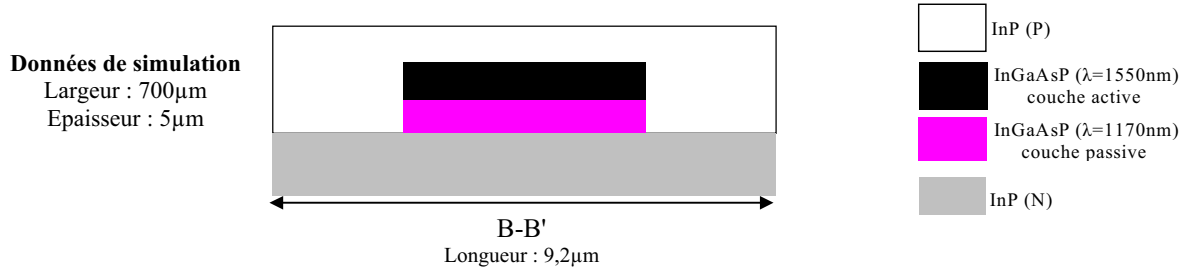
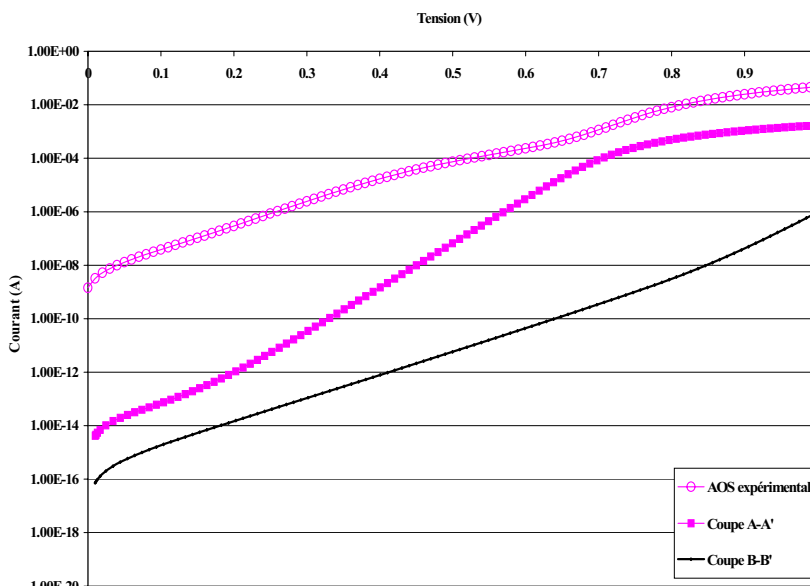


Figure 101 : Vue en coupe suivant le plan B-B' d'un AOS (effet transversal)

L'ensemble des résultats de modélisation de l'AOS transféré présenté ci-dessous a été uniquement effectué à partir du logiciel de modélisation ISE. En effet, après plusieurs essais de simulation avec le logiciel ETHER, il est apparu que les modèles implantés dans ce logiciel ne sont pas validés pour des dopages supérieurs à 10^{18} cm^{-3} . Le composant AOS étant constitué de matériaux supérieurement dopés, ce logiciel n'a donc pas été exploité dans la suite de ces travaux de recherche. Le choix de la coupe à modéliser a été effectué par l'intermédiaire de simulations ISE des deux coupes A-A' et B-B' du AOS présentée en figure 102. Notons qu'il a été très difficile de modéliser les tapers à cause de leur géométrie occasionnant des temps de calcul rédhibitoires (la taille des pointes des tapers est inférieure à 0,5 μ m). La contrainte imposée par le nombre de nœuds maximum du maillage a alors été respectée grâce à la simplification de la géométrie latérale de la couche active.



Données physiques InGaAsP implantées dans ISE

- Hauteur de bande interdite
 $E_g=0,7 \text{ eV}$
- Permittivité diélectrique statique
 $\epsilon = 14 \epsilon_0$
- Mobilité des électrons à champ électrique nul
 $\mu_n=12000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
- Mobilité des trous à champ électrique nul
 $\mu_p=300 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
- Durée de vie des minoritaires dans InP(N)
 $\tau = 10 \text{ e-}9 \text{ s}$
- Constante de recombinaisons radiatives
 $K_{\text{rad}}=1 \text{ e-}10 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

Figure 102 : Comparaison des contributions électriques des deux différentes coupes d'un AOS

La figure 102 montre que, par rapport au courant circulant dans la coupe B-B' de l'AOS, le courant circulant dans la coupe A-A' de l'AOS est plus important d'environ 2 décades pour une polarisation comprise entre 0V et 0,5V puis il augmente de 3 décades entre 0,5V et 1V. La modélisation en 2 dimensions du composant AOS doit donc se faire grâce à la coupe A-A' où le guide passif est présent sur toute la longueur de la coupe simulée. De plus, on constate que la caractéristique I(V) expérimentale de l'AOS présente un courant de fuite très élevé à bas niveau. Ce résultat est abordé dans la suite de l'étude.

3.3.2/ Résultats de modélisation

La modélisation en 2 dimensions du composant AOS se faisant en considérant la coupe A-A' où le guide passif est présent sur toute la longueur de la coupe simulée, le résultat de modélisation effectué à partir de cette considération est présenté en figure 104.

Les premiers essais de modélisation de l'AOS en 2 dimensions, permettent de conforter le constat établi dans le précédent paragraphe : la caractéristique I(V) expérimentale de l'AOS est différente de la caractéristique I(V) modélisée de l'AOS en deux dimensions : à bas-niveau, les fuites de courant observées lors de l'étude expérimentale sont beaucoup plus importantes que lors des calculs effectués par le simulateur (figure 103).

L'origine de ces fuites doit donc être déterminée et celles-ci vont révéler la difficulté majeure du lissage de la caractéristique I(V) de l'AOS expérimentale par la modélisation physique de ce composant. Afin de pouvoir identifier l'origine des fuites de courant à bas-niveau, différentes étapes de modélisation vont être effectuées comme suit :

1. Lissage de la caractéristique I(V) uniquement de la structure du guide passif.
2. Lissage de la caractéristique I(V) de la structure de l'AOS en deux dimensions.

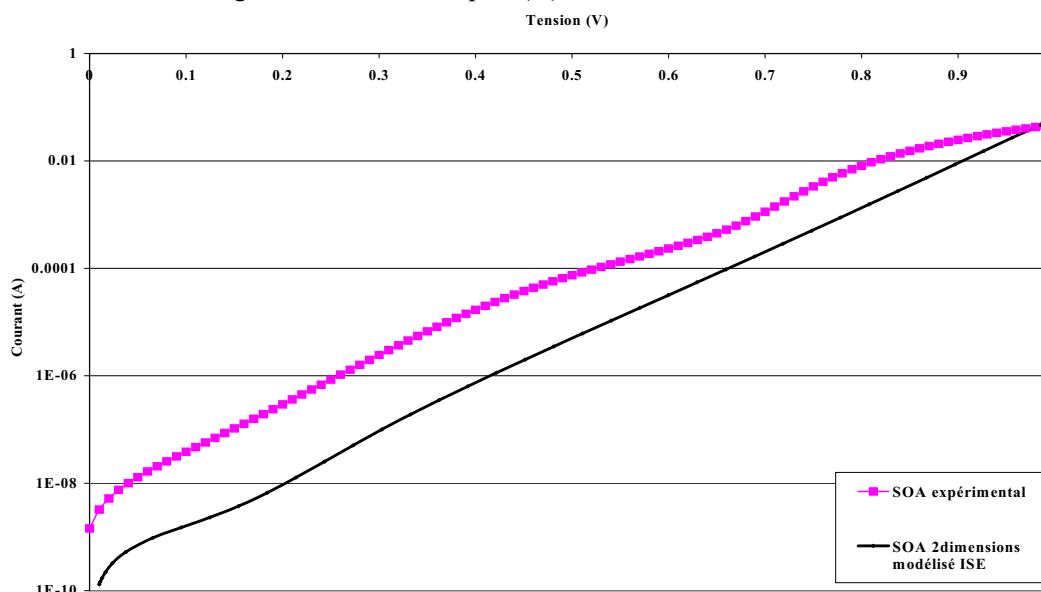


Figure 103 : Caractéristiques I(V) expérimentale et modélisée en 2 dimensions d'un AOS

➤ **Lissage de la structure du guide passif**

Grâce à une structure de test spécifique d'ALCATEL R&I, il a été possible d'obtenir la caractéristique I(V) expérimentale de la structure intégrant le guide passif de l'AOS. En effet avant sa métallisation, un composant AOS de la plaque 72832 (cf. chapitre 3 : résultats sur le lot 3) a été clivé au raz des pointes. La partie du composant clivée constitue donc la structure de test où il ne subsiste que le guide passif (pas de guide actif). La structure de test, d'une longueur de 50µm, est donc ensuite métallisée pour permettre la mesure de sa caractéristique I(V) expérimentale (figure 104).

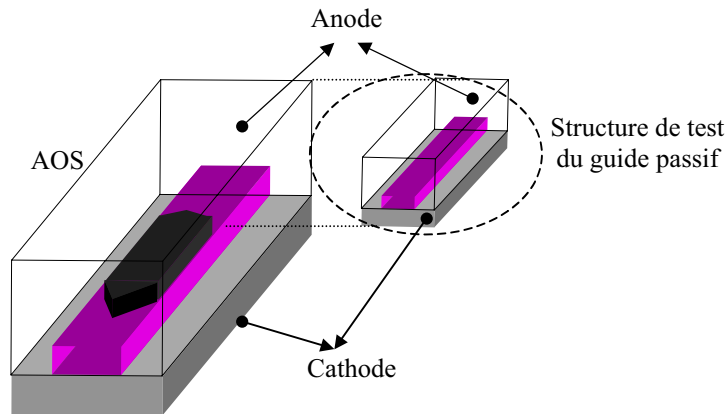


Figure 104 : Structure de test intégrant le guide passif de l'AOS selon la coupe A-A'

Les figures 105 et 106 présentent respectivement la structure modélisée en 2 dimensions et la comparaison de deux caractéristiques I(V) modélisée et expérimentale du guide passif.

Structure simulée	Maillage et paramétrage de la structure simulée							
<p>Anode</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">InP – Na = 1.5e18 – e = 230nm</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">InP - Na=7e17 – e = 470nm</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">InP – Na = 0.1e16 – e = 50nm</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">InP – Na = 1e18 – e = 620nm</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">InP – Nd = 3e18 – e = 300nm</td></tr> <tr><td style="text-align: center;"><i>Passif InGaAsP(λ=1.17µm) – Nd = 3e18 – e = 150nm</i></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">InP – Nd = 3e18 – e = 300nm</td></tr> </table> <p>Cathode</p>	InP – Na = 1.5e18 – e = 230nm	InP - Na=7e17 – e = 470nm	InP – Na = 0.1e16 – e = 50nm	InP – Na = 1e18 – e = 620nm	InP – Nd = 3e18 – e = 300nm	<i>Passif InGaAsP(λ=1.17µm) – Nd = 3e18 – e = 150nm</i>	InP – Nd = 3e18 – e = 300nm	
InP – Na = 1.5e18 – e = 230nm								
InP - Na=7e17 – e = 470nm								
InP – Na = 0.1e16 – e = 50nm								
InP – Na = 1e18 – e = 620nm								
InP – Nd = 3e18 – e = 300nm								
<i>Passif InGaAsP(λ=1.17µm) – Nd = 3e18 – e = 150nm</i>								
InP – Nd = 3e18 – e = 300nm								
<p>Longueur = 1µm Largeur = 1,2µm</p>	<p>Nombre d'éléments (rectangles et triangles) : 5080 Nombre de nœuds : 10225</p>							

Figure 105 : Structure et conditions de simulation du guide passif d'un AOS (structure de test)

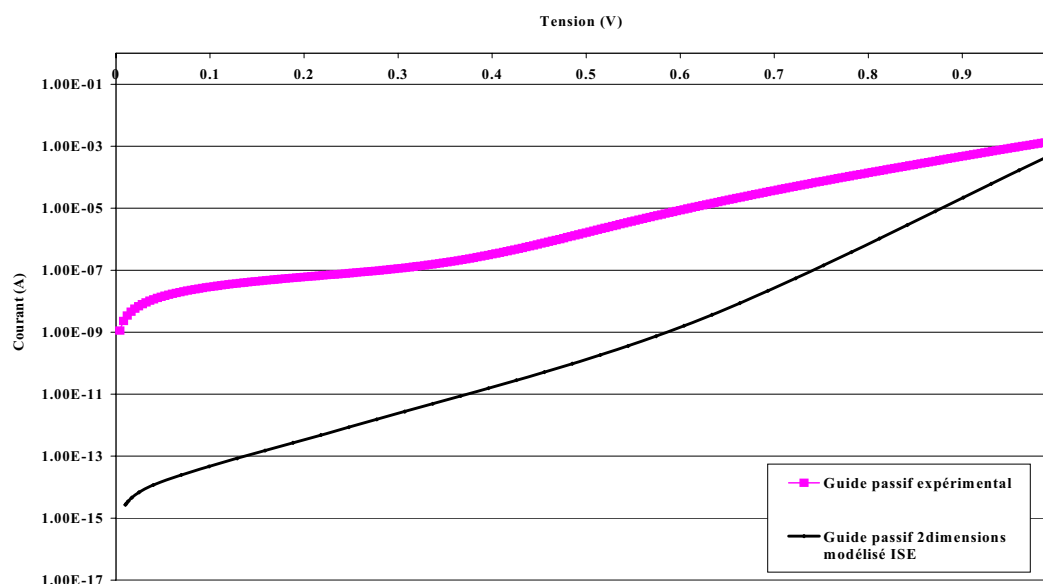


Figure 106 : Caractéristiques I(V) expérimentale et modélisée du guide passif de l'AOS

La modélisation de l'échantillon à taille réelle est possible mais nécessite un temps de modélisation très important. Dans l'objectif de réduire ce temps de modélisation, sans modifier les résultats de simulation, un facteur d'échelle sur les dimensions de la structure modélisée a été appliquée de la façon suivante :

- ⇒ l'épaisseur de la dernière couche matériau InP(P) se situant avant la couche de contact InGaAs a été réduite de 3000nm (épaisseur réelle) à 230nm (épaisseur modélisée),
- ⇒ la largeur et la longueur totales ont été réduites, respectivement, de 9,2 μ m (largeur réelle) à 1,2 μ m (largeur modélisée) et de 50 μ m (longueur réelle) à 1 μ m (longueur modélisée).

Ces valeurs finales correspondent à la limite en nombre de nœuds imposée par ISE.

La comparaison entre les caractéristiques I(V) expérimentale et modélisée du guide passif de l'AOS peut alors être effectuée grâce à la prise en compte d'un facteur multiplicatif ramenant les dimensions du modèle aux dimensions de la structure expérimentale.

Les résultats de simulation, ramenés à l'échelle de la structure expérimentale, montrent, en figure 106, que le courant circulant dans le guide passif expérimental est plus important d'environ 5 décades pour une polarisation comprise entre 0V et 0,3V et, entre 0,9V et 1V, il reste plus important d'une décade environ que le courant circulant dans la structure modélisée.

Afin de prendre en compte les fuites de courant existant dans la structure de test du guide passif de l'AOS, une couche tampon InP(N) a été introduite. En effet, après avoir examiné les étapes du procédé de fabrication des AOSs, il est apparu que la préparation des surfaces (nettoyage à l'acide sulfurique) avant la reprise d'épitaxie InGaAsP/InP(P), semble être une étape sensible du procédé de fabrication. Les travaux d'analyse de défaillance de M. Pommies sur la diode laser BRS 1,55 μ m ont notamment mis en évidence que cette préparation (nettoyage des surfaces InP(N) et de la zone active

InGaAsP à l'acide sulfurique et au Brome) pour la diode laser BRS pourrait être à l'origine de l'apparition des défauts cristallins aux bords du guide actif InGaAsP, du fait de la présence de résidus de polymères provenant de la résine de masquage, constituant un point névralgique de cette technologie.

L'étape de préparation avant la reprise d'épitaxie InP(P) du composant AOS concerne la surface du guide passif et celle du guide actif. **Les défauts consécutifs à la préparation de la surface du guide passif perturberaient alors sur toute la longueur du composant AOS, la croissance InP(P) avec localement des zones de fortes contraintes générant des dislocations. La principale conséquence de l'apparition de ces dislocations serait alors l'augmentation des centres recombinants non radiatifs aux bords du guide passif InGaAsP qui entraînerait l'apparition d'un fort courant de fuite à bas niveau de la caractéristique I(V) de l'AOS.**

L'analyse de la luminescence des rubans par analyse de topoluminescence sur des diodes laser BRS 1,55 μm avant la reprise d'épitaxie, des travaux de A. Guichardon, a indiqué qu'une augmentation d'intensité avait été constatée après l'attaque chimique utilisée pour améliorer l'état de surface des flancs des mésas initialement gravés par RIE. Après la reprise d'épitaxie InP sur la couche active et dans le cas d'un ruban enterré, les porteurs ont la possibilité de diffuser et de se recombiner à l'interface de reprise d'épitaxie entre l'InP(P) et l'InP(N). En effet, l'hypothèse faite est que l'auto-polarisation de la double hétérostructure ne devient efficace que si le processus de recombinaisons radiatives est plus rapide que la vitesse de recombinaisons non-radiatives sur les défauts latéraux. Ces dernières ont une forte influence sur les recombinaisons totales de la couche active, qui diminue avec l'augmentation du courant. Leur conséquence doit donc être analysée pour des injections proches de celle du seuil laser. De plus, ces recombinaisons non-radiatives semblent être fortement corrélées à la largeur du ruban puisqu'une réduction d'un facteur 50 sur la largeur du ruban contribue à doubler le courant de seuil de par les modifications qu'elles entraînent dans la topologie du transport électrique.

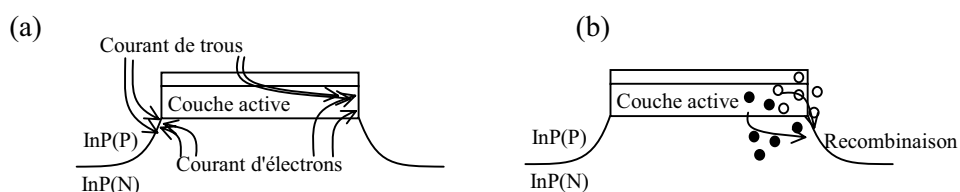


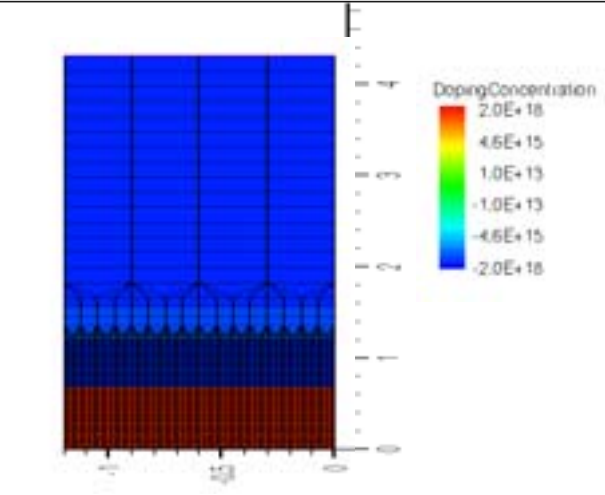
Figure 107 : Représentation des courants de recombinaisons possibles à l'interface latérale du ruban (a) et celui lié à la séparation des porteurs par le champ électrique de la zone active (b) [92]

Les travaux de ces derniers rapportent que les défauts présents à une interface de deux matériaux A/B peuvent être modélisés par l'ajout d'une couche de matériau A de faible épaisseur et dont la durée de vie des porteurs dans cette couche est dégradée, c'est à dire diminuée [36, 41]. En effet, la durée de vie des porteurs dans une couche matériau est inversement proportionnelle au taux de recombinaisons non radiatives. La diminution de la durée de vie des porteurs dans la couche matériau

A favorise donc le taux de recombinaisons non radiatives dans ce dernier et permet alors de simuler la présence de défauts tels que des dislocations dans le matériau.

La présence de défauts, pour les diodes laser BRS, aux bords de la zone active, dont l'origine est la préparation des surfaces avant la reprise d'épitaxie a été démontrée. Une hypothèse consiste à juger, comme similaires, les conséquences de cette préparation pour la diode laser BRS et celle de la préparation de la surface du guide passif avant la reprise d'épitaxie pour le composant AOS. Le modèle de couche tampon pour l'AOS simulé est donc identique à celui des diodes laser BRS. La couche tampon est donc une couche InP(N) permettant la prise en compte des défauts aux bords du guide passif. La durée de vie des porteurs dans l'InP fortement dopé ($>1.10^{18}$ at/cm³) est de 5.10^{-10} s [38]. La durée de vie des porteurs de l'InP(N) pour la couche tampon dégradée a été portée à une valeur supérieure 5.10^{-12} s (valeur similaire à celle répertoriée dans la littérature pour des modèles dynamiques de diodes laser ou d'AOSs) [88, 89, 90, 91]. En effet, la diminution de la durée de vie des porteurs dans InP permet de traduire des niveaux localisés en énergie dans la bande interdite ou la présence de centres de recombinaisons non radiatives. La capture des porteurs sur des défauts d'interface fige le niveau de Fermi profondément dans le gap induisant une courbure des bandes de part et d'autre de la jonction. Il en résulte un canal de potentiel favorable aux porteurs majoritaires voyant diminuer leur barrière de potentiel [97, 98].

La structure modélisée en 2 dimensions consiste en l'introduction d'une couche tampon d'épaisseur 50 nm et localisée au niveau de l'interface entre le guide passif (InGaAsP) et la couche InP(N), cette structure est présentée figure 108.

Structure simulée	Maillage et paramétrage de la structure simulée								
<p style="text-align: center;">Anode</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr><td>InP – Na = $1.5e18$ – e = 230nm</td></tr> <tr><td>InP – Na = $7e17$ – e = 470nm</td></tr> <tr><td>InP – Na = $0.1e16$ – e = 50nm</td></tr> <tr><td>InP – Na = $1e18$ – e = 620nm</td></tr> <tr><td>InP – Nd = $3e18$ – e = 250nm</td></tr> <tr style="border: 2px dashed black;"><td><i>InP – Nd = $3e18$ – e = 50nm</i></td></tr> <tr><td>Passif InGaAsP($\lambda=1.17\mu\text{m}$) – Nd = $3e18$ – e = 150nm</td></tr> <tr><td>InP – Nd = $3e18$ – e = 300nm</td></tr> </table> <p style="text-align: center;">Cathode</p> <p style="text-align: center;">Longueur = $1\mu\text{m}$ Largeur = $1,2\mu\text{m}$</p>	InP – Na = $1.5e18$ – e = 230nm	InP – Na = $7e17$ – e = 470nm	InP – Na = $0.1e16$ – e = 50nm	InP – Na = $1e18$ – e = 620nm	InP – Nd = $3e18$ – e = 250nm	<i>InP – Nd = $3e18$ – e = 50nm</i>	Passif InGaAsP($\lambda=1.17\mu\text{m}$) – Nd = $3e18$ – e = 150nm	InP – Nd = $3e18$ – e = 300nm	 <p style="text-align: right;">Doping Concentration 2.0E+18 4.6E+15 1.0E+13 -1.0E+13 -4.6E+15 -2.0E+18</p> <p style="text-align: center;">Nombre d'éléments (rectangles et triangles) : 5080 Nombre de nœuds : 10225</p>
InP – Na = $1.5e18$ – e = 230nm									
InP – Na = $7e17$ – e = 470nm									
InP – Na = $0.1e16$ – e = 50nm									
InP – Na = $1e18$ – e = 620nm									
InP – Nd = $3e18$ – e = 250nm									
<i>InP – Nd = $3e18$ – e = 50nm</i>									
Passif InGaAsP($\lambda=1.17\mu\text{m}$) – Nd = $3e18$ – e = 150nm									
InP – Nd = $3e18$ – e = 300nm									

Couche tampon dont la durée de vie des porteurs a été diminuée ($\tau_{\text{réf}} = 5.10^{-10}$ s \Rightarrow $\tau_{\text{dégradé}} = 5.10^{-12}$ s)

Figure 108 : Structure et conditions de simulation du guide passif de l'AOS (structure de test) en tenant compte de la couche tampon (InP-N)

La modification des dimensions de la structure modélisée, prenant en compte les défauts liés à la préparation de la surface du guide passif, a été effectuée de façon identique à la simulation de la structure de test du guide passif. La comparaison entre les caractéristiques I(V) expérimentale et modélisée du guide passif de l'AOS peut donc également être effectuée grâce à la prise en compte du facteur multiplicatif ramenant les dimensions du modèle aux dimensions de la structure de test expérimentale. En effet, la couche tampon n'a pas été rajoutée à la structure du guide passif modélisée mais la couche de matériau InP(N) d'épaisseur 300nm a été remplacé par :

- ☞ une couche matériau identique mais de 250nm d'épaisseur,
- ☞ et une couche de matériau identique mais de 50nm d'épaisseur et dont la durée de vie des porteurs est fixée à une valeur de 5.10^{-12} s.

La figure 109 présente les courbes I(V) modélisées (sans et avec la présence de la couche tampon) et expérimentale. L'existence et le rôle des zones implantées ont été, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, caractérisés notamment dans les travaux de P. A. Barnes [36, 41, 92]. En effet, il a démontré que l'effet des zones implantées de la diode laser à double hétérostructure enterrée sur la caractéristique I(V) de ce composant est observable à bas niveau, pour une tension de polarisation comprise entre 0V et 0,1V. Le comportement de ces zones implantées correspond à la caractéristique I(V) d'une résistance de l'ordre du $M\Omega$. Les procédés technologiques d'implantation de la diode laser à double hétérostructure enterrée et de l'AOS étant similaires, le modèle des zones implantées de l'AOS simulé, est celui d'une résistance de $10M\Omega$, identique à celui des diodes laser BRS proposé par A. Guichardon. Cette valeur de résistance permet le lissage de la caractéristique expérimentale de la structure de test du guide passif par le modèle envisagé.

La figure 109 présente donc également le modèle complet de la structure du guide passif avec la prise en compte des défauts situés à l'interface InP(N)/InGaAsP et de la résistance induite par les zones implantées.

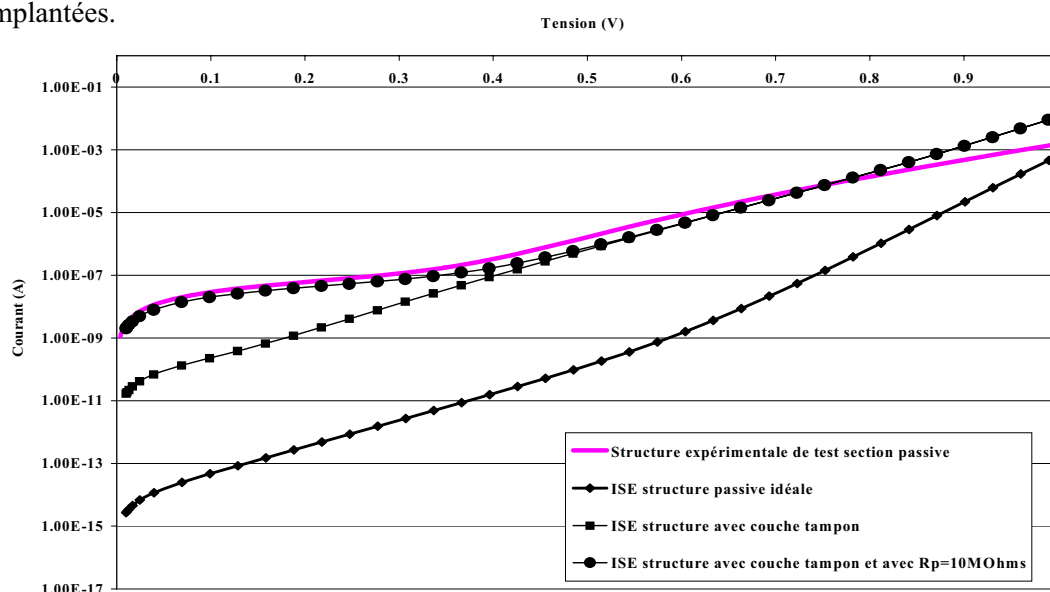
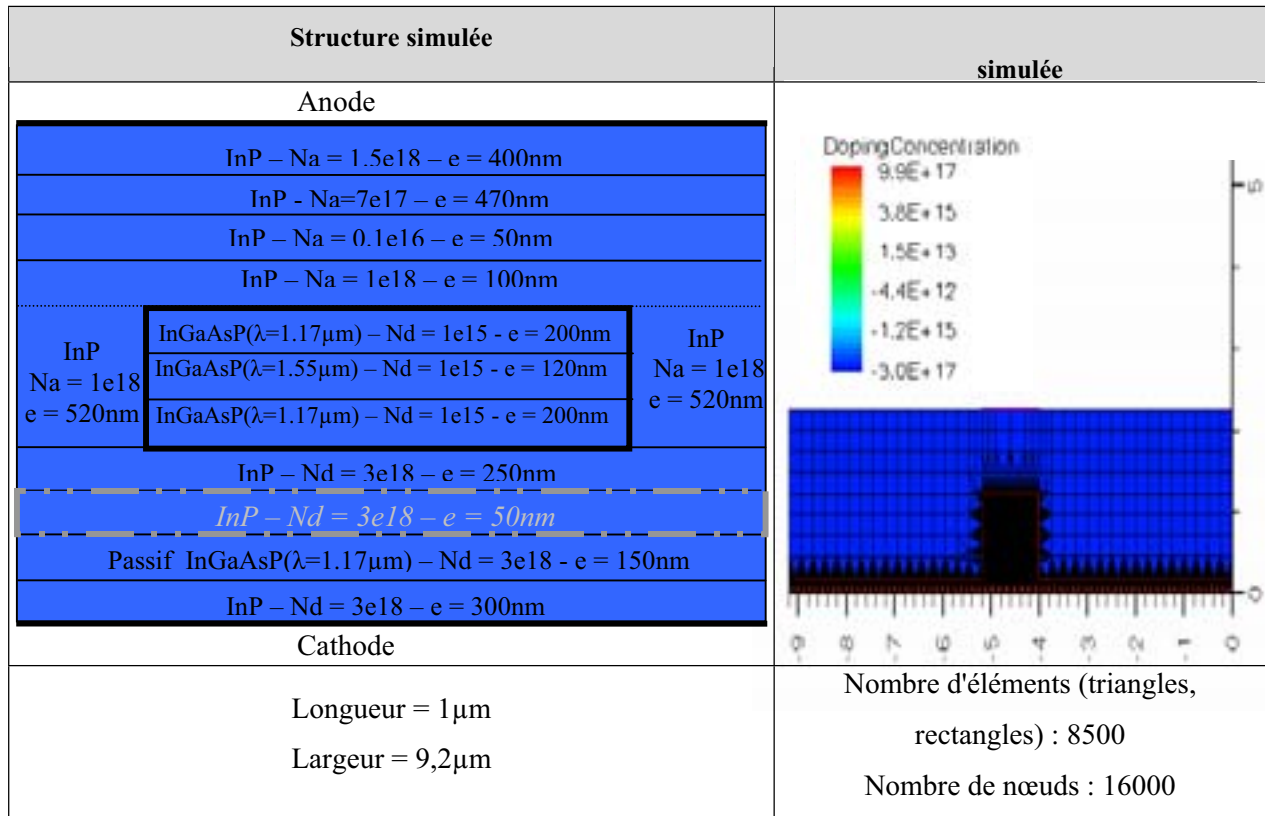


Figure 109 : Caractéristiques I(V) expérimentale et modélisée en tenant compte de la couche tampon (InP-N) du guide passif (InGaAsP - $\lambda = 1,17\mu m$)

Les résultats des modélisations effectuées pour le lissage de la caractéristique I(V) de la structure de test du guide passif permettent de définir avec précision le modèle de cette structure où la prise en compte de la présence de défauts liés à la préparation de la surface du guide passif (durée de vie des porteurs dans la couche tampon de l'ordre de 5.10^{-12} s) et de la résistance des zones implantées est nécessaire ($R=10M\Omega$).

➔ **Lissage de la structure AOS**

Le modèle du guide passif établi, la prise en compte des défauts liés à la préparation de la surface du guide passif et de la résistance des zones implantées est effectuée pour la structure AOS complète. La structure de test modélisée est présentée figure 110 et les caractéristiques I(V) modélisée et expérimentale de l'AOS sont présentées en figure 111.



- Hétérostructure définissant la zone active
- Couche tampon dont la durée de vie des porteurs a été diminuée ($\tau_{réf} = 5.10^{-10} s \Rightarrow \tau_{dégradé} = 5.10^{-12} s$)

Figure 110 : Structure et conditions de simulation de l'AOS en tenant compte de la couche tampon placée au niveau de l'interface InP(N) et du guide passif (InGaAsP - $\lambda = 1,17\mu m$)

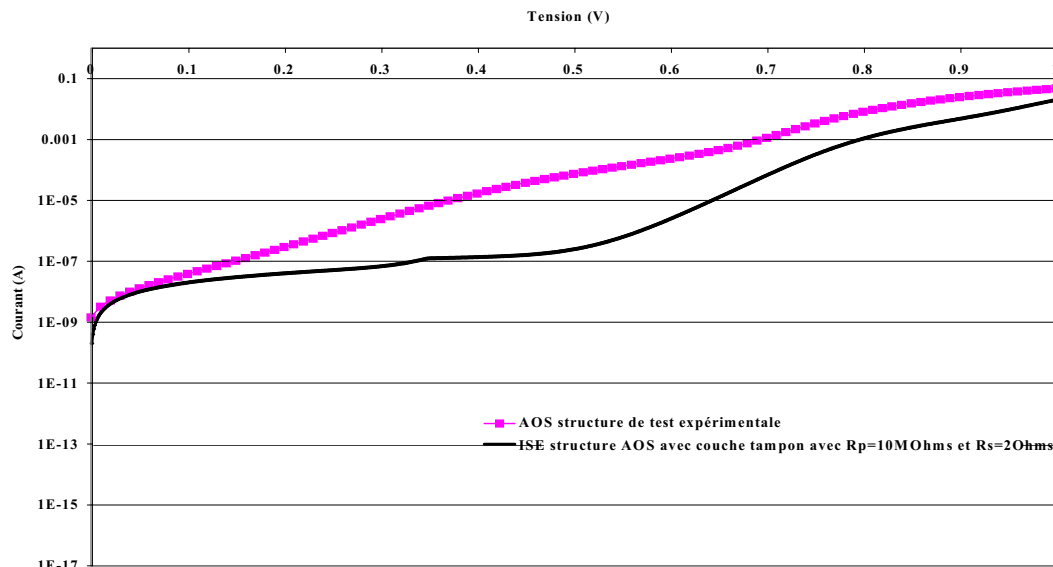


Figure 111 : Caractéristiques I(V) expérimentale et modélisée de la structure AOS

La modélisation de l'échantillon à taille réelle est possible mais dans l'objectif de respecter le nombre de nœuds maximum du logiciel ISE, sans modifier les résultats de simulation, deux dimensions de la structure modélisée ont été diminuées par rapport aux dimensions de l'échantillon :

- ⊖ l'épaisseur de la dernière couche matériau InP(P) se situant en dessous de la couche de contact InGaAs a été réduite de 3000nm (épaisseur réelle) à 400nm (épaisseur modélisée),
- ⊖ la longueur totale a été réduite de 700 μ m (longueur réelle) à 1 μ m (longueur modélisée).

La comparaison entre les caractéristiques I(V) expérimentale et modélisée de l'AOS peut alors être effectuée grâce à la prise en compte d'un facteur multiplicatif ramenant les dimensions du modèle aux dimensions de la structure de test expérimentale.

Les résultats de simulation, mis à l'échelle de la structure expérimentale, de la figure 111 démontrent que malgré la prise en compte de la présence de défauts liés à la préparation de la surface du guide passif et de la résistance des zones implantées ; le courant circulant dans la structure AOS expérimental est supérieur de 2 décades au courant circulant dans la structure modélisée pour une polarisation comprise entre 0,3V et 0,8V, correspondant à la zone active de l'AOS.

Dans l'objectif d'appréhender ce phénomène, pouvant être lié à des fuites de courant en dehors de la zone active, le diagramme de bandes de la couche active de l'AOS est présenté pour deux polarisations directes de 0,1V et 0,8V, en figure 112.

La présence d'un champ électrique interne dans la couche active à bas niveau est dû au faible dopage de celle-ci. Ce champ électrique incline les bandes et induit donc une densité de porteurs inhomogène et favorise le confinement des porteurs dans la couche active InGaAsP. Identiquement aux diodes laser BRS, la zone active de l'AOS étant enterrée, les porteurs ont donc la possibilité de diffuser et de se recombiner à l'interface de reprise d'épitaxie InP(N)/InP(P).

Aussi, ce n'est qu'au-delà d'une certaine densité de porteurs, correspondant à la saturation des défauts au niveau de cette interface, que le processus de recombinaisons radiatives dans la couche active sera

plus rapide que la vitesse de recombinaison des défauts. En effet, l'application du champ électrique extérieur réduit progressivement l'inclinaison du schéma de bandes et tend alors à homogénéiser la densité de porteurs jusqu'au régime de bandes plates atteint pour une polarisation proche de 0,9V.

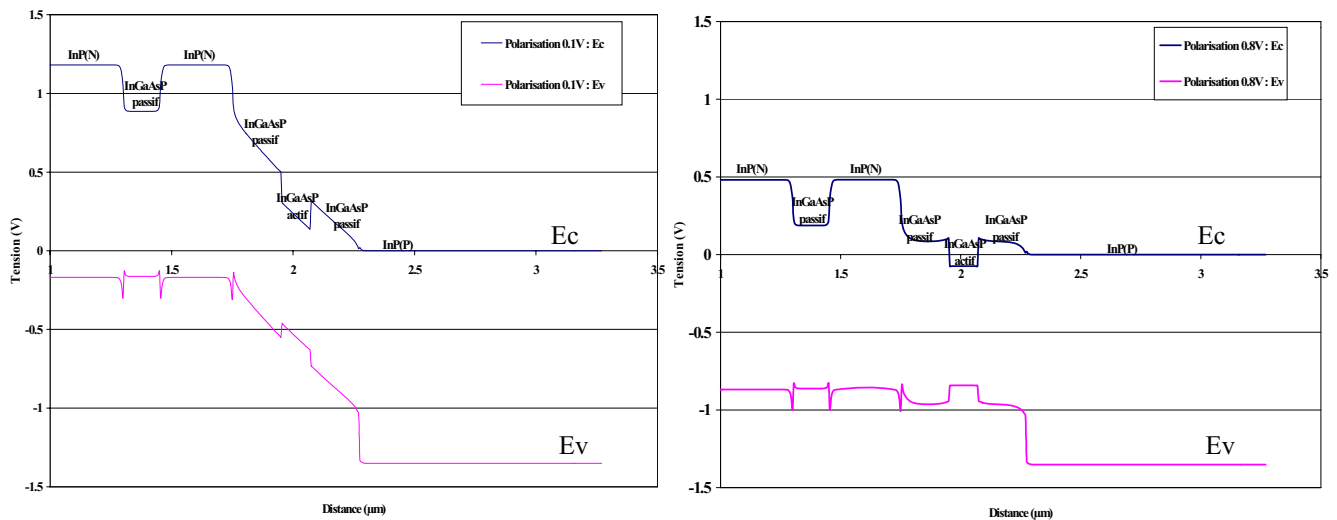


Figure 112 : Diagramme de bandes de la couche active de la structure AOS
Respectivement sous 0,1V et 0,8V de polarisation directe

Afin d'améliorer le modèle 2 dimensions de la structure AOS, différents essais de simulation ont été entrepris en tenant compte des hypothèses suivantes :

- Prise en compte d'une seconde couche tampon à l'interface InP(P)/InGaAsP du guide actif (dégradation de la durée de vie des porteurs identiquement à la couche tampon précédente) dans l'objectif de modéliser les probables dislocations dues à la préparation des surfaces avant la reprise d'épitaxie InP(N)/InP(P) :
 - ☞ Résultat : pas de modification significative de la caractéristique I(V) simulée. Le modèle de la structure AOS complète en 2 dimensions reste celui présenté en figure 110.
- Prise en compte des effets de surface pouvant engendrer un courant de fuite à la surface du composant :
 - ☞ Résultat : pas de modification significative de la caractéristique I(V) simulée. Le taux de recombinaisons en surface est très faible devant le taux de recombinaisons en volume (SRH) : le modèle de la structure AOS complète en 2 dimensions reste donc identique à celui présenté en figure 110.

De plus, d'autres modifications (dégradation de paramètres physiques) du modèle de l'AOS ont été entreprises mais celles-ci n'ont pas été retenues car il est très difficile de les relier à un mécanisme physique mis en jeu dans l'AOS.

Enfin, il faut noter que les essais de modélisation en 3 dimensions de la structure de l'AOS n'ont pas permis d'apporter davantage d'hypothèses possibles sur le lissage complet de la caractéristique $I(V)$ du composant AOS expérimental. Après de nombreux essais infructueux de simulation effectués pour modéliser ces fuites de courant, qui, si l'on se réfère aux travaux de modélisation de la diode laser BRS, semblent être caractérisées par des défauts proches de la zone active, le modèle physique cohérent obtenu pour la structure AOS complète en 2 dimensions est celui présenté en figure 110.

Néanmoins, afin de poursuivre notre étude sur l'identification et la localisation des mécanismes de dégradation des AOSs et établir un lien avec la fiabilité, des modélisations physiques de l'évolution des caractéristiques $I(V)$ ont été effectuées **sur la base du modèle en 2D établi précédemment. L'objectif est de comparer ces dernières aux caractéristiques $I(V)$ des AOSs dégradés au cours des tests de vieillissement menés dans le chapitre 3.**

3.4/ Modélisation physique 2D de l'AOS transféré dégradé après vieillissement

3.4.1/ Méthode d'étude pour la modélisation de l'AOS dégradé

L'objectif de cette étude est d'identifier et de localiser l'origine des dégradations affectant le composant AOS, les évolutions des caractéristiques $I(V)$, en initial et après des vieillissements accélérés de faible durée (<1500h). Des simulations ont alors été réalisées pour proposer une interprétation de ces variations. Elles ont pour but d'apporter des éléments sur la nature et la localisation des dégradations de l'ensemble des composants testés lors de cette étude. En effet, les hypothèses émises, suite à l'évolution des paramètres fonctionnels suivis (cf. chapitre 3), nécessitent la modélisation des caractéristiques $I(V)$, avant et après vieillissement, pour leurs validations.

Le principal axe d'étude a été développé pour l'interprétation du dédoublement observé pour une tension de polarisation comprise entre 0,3V et 0,9V de $I(V)$ sur les composants des lots 1, 2 et 3. Cette évolution a donné suite à l'hypothèse d'une dégradation de la zone active liée à des dislocations, proches de cette zone, dues à la préparation de la surface du guide actif InGaAsP avant la reprise d'épitaxie InP(P).

De manière analogue aux modélisations de l'AOS effectuées jusqu'ici, les paramètres physiques et de maillage validés ont été implantés. Les simulations sont basées sur la structure de l'AOS complète "idéale" où les paramètres physiques de certaines couches ont été modifiés afin de caractériser l'évolution des caractéristiques $I(V)$ des AOSs vieillis (pas de prise en compte de la couche tampon InP(N) permettant la modélisation des fuites de courant au niveau du guide passif, identifiée dans les précédents résultats).

3.4.2/ Conditions de simulation

Le modèle pour la structure AOS complète utilisé pour la caractérisation de la dégradation de la couche active est présenté figure 113.

Structure simulée			
Anode			
InP – Na = 1.5e18 – e = 400nm			
InP – Na=7e17 – e = 470nm			
InP – Na = 0.1e16 – e = 50nm			
InP – Na = 1e18 – e = 100nm			
InP Na = 1e18 e = 520nm	InGaAsP($\lambda=1.17\mu\text{m}$) – Nd = 1e15 - e = 200nm		InP Na = 1e18 e = 520nm
	InGaAsP($\lambda=1.55\mu\text{m}$) – Nd = 1e15 - e = 50nm		
	InGaAsP($\lambda=1.55\mu\text{m}$) – Nd = 1e15 - e = 70nm		
	InGaAsP($\lambda=1.17\mu\text{m}$) – Nd = 1e15 - e = 200nm		
InP – Nd = 3e18 – e = 300nm			
Passif InGaAsP($\lambda=1.17\mu\text{m}$) – Nd = 3e18 - e = 150nm			
InP – Nd = 3e18 – e = 300nm			
Cathode			
Longueur = 1 μm		Nombre d'éléments (rectangles et triangles) : 8500 Nombre de nœuds : 16000	
Largeur = 9,2 μm			

Hétérostructure définissant la zone active

Couche tampon dont la durée de vie des porteurs a été diminuée ($\tau_{\text{réf}} = 10.10^{-9}\text{s}$ à $\tau_{\text{dégradé}} = 10.10^{-12}\text{s}$)

Figure 113 : Structure et conditions de simulation de l'AOS en tenant compte de la couche tampon placée au niveau de la couche active InGaAsP

La durée de vie des porteurs dans l'InGaAsP non dégradé est de 10.10^{-9}s [38]. La durée de vie des porteurs de l'InGaAsP pour les couches tampon modélisées est comprise entre 10.10^{-9}s et 10.10^{-12}s . Cette dernière valeur permet de constater le dédoublement I(V) pour une tension de polarisation comprise entre 0,3V et 0,9V (figure 114). Cette valeur correspond à la valeur utilisée pour la dégradation de la durée de vie des porteurs dans InGaAsP recensés dans la bibliographie [88, 89, 90, 91].

La modélisation de l'échantillon à taille réelle est possible mais nécessite un temps de modélisation très important. Les dimensions de l'échantillon modélisé sont les suivantes :

- ☞ l'épaisseur de la dernière couche matériau InP(P) se situant avant la couche de contact InGaAs a été réduite de 3000nm (épaisseur réelle) à 400nm (épaisseur modélisée),
- ☞ la longueur totale a été réduite de 700 μm (longueur réelle) à 1 μm (longueur modélisée).

3.4.4/ Résultats de modélisation

La comparaison des caractéristiques I(V) modélisée dégradée et non dégradée de la structure complète "idéale" de l'AOS est présentée en figure 114.

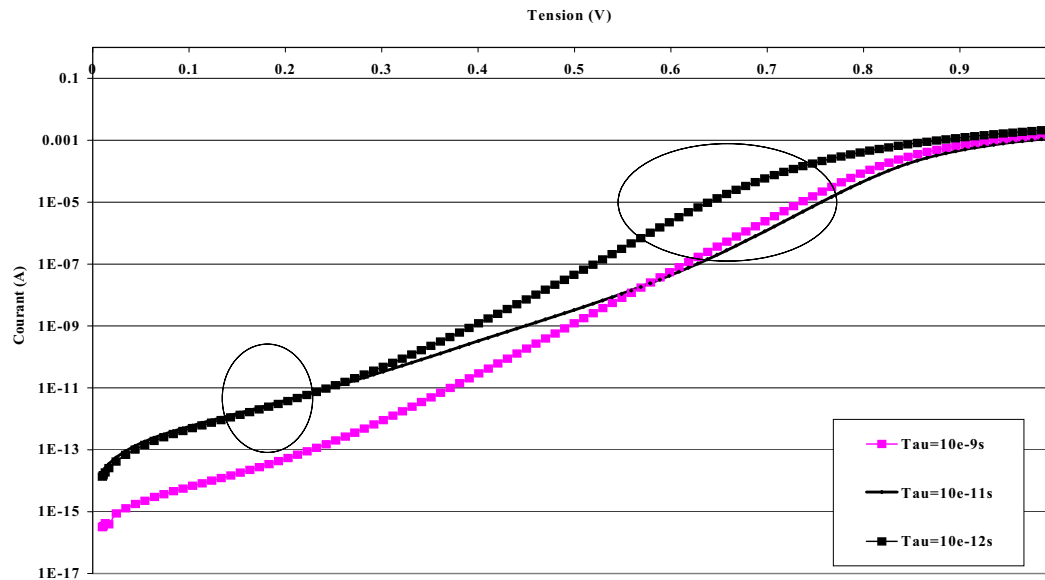


Figure 114 : Impact de la dégradation de la durée de vie dans la couche tampon InGaAsP sur la caractéristique I(V) modélisée de l'AOS

A bas niveau (tension $< 0,3V$), on constate la faible influence de la durée de vie dégradée des porteurs dans la couche active. En effet, pour une polarisation inférieure à $0,3V$, comme nous l'avons vu précédemment, le taux de recombinaisons non radiatives à l'interface InP(N)/InP(P) est plus important que le taux de recombinaisons radiatives (cf. diagramme de bande de la couche active) soulignant ainsi la faible influence de la durée de vie des porteurs de la couche active sur la caractéristique I(V) à très bas niveau (polarisation $< 0,3V$).

De plus, le dédoublement observé, pour une polarisation comprise entre $0,3V$ et $0,9V$, correspond à une augmentation du courant de saturation ($1/2$ décade) de la diode d'hétérojonction InGaAsP/InP représentant la zone active. Le mode de défaillance graduel renforce l'hypothèse d'un mécanisme de dégradation associé à la formation de centres de recombinaisons non radiatifs proches de la zone active (τ diminue), déjà démontrée pour les diodes laser par M. Fukuda [5], et accentuée par la température.

L'hypothèse émise, dans le chapitre 3 et corroborée par les résultats de l'analyse de défaillance (spectre d'électroluminescence), quant à l'identification et à la localisation du mécanisme de dégradation caractérisé par le dédoublement I(V) pour une tension de polarisation comprise entre $0,3V$ et $0,9V$, semble confirmée par les résultats de modélisation :

- ✓ Ce mécanisme de dégradation est vraisemblablement lié à un problème de fabrication intrinsèque au processus plutôt qu'à une perte d'efficacité optique de la cavité elle-même (augmentation des pertes internes ou dégradation des miroirs).

De plus, l'étude d'une possible mise en relation qualitative des différents paramètres suivis a été effectuée. En effet, pour deux composants après le test du lot 3, les évolutions de la caractéristique I(V), de la puissance optique, du pseudo courant de seuil, ainsi que la durée de vie des porteurs dégradés dans la couche active et la durée de vie de ces composants ont été comparés dans le tableau 21.

		AOS 124 (lot 3)	AOS 123 (lot 3)
EXPERIMENTAL	Dédoublément en courant pour une polarisation comprise entre 0,3V et 0,8V	≈ 43%	≈ 64%
	Perte de puissance optique à 200mA [après 270mA-100°C-1500h]	41%	48%
	Augmentation du pseudo courant de seuil [après 270mA-100°C-1500h]	135%	166%
	Durée de vie du composant (h) [après une augmentation de 20% de I@0,6mW]	1010	716
SIMULATION	Durée de vie des porteurs dégradés (s)	$\tau_{\text{dégradé}} = \tau_{\text{initial}} / 3$	$\tau_{\text{dégradé}} = \tau_{\text{initial}} / 4$

Tableau 21 : Synthèse des dérives obtenues sur deux AOSs dégradés du lot 3

Le tableau 21 permet d'observer que plus la durée de vie des porteurs diminue (couche active dégradée) plus la durée de vie du composant est réduite. Ce dernier résultat montre le double intérêt du suivi de la caractéristique I(V) du composant AOS, qui permet de constater l'impact de la dégradation du composant sur sa durée de vie et donc sur sa fiabilité, et de la modélisation de cette caractéristique autorisant l'identification et la localisation du mécanisme de dégradation des composants AOSs.

Un modèle d'AOS permettant de prendre en compte des fuites de courant à bas niveau (présence de défauts proches du guide passif) a été établi. De plus, l'objectif de montrer la présence de défauts à l'interface InGaAsP/InP(P) a été atteint. Nous avons précisé l'ordre de la durée de vie des porteurs qui est proche de $10 \cdot 10^{-12}$ s à cette interface lorsque l'AOS présente un dédoublement entre 0,3V et 0,8V de la caractéristique I(V) lors de vieillissement accéléré, au lieu d'une durée de vie de $10 \cdot 10^{-9}$ s à cette interface lorsque l'AOS est non dégradé. Ces constatations montrent que l'analyse des mécanismes de défaillance peut bénéficier de l'apport des simulations 2D par une validation quantitative de la variation intrinsèque (dispersion technologique) ou extrinsèque (vieillessement) des

paramètres physiques et des contributions relatives des mécanismes déterminant le fonctionnement d'un AOS.

3.4.3/ Synthèse des résultats de modélisation

Un modèle d'AOS permettant de prendre en compte des fuites de courant à bas niveau (présence de défauts proches du guide passif) a été établi. De plus, l'objectif de montrer la présence de défauts à l'interface InGaAsP/InP(P) a été atteint. Nous avons précisé l'ordre de la durée de vie des porteurs qui est proche de 10.10^{-12} s à cette interface lorsque l'AOS présente un dédoublement entre 0,3V et 0,8V de la caractéristique I(V) lors de vieillissement accéléré, au lieu d'une durée de vie de 10.10^{-9} s à cette interface lorsque l'AOS est non dégradé.

4/ PROPOSITION D'UN PLAN DE TESTS EXPERIMENTAL COMPLEMENTAIRE

Cette dernière partie synthétise, dans le tableau 22, les tests d'expertises proposés en vue de compléter l'analyse des mécanismes de dégradation des AOSs. L'objectif de ce plan est de mettre en évidence les phénomènes d'usure qui n'ont pu être étudiés lors de ces travaux de recherche et durant le plan de qualification de l'AOS.

Ce tableau a donc été établi à partir de l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus au cours de ces travaux de recherche mais également à partir des conclusions effectuées lors du plan de qualification par A. Denolle [79]. De plus, des tests de vieillissement sous injection lumineuse ont également été envisagés afin de pouvoir étudier l'aspect "optique" du vieillissement des AOSs.

Tests de robustesse et de vieillissement accéléré	Paramètres à suivre	Objectif
Stockage en température à 80°C et à 100°C	Puissance optique et spectre optique mesurés à 200mA	Analyser l'effet de la température seule
Essais de vieillissement à 40°C, 53°C et 80°C puces alimentées à 200mA	Puissance optique et spectre optique mesurés à 200mA	I. Analyser l'effet du courant pour confirmer que 270mA ne constitue pas une valeur de courant de test trop élevé. II. Analyser les effets à fort courant d'une température de test faible.
Essais de vieillissement à 40°C, 53°C et 80°C puces alimentées à 270mA	Puissance optique et spectre optique mesurés à 200mA	

Tableau 22 : Plan d'expertise complémentaire proposé

5/ CONCLUSION

L'intégration actuelle de la fiabilité doit prendre en compte les simulations physiques qui demeurent une étape indispensable dans le cadre d'une filière technologique en développement et qui s'inscrivent également dans le prolongement des analyses de défaillance.

Dans la première partie de ce chapitre, une analyse de défaillance sur les AOS du lot 1 a été menée. Les trois types de signatures de défaillance identifiés dans le chapitre 3 ont été étudiés au travers de trois grands types d'analyse :

- L'électroluminescence.
- La cathodoluminescence.
- Les mesures spectrales.

Nous avons mis en évidence les limitations des deux premières techniques en matière de détection de défaut supposé altérer le ruban enterré. En revanche, les mesures spectrales après vieillissement ont pu apporter des informations susceptibles de corroborer les hypothèses émises dans le chapitre précédent, notamment la dégradation de la zone active de l'AOS. L'analyse des variations du spectre d'émission en fonction du courant d'alimentation, notamment sur un composant dégradé, a montré le faible décalage en courant de la longueur d'onde centrale ($\approx 15\text{nm}$) vers les faibles longueurs d'onde en comparaison d'un composant non dégradé ($\approx 35\text{nm}$) lié au phénomène classique de "tracking"), probablement induite par l'existence de pièges dans la bande interdite, sur lesquels les porteurs peuvent se recombinaison de façon non radiative.

La deuxième partie de ce chapitre s'est attachée à démontrer les apports de la simulation physique bi-dimensionnelle (2D) pour la détermination de l'origine des dégradations. Dans un premier temps, il a été mis en évidence les limitations d'une modélisation électrique, sous le logiciel IC-CAP, basée sur un modèle statique équivalent proche d'une diode laser BRS notamment par une difficulté de liaison entre les valeurs des éléments du schéma et l'architecture d'un AOS :

- résistance série élevée de la diode d'homojonction,
- très faible valeur de la résistance de fuite,
- valeurs élevées des courants de saturation des deux diodes D_1 et D_2 .

De par ses spécificités topologiques, structurelles et comportementales, un AOS est un dispositif semiconducteur dont la simulation physique 2D nécessite une démarche cohérente et rigoureuse. La ligne directrice de cette approche a fait l'objet d'une optimisation des conditions de simulation à partir de structure de difficulté croissante.

Les premières simulations (ETHER) ont permis d'établir et de valider les conditions de simulation sous ISE :

- ✓ Validité des paramètres physiques des matériaux InP et InGaAsP à partir d'une corrélation des résultats en utilisant le logiciel ETHER sur des structures simples (homojonction).
- ✓ Maillage resserré près des jonctions et des flancs du ruban avec un nombre de nœuds maximum de 20000 permettant une convergence efficace des résultats.

L'influence de la coupe transversale et longitudinale d'un AOS sur la caractéristique I(V) a été également étudiée soulignant la prépondérance d'un effet longitudinal. En considérant ce dernier effet, deux résultats majeurs ont été obtenus :

- Le lissage correct de la caractéristique I(V) du guide passif de l'AOS en prenant en compte les fuites de courant existant dans la structure de test du guide passif de l'AOS et en introduisant une couche tampon InP(N). Cette dernière permet de simuler l'impact de la mauvaise qualité de la préparation de la surface avant la reprise d'épitaxie InP(P) sur InGaAsP ; la croissance InP(P) pouvant engendrer localement des zones de fortes contraintes générant des dislocations.
- Une limitation du modèle 2D a été mise en lumière malgré la prise en compte de la présence de défauts liés à la préparation de la surface du guide passif et de la résistance des zones implantées ; le courant circulant dans la structure AOS expérimental est supérieur de 2 décades au courant circulant dans la structure modélisée pour une polarisation comprise entre 0,3V et 0,8V.

Dans une dernière partie, l'apport des simulations 2D a été conforté notamment par une validation quantitative de la variation extrinsèque (vieillessement) des paramètres physiques pour l'analyse des mécanismes de dégradation d'un AOS. La durée de vie des porteurs pour les couches tampon InGaAsP modélisées a été dégradée de 10ns à 10ps à l'origine du dédoublement de la caractéristique I(V) pour une tension de polarisation comprise entre 0,3V et 0,9V. Le mode de défaillance graduel renforce l'hypothèse d'un mécanisme de dégradation associé à la formation de centres de recombinaisons non radiatives proches de la zone active (τ diminue), déjà démontrée pour les diodes laser. Enfin, une corrélation a été établie entre la diminution de la durée de vie des porteurs dans la couche active et la durée de vie des AOS, mesurée à partir de l'évolution des paramètres électro-optiques en fonction du temps de vieillissement.

Conclusion générale

Ce sujet de thèse s'inscrit dans la thématique de recherche de l'équipe "Fiabilité des composants et systèmes optoélectroniques" du Laboratoire IXL et les travaux, menés en collaboration avec ALCATEL Optronics, ont eu pour objectif d'analyser les mécanismes de défaillance et d'estimer la fiabilité d'une technologie d'amplificateur optique à semiconducteur (AOS) 1,55 μm pour des applications de télécommunication par fibre optique. En effet, la fiabilité opérationnelle limite encore les performances de ces dispositifs. Par la détermination de l'origine et de la localisation des mécanismes de défaillance génériques et leurs facteurs d'aggravation, des actions correctives sur la technologie peuvent être proposées afin de stabiliser ces filières en phase de maturité.

1) *Le premier chapitre* a, tout d'abord, situé le contexte actuel du marché de l'amplification optique et a donné une description, relativement exhaustive, du champ d'applications d'un AOS. Deux dispositifs ont été plus particulièrement comparés : l'EDFA (amplificateur à fibre dopée Erbium) et l'AOS. De par leurs performances, l'EDFA (faible figure de bruit, fort gain ou puissance de sortie mais faible densité d'intégration) et l'AOS, occupent une place importante dans le marché des composants pour les télécommunications. Les avantages d'un AOS sont les suivants :

- forte densité d'intégration,
- réponse rapide lors du pompage optique autorisant des fonctions logiques dont le temps de commutation est de l'ordre de la nanoseconde,
- non-linéarité du gain optique permettant d'envisager des applications telles que le multiplexage ou la conversion de longueur d'onde.

Dans une seconde partie, la technologie *transférée* du Centre de Recherches d'ALCATEL CIT vers le site de production (ALCATEL Optronics) a été présentée de manière détaillée et les phénomènes physiques associés à ce composant sont rappelés.

La difficulté majeure actuelle pour l'estimation de la fiabilité de composants optoélectroniques à haute valeur ajoutée tels que l'AOS réside dans la complexité architecturale croissante de ces composants. Les notions de fiabilité ont donc également été rappelées dans un cadre général.

2) *Le second chapitre* est consacré à l'étude des paramètres électro-optiques de l'AOS transféré 1,55 μm mais également à celle des bancs d'analyse permettant les mesures de ces paramètres.

Pour étudier l'ensemble de ces éléments, quatre sous-parties ont été développées :

- *Analyse et comparaison des principes de fonctionnement de la diode laser BRS et de l'AOS permettant d'appréhender le comportement de ce dernier en régime linéaire (amplification).* La différence technologique avec une diode laser réside dans le fait que pour ce dernier, l'effet de contre-réaction (régime d'oscillation) est minimisé pour éviter l'effet du seuil laser. Lorsque le phénomène d'émission stimulée se produit dans l'AOS, celui-ci ne devient pas prépondérant devant les autres phénomènes de recombinaison et en particulier devant l'émission spontanée (gain simple passage de l'onde), contrairement à une diode laser.
- *Etude des caractéristiques électriques et optiques de l'AOS en fonction des paramètres technologiques de la structure du composant.* La valeur du gain fibre à fibre caractéristique de l'AOS est de 14dB pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -26dBm à 1550nm. La linéarité du gain est constatée pour une plage de courant de 30mA à 100mA. De même, la valeur de la figure de bruit caractéristique de l'AOS est proche de 14dB, pour un courant de 80mA et une puissance injectée de -26dBm à 1550nm.
- *Description et comparaison des moyens de caractérisation et des procédures mis en place pour mesurer les paramètres électriques et optiques caractéristiques de l'AOS unitaire 1,55 μ m.*
- *Evaluation des performances associée à une étude de reproductibilité et de répétabilité des bancs de mesure* présentés car une phase d'étalonnage cruciale était nécessaire notamment dans la gestion de la dissipation thermique sur le support de test. L'objectif visé par les industriels sur les coefficients de répétabilité et de reproductibilité a été atteint et les mesures effectuées sur ces trois bancs sont donc considérées comme répétables et reproductibles ; résultat essentiel pour l'étude des dérives paramétriques au cours des vieillissements accélérés.

3) **Le troisième chapitre** s'est attaché à développer un protocole expérimental pour caractériser le composant en initial et après des tests de vieillissement accéléré. Une approche de type "signatures de défaillance", basée sur un nombre de caractérisations limitées et sur une étude des mécanismes de dégradation relatifs à la technologie à évaluer, a donc été effectuée.

Une étude bibliographique a synthétisé les mécanismes de dégradation, déjà observés lors de différentes études expérimentales effectuées sur des diodes laser à ruban enterré BRS 1,55 μ m, dont l'architecture technologique est proche de celle d'un AOS [42, 43]. Ces éléments capitaux ont par conséquent servi de référence à notre travail.

Les conditions de déverminage des composants AOSs ont été déterminées et l'évolution des paramètres électro-optiques pertinents tels que la puissance optique mesurée à 200mA, la caractéristique I(V), le courant mesuré pour une puissance optique de 0,6mW, le gain optique, la figure de bruit et la puissance de saturation, au cours des vieillissements accélérés, ont été analysés. Les résultats obtenus sur l'ensemble de l'étude expérimentale sont les suivants :

- Les conditions de déverminage des AOSs ont été établies grâce aux tests de contraintes échelonnées : 50kA/cm², 100°C et 32h.
- Les conditions limites de test en vieillissement accéléré sont : 50kA/cm², 100°C.

De plus, l'identification de trois signatures de défaillance distinctes a été accomplie. Ces trois signatures de défaillance sont essentiellement caractérisées par l'évolution de la caractéristique I(V) mesurée à 25°C et présentant :

- ☞ Un dédoublement de la caractéristique I(V) entre 0,1V et 0,3V.
- ☞ Un dédoublement de la caractéristique I(V) entre 0,3V et 0,9V.
- ☞ Une caractéristique I(V) identique à celle d'une résistance au cours de test.

A la suite de ces observations, des hypothèses quant à l'identification des mécanismes de dégradation ont été proposées :

- ☞ L'hypothèse d'une dégradation de la couche active pour le dédoublement I(V) entre 0,3V et 0,9V est retenue. La cause probable est l'augmentation des centres recombinants non radiatifs proches de la zone active entraînant une diminution de la durée de vie des porteurs dans celle-ci. La présence de centres de recombinaison non radiatifs proches de la zone active est due à la gravure chimique permettant de définir les bords du ruban et à la qualité de la reprise d'épitaxie InP(P) sur InGaAsP.
- ☞ Pour les composants présentant un dédoublement I(V) entre 0,1V et 0,3V, il paraît prématuré d'émettre des hypothèses quant aux dégradations de ces composants ; les dérives observées étant trop faibles et voisines de la précision des mesures.
- ☞ Pour le composant subissant une forte dérive avec un mode de défaillance rapide et soudain, la cause probable de cette dégradation est un problème lié au report ou à l'interconnexion des puces.

Enfin, dans la dernière partie du chapitre 3, des éléments portant sur la cinétique et l'activation de la dégradation ont été développés. Une première prédiction de la distribution des durées de vie d'un AOS, en conditions opérationnelles, a été abordée à partir d'une approche originale basée sur la méthode Monte-Carlo et l'évolution temporelle du pseudo-courant de seuil mesurée à 0,6mW (loi en puissance). Le taux de défaillance des AOSs estimé à partir de cette approche est de 140 FITs dans les

conditions du profil de mission empiriquement défini par une densité de courant de 40kA/cm², une température d'utilisation de 25°C et en considérant que le critère de fin de vie des composants sous test correspond à une augmentation de 20% du pseudo-courant de seuil. Malgré une part importante de confidentialité, l'ensemble de ces travaux a pu être publié dans [R1].

4) L'intégration actuelle de la fiabilité est directement liée à la conception et à la maîtrise des procédés vis à vis des étapes critiques pouvant générer des défauts et doit prendre en compte les modélisations physiques des dégradations. Bien que la base reste expérimentale, **les simulations physiques**, demeurent des étapes indispensables dans le cadre d'une étude de fiabilité et font l'objet de *ce quatrième et dernier chapitre*.

Dans une première partie, une analyse de défaillance sur un lot d'AOS a été menée. Les trois types de signatures de défaillance, identifiés dans le chapitre 3, ont été étudiés au travers de trois techniques d'analyse :

- L'électroluminescence
- La cathodoluminescence
- Les mesures spectrales

Nous avons mis en évidence les limitations des deux premières techniques en matière de détection de défaut supposé altérer le ruban enterré. En revanche, les mesures spectrales après vieillissement ont pu apporter des informations susceptibles de corroborer les hypothèses émises dans le chapitre précédent, notamment la dégradation de la zone active de l'AOS, probablement induite par l'existence de pièges dans la bande interdite, sur lesquels les porteurs peuvent se recombinaison de façon non radiative.

La deuxième partie s'est attachée à démontrer les apports de la simulation physique bi-dimensionnelle (2D) pour la détermination de l'origine des dégradations. De par ses spécificités topologiques, structurelles et comportementales, un AOS est un dispositif semiconducteur dont la simulation physique 2D nécessite une démarche cohérente et rigoureuse. Les premières simulations ont permis d'établir et de valider les conditions de simulation sous ISE. L'influence de la coupe transversale et longitudinale d'un AOS sur la caractéristique I(V) a également été étudiée soulignant la prépondérance d'un effet longitudinal. En considérant ce dernier effet, deux résultats majeurs ont été obtenus :

- *Le lissage correct* de la caractéristique I-V du guide passif de l'AOS en prenant en compte les fuites de courant existant dans la structure de test du guide passif de l'AOS et en introduisant une couche tampon InP(N). Cette dernière permet de simuler l'impact de la mauvaise qualité de la préparation de la surface avant la reprise d'épitaxie InP(P) sur InGaAsP ; la croissance InP(P) pouvant engendrer localement des zones de fortes contraintes générant des dislocations.

- *Une limitation du modèle 2D* a été mise en lumière malgré la prise en compte de la présence de défauts liés à la préparation de la surface du guide passif et de la résistance des zones implantées. Il sera nécessaire, dans la suite, d'affiner le modèle de transport lié en particulier à la couche active.

Dans une dernière partie, l'apport des simulations 2D a été conforté notamment par une validation quantitative de la variation extrinsèque (vieillessement) des paramètres physiques d'un AOS. La durée de vie des porteurs de l'InGaAsP pour les couches tampon modélisées a été dégradée de 10ns à 10ps à l'origine du dédoublement de la caractéristique I(V) pour une tension de polarisation comprise entre 0,3V et 0,9V. Le mode de défaillance graduel renforce l'hypothèse d'un mécanisme de dégradation associé à la formation de centres de recombinaisons non radiatives proches de la zone active (τ diminue), déjà démontrée pour les diodes laser. Enfin, une corrélation a été établie entre la diminution de la durée de vie des porteurs dans la couche active et la durée de vie des AOS, mesurée à partir de l'évolution des paramètres électro-optiques en fonction du temps de vieillissement. Ces résultats de modélisation ont été publiés dans [R2].

Les perspectives de notre travail portent sur l'évaluation de la méthodologie utilisée pour l'extraction des données de fiabilité et l'optimisation du modèle de l'AOS établi. A plus long terme, notre démarche s'inscrit dans un cadre plus général s'articulant autour de trois points restant à étudier :

- Analyse critique détaillée des résultats d'essais de vieillissement (notamment l'effet de la température) sur des lots représentatifs de nouveaux AOSs et de l'exploitation statistique de ces résultats.
- Proposition d'une méthodologie la plus adaptée à l'évaluation de l'estimation du taux de défaillance et de la durée de vie des AOSs en fonction de la dérive des paramètres pertinents. Il faudra s'attacher en particulier à étudier l'influence de l'injection lumineuse dans les tests de vieillissement accéléré ainsi que les modes de défaillance de l'AOS dans des applications en commutation.
- Amélioration du modèle de l'AOS prenant en compte l'ensemble des phénomènes physiques de ce composant, notamment des fuites de courant à bas niveau (influence des adaptateurs de mode) et la qualité des reprises d'épitaxie susceptibles de générer des dislocations aux interfaces. Il est à noter que les modèles ISE proposés ne constituent qu'une première base de travail et les hypothèses émises sur les mécanismes de dégradation nécessiteront d'entreprendre des analyses physiques complémentaires. Ainsi, les mécanismes de dégradation associés aux défauts générés aux interfaces par les reprises d'épitaxie (dislocations cristallines) doivent pouvoir être observés en mode haute résolution au TEM à l'issue d'échantillons ciblés.

Annexes

Annexe A : Compléments de la caractérisation électro-optique de l'AOS

L'annexe A décrit, en figure 115, le schéma de principe et le descriptif des principaux éléments constitutifs du banc de mesure TP057.

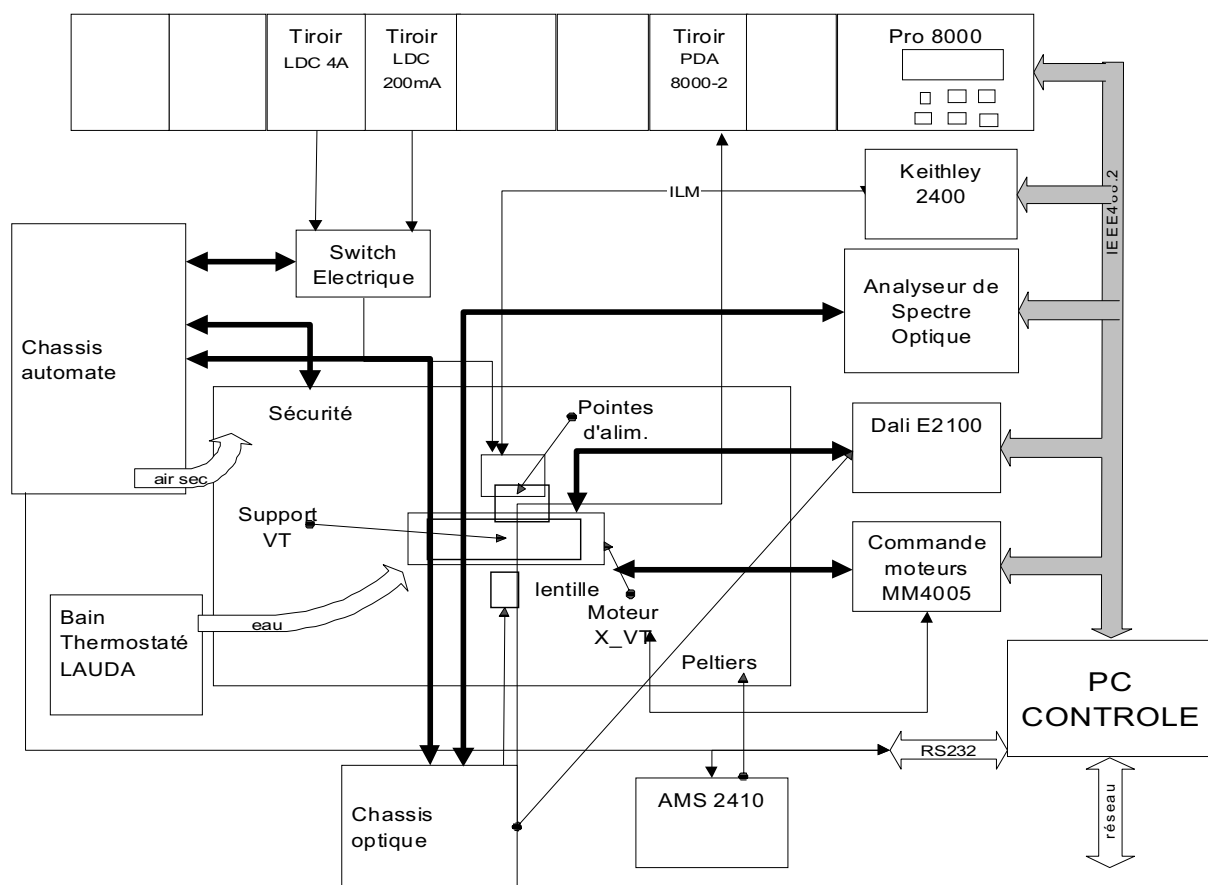


Figure 115 : Schéma de principe du banc TP057

Une vue d'ensemble du module de mesure du banc TP057, présentée en figure 116, permet une visualisation plus détaillée du fonctionnement de ce banc.

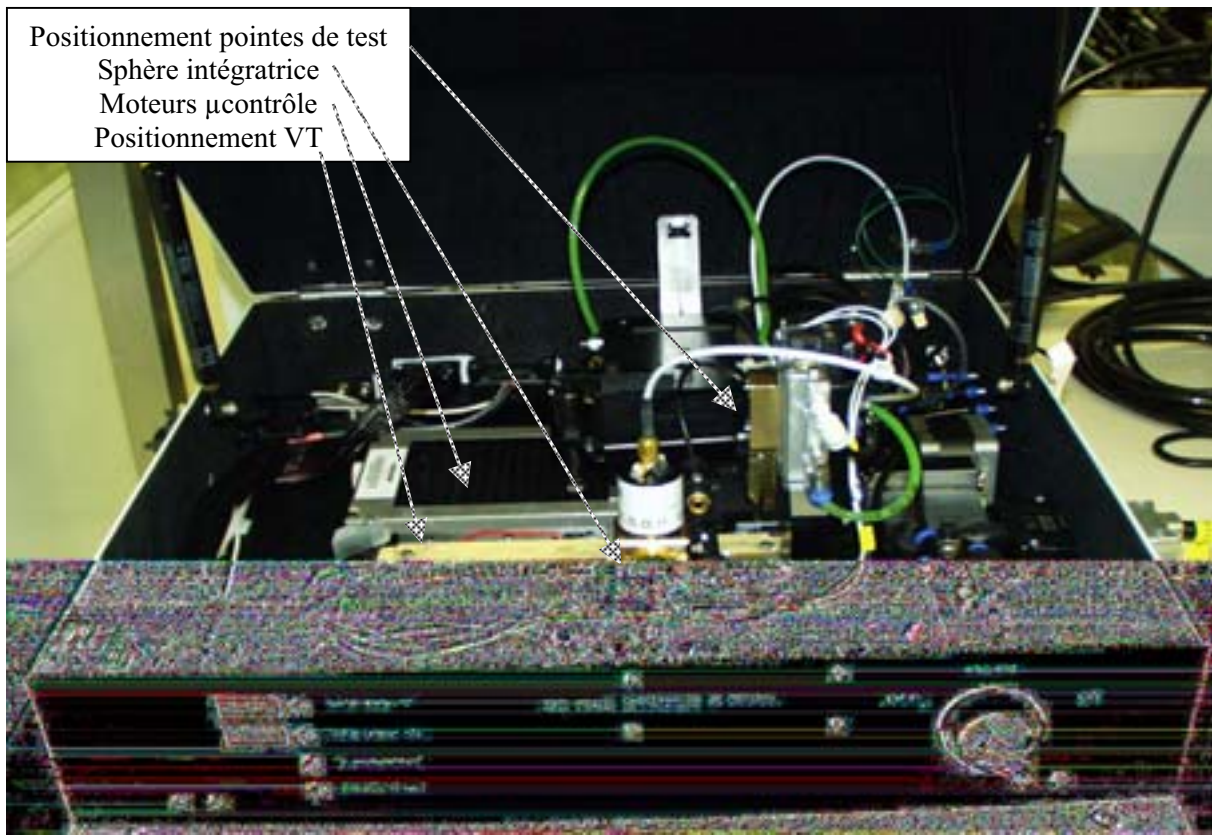


Figure 116 : Vue d'ensemble du module de mesure du banc TP057

Annexe B : Compléments de la caractérisation électro-optique de l'AOS

L'annexe B décrit, en figure 117, le schéma de principe complet pour la mesure de puce nue et le descriptif des principaux éléments constitutifs du banc de mesure TP082.

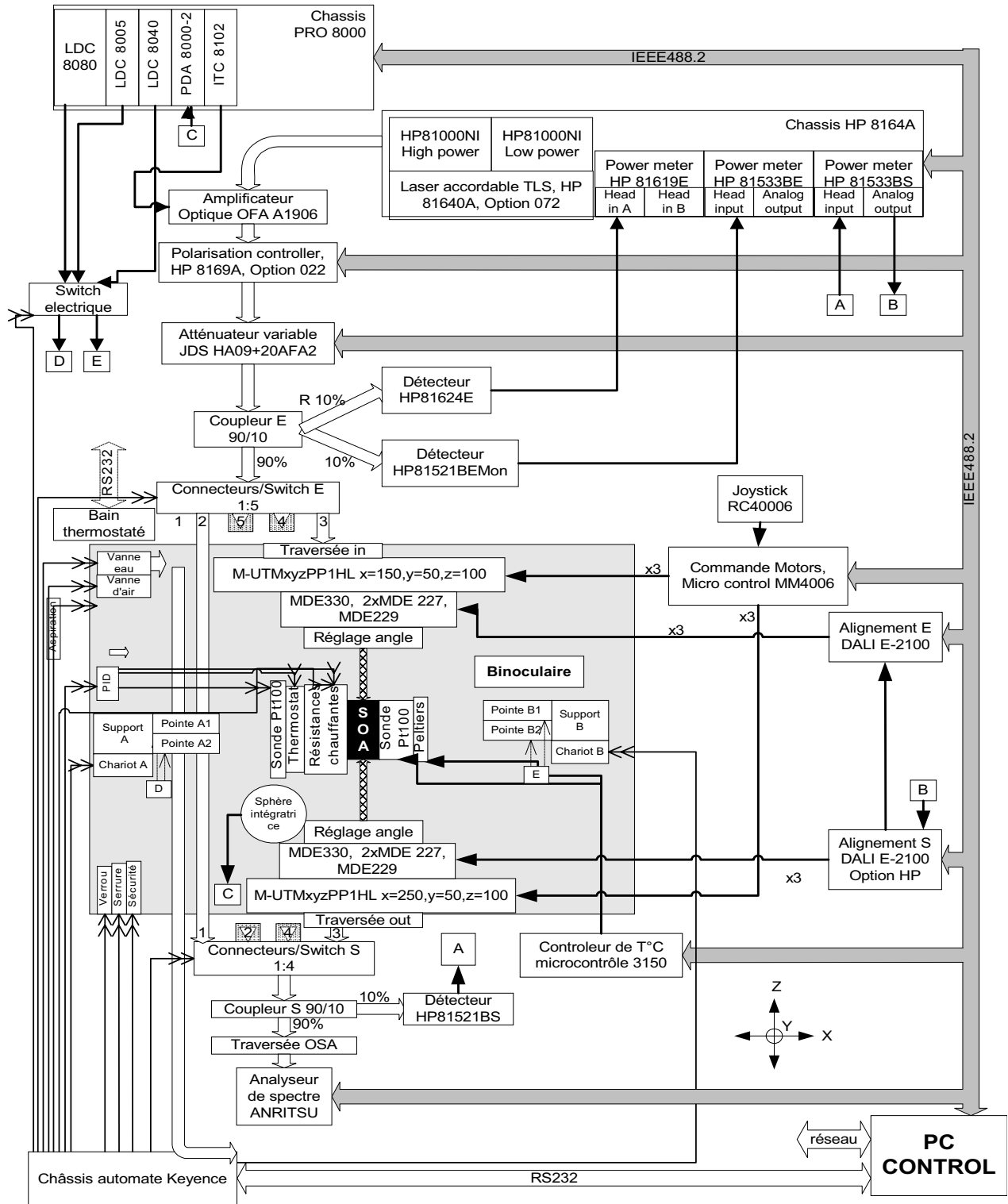


Figure 117 : Schéma de principe du banc TP082

Une vue d'ensemble du module de mesure du banc TP082, présentée en figure 118, permet une visualisation plus détaillée du fonctionnement de ce banc.

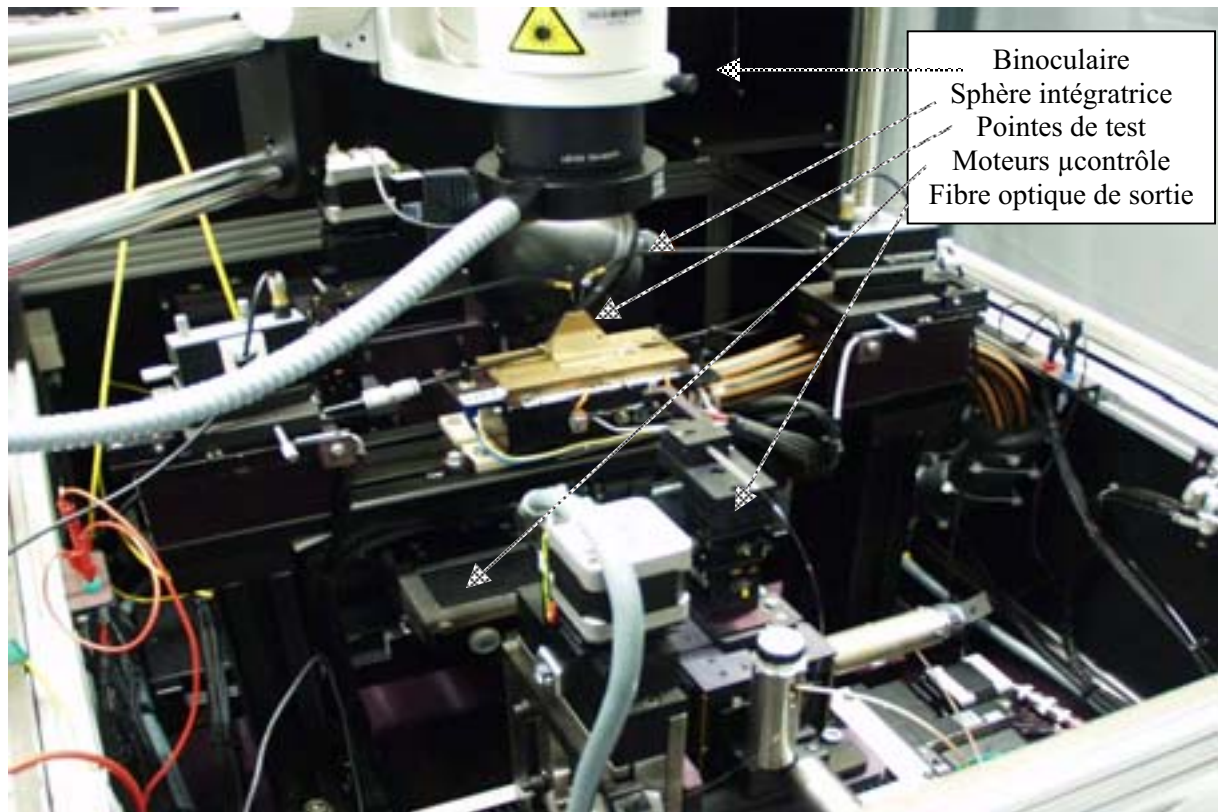


Figure 118 : Vue d'ensemble du module de mesure du banc TP082

Bibliographie

- [1] R. C. Alferness - **"InP Electronics/Optoelectronics for a Recovering Telecom Industry"** – *Proc. of the IPRM, 2003, Santa Barbara.*
- [2] Article : **"Consolidation and investment in fiber optic components reaches new heights"** - *Compound Semiconductor, Vol. 6 (6), August 2000, pp. 6-11.*
- [3] M. Erman, A. Scavennec - **"InP-based devices for future photonic networks"** – *Proc. of the IPRM, 2002, pp. 15-18, Stockholm.*
- [4] P. Li, J. Shuisheng, Y. Fengping, N. Tigang, W. Zhi - **"Long-haul WDM system through conventional single mode optical fiber with dispersion compensation by chirped fiber Bragg grating"** - *Optics Communications 222, 2003, pp. 169-178.*
- [5] Z. Tong, H. Wei, T. Li, S. Jian - **"Optical design of L-band EDFAs with high-loss interstage elements"** - *Optics Communications 224, 2003, pp. 63-72.*
- [6] H. Meng, W. Gao, Y. Liu, H. Zhang, C. Zhao, S. Yuan, X. Dong, S. Liu - **"The gain and noise figure improvement of reflection L-band erbium-doped fiber amplifier"** - *Optics Communications 228, 2003, pp. 85-89.*
- [7] H. M. Pask - **"The design and operation of solid-state Raman lasers"** - *Progress in Quantum Electronics 27, 2003, pp. 3-56.*
- [8] D. Lowe, R. R. A. Syms and W. Huang - **"Layout Optimization for Erbium-Doped Waveguide Amplifiers"** - *J. Lightwave. Tech. , Vol. 20 (3), March 2002, pp. 454-462.*
- [9] J. Y. Emery, P. Doussiere, L. Goldstein, F. Pommereau, C. Fortin, R. Ngo, N. Tschertner, J. L. Lafrayette, P. Aubret, F. Brillouet, G. Laube and J. Barrau - **"New, Process tolerant, High performance 1.55 μ m polarization insensitive semiconductor optical amplifier based on low tensile bulk GaInAsP range"** – *Proc. of the ECOC'96, 1996, pp. 165-168, Oslo.*
- [10] A. Lestra and J. Y. Emery - **"Monolithic integration of spot-size converters with 1.3 μ m lasers and 1.55 μ m polarization insensitive semiconductor optical amplifier"** - *IEEE Quant. Elect. , Vol. 6 (6), December 1997, pp. 1429-1440.*
- [11] T. Hausken - **"The Market for Compound Semiconductors in Telecommunications Networks"** - *Compound Semiconductor, Vol. 6 (3), April 2000, pp. 24-27.*
- [12] M. Meyer - **"Optical amplifiers – All pumped up"** - *Compound Semiconductor, Vol. 6 (1), January 2000, pp. 74-77.*
- [13] G. Zwingelstein - **"Diagnostic des défaillances"** - *Hermes, 1995.*
- [14] M. Schwob, G. Peyrache - **"Traité de fiabilité"** - *Masson et Cie, 1969.*
- [15] J. L. Verneuil - **"Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40Gbits/s"** - *Thèse de doctorat, Université Limoges, Novembre 2003.*
- [16] A. Dubois - **"Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40Gbits/s"** - *Thèse de doctorat, Université Limoges, Novembre 2003.*

- [17] J. R. Kim, H. I. Kim and J. S. Lee - "**Semiconductor optical amplifier**" - *Compound Semiconductor*, Vol. 6 (2), March 2000, pp. 46-49.
- [18] "**Étude générique sur les technologies optoélectroniques**" - *Compte rendu de la Direction générale de l'industrie, des technologies de l'information et des postes (DIGITIP)*, 2002.
- [19] C. Le Brun - "**Développement de la nouvelle bibliothèque de composants optiques de COMSIS**" - *Thèse de doctorat, Université Rennes 1*, 1999.
- [20] F. C. Cave - "**Etude du bruit de phase basse fréquence introduit par les amplificateurs optiques dans les systèmes radar**" - *Rapport de stage, Thales LCR, Juillet 2002*.
- [21] C. Tiphine - "**Modélisation des amplificateurs à semiconducteur avec le logiciel ether**" - *Rapport de stage de DEA, R&I, Août 2001*.
- [22] C. Maître - "**Caractérisation statique d'amplificateurs optiques à semiconducteur : étude de la puissance de saturation**" - *Rapport de stage de DEA, R&I, Août 1999*.
- [23] L. H. Spiekman, J. M. Wiesenfeld, A. H. Gnauck, L. D. Garrett, G. N. van den Hoven, T. van Dongen, M. J. H. Sander-Jochem and J. J. Binsma - "**Transmission of 8 DWDM Channel at 20Gb/s over 160km of Standard Fiber Using a cascade of Semiconductor Optical Amplifiers**" - *IEEE Photon. Techn. Letters*, Vol. 12 (6), June 2000, pp. 717-719.
- [24] C. Xie, P. Ye - "**Efficiency and noise performance analysis of four-wave mixing between short optical pulses in semiconductor optical amplifiers**" - *Optics Communications* 164, 1999, pp. 211-217.
- [25] J. C. Simon - "**Amplificateurs optiques pour les télécommunications à haut débit**" - *Communication, Université de Rennes 1*, <http://pecdc.univ-lemans.fr/ohd2001/fichiers%20pdf/invitees>
- [26] A. Shipulin, G. Onishchukov, D. Michaelis, P. Riedel, U. Peschel, F. Lederer - "**Fiber transmission systems with semiconductor optical amplifiers without in-line filtering**" - *Optics Communications* 209, 2002, pp. 309-319.
- [27] D. Keller, P. Aribaud, D. Auvinet, M. Dimaggio, F. Dorgueille, C. Drocourt, D. Legat, V. Dhalluin, F. Pommereau, C. Porcheron, M. Prunaire, P. Piatti, J. C. Remy, M. Renaud, N. Sahri, S. Silvestre, S. Squedin, A. Göth, J. Scherb - "**Hybridization of SOAs on Si platform for routing applications**" - *Proc. of the IPRM*, 2002, pp. 463-466, Stockholm.
- [28] P. Doussiere, F. Pommereau, J. Y. Emery, R. Ngo, J. L. Lafrayette, P. Aubret, L. Goldstein, G. Soulage, T. Ducellier, M. Bachmann and G. Laube - "**1550nm polarization independent DBR gain clamped SOA with high input power range**" - *Proc. of the ECOC'96*, 1996, pp. 169-172, Oslo.
- [29] J. Yu, X. Zheng, P. Jeppesen - "**Cascadability improvement of semiconductor optical amplifier based gates using polarization multiplexing technique**" - *Optics Communications* 178, 2000, pp. 309-314.
- [30] S. Diez, E. Hilliger, M. Kroh, C. Schmidt, C. Schubert, H. G. Weber, L. Occhi, L. Schares, G. Guekos, L. K. Oxenloewe - "**Optimization of SOA-based Sagnac-interferometer switches for multiplexing to 10 and 40Gb/s**" - *Optics Communications* 189, 2001, pp. 241-249.

- [31] S. B. Wu, X. H. Sun, C. Yang, M. D. Zhang - **"Theoretical analysis of noise transfer in wavelength converter based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifier"** - *Solid-State Electronics* 46, 2002, pp. 1295-1299.
- [32] Y. Mao, Z. G. Lu, J. Chrostowski, J. Hong and R. Misner - **"Three-stage wavelength converter based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers"** - *Optics Communications* 167, 1999, pp. 57-66.
- [33] B. E. Olsson, D. J. Blumenthal - **"All-Optical Demultiplexing Using Fiber Cross-Phase Modulation (XPM) and Optical Filtering"** - *IEEE Photon. Techn. Letters*, Vol. 13 (8), August 2001, pp 875-877.
- [34] Y. Ye, X. Zheng, H. Zhang, Y. Li, Y. Guo - **"Study on the dynamic range of input power for wavelength converter based on cross-phase modulation in SOAs"** - *Optics Communications* 200, 2001, pp. 349-354.
- [35] C. Wu, H. Fan, N. K. Dutta, U. Koren, A. B. Piccirilli - **"Optical Demultiplexing Using Semiconductor Optical Amplifiers"** - *Proc. of the Conference on Optical Devices for Fiber Communication*, 1999, Vol. 3847, pp. 133-138, Boston.
- [36] A. Guichardon - **"Caractérisation et modélisation statique d'un laser InGaAsP/InP à ruban enterré : analyse par étapes technologiques"** - *Thèse de doctorat, Université Paris XI, Juin 1995.*
- [37] J. L. Pleumeekers - **"POSEIDON : a simulator for optoelectronic semiconductor devices"** - *PhD, University of Delft, June 1997.*
- [38] G. P. Agrawal, N. K. Dutta - **"Semiconductor Lasers"** - *Van Nostrand Reinhold, 1993.*
- [39] E. Rosencher and B. Vinter - **"Optoélectronique"** - *Masson, 1998.*
- [40] M. Fukuda - **"Reliability and degradation of semiconductor laser and leds"** - *Artech House Boston, 1991.*
- [41] M. Pommies - **"Analyse des mécanismes de dégradation des lasers à semi-conducteurs pour applications dans les télécommunications"** - *Thèse de doctorat, Université Limoges, Janvier 2002.*
- [42] Document interne Alcatel 1997 - **"Stabilité des SOA's"** - *Présentation Alcatel Marcoussis, Décembre 1997.*
- [43] Document interne Alcatel 1998 - **"SOA & space switching rate – Preliminary analysis of the SOA stability"** - *Rapport Alcatel Marcoussis, Avril 1998.*
- [44] Document interne Alcatel 2000 - **"Plan de transfert technologie SOA"** - *Rapport Alcatel, Avril 2000.*
- [45] S. Carubelli - **"Contribution à l'identification et à l'estimation des contraintes de fatigue thermique des convertisseurs intégrés pour la traction électrique"** - *Thèse de doctorat, Université Nancy, Septembre 2003.*
- [46] J. L. Goudard, P. Berthier, X. Boddaert, D. Laffitte and J. Périnet - **"Reliability of optoelectronic components for telecommunications"** - *Microelectronics Reliability*, Vol. 40, 2000, pp. 1701-1708.
- [47] J. L. Goudard, P. Berthier, X. Boddaert, D. Laffitte and J. Périnet - **"New qualification approach for optoelectronic components"** - *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, 2002, pp. 1307-1310.

- [48] J. L. Goudard, P. Berthier, X. Boddaert, D. Laffitte and J. Périnet - **"Reliability of optoelectronics components: towards new qualification practices"** - *Microelectronics Reliability*, Vol. 43, 2003, pp. 1767-1769.
- [49] Y. Deshayes - **"Diagnostic de défaillances de systèmes optoélectroniques émissifs pour applications de télécommunication"** - *Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2002.*
- [50] J. Y. Emery - **"Semiconductor Optical Amplifier : Key Component for All Optical Network Applications"** - *Présentation Alcatel Marcoussis, Octobre 2001.*
- [51] H. Mawatari, M. Fukuda, K. Magari, Y. Suzuki, N. Yoshimoto, Y. Kondo, H. Takeuchi and Y. Tohmori - **"Reliability and degradation behaviour of semiconductor optical amplifier integrated with spot-size converters"** - *Proc. of the CLEO/Pacific Rim'99 Conference, 1999.*
- [52] Y.Z. Liu and J.M. Chen - **"Performance Comparison of 1300 Semiconductor Amplifiers with bulk and MQW active layer"** - *SPIE, Vol. 2610, 1974, pp. 100-106.*
- [53] H. Kamioka, H. Oohashi, M. Okamoto, K. Magari, T. Ito and Y. Tohmori - **"Relationship between ASE and gain during the degradation for a semiconductor optical amplifier with spot-size converters (SS-SOA)"** - *Proc. of the OAA'2001, 2001, OMB4.*
- [54] S. Morin - **"Compte rendu de l'étude effectuée sur le procédé optimum de la mesure de PUISSANCE des SOA"** - *Compte rendu, Alcatel Optronics, Août 2001.*
- [55] A. Grellier - **"Descriptif complet de la méthode de mesures du banc TP082"** - *Compte rendu, Alcatel Optronics, Août 2002.*
- [56] P. Bhattacharya - **"Indium Gallium Arsenide"** - *P. Bhattacharya, 1993.*
- [57] A. Reale, A. D. Carlo and P. Lugli - **"Study of the steady state and dynamical behavior of semiconductor optical amplifier"** - *Physica B 272, 1999, pp. 513-517.*
- [58] J. L. Pleumeekers, J. N. Fher, T. P. Hessler, P.E. Selbmann, M. A. Dupertuis, B. Deveaud, J. Y. Emery, F. Dorgueille, F. Pommereau and B. Dagens - **"Observation of longitudinal spatial hole burning and heating in semiconductor optical amplifier"** - *Proc. of the OAA'99, 1999, pp. 187-190.*
- [59] O. Ueda - **"Degradation of III-V opto-electronic devices"** - *J. Electrochem. Soc., Vol. 135 (1), January 1998, pp. 11C-22C.*
- [60] K. I. Mizuishi, M. Sawai, S. Satoru, S. Tsuji, M. Hirao, M. Nakamura - **"Reliability of InGaAsP/InP Buried Heterostructure 1.3 μ m Lasers"** - *J. Quantum Electronics, Vol QE-19, 8, 1983, pp. 1294-1301.*
- [61] Document interne Alcatel - **"Plan de qualification du laser BRS"** - *Rapport Alcatel, Alcatel Optronics, 1997.*
- [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 38, 1998, pp. 767-771.*
- [63] P. D. Wright, W. B. Joyce and D. C. Craft - **"Electrical derivate characteristics of InGaAsP buried heterostructure lasers"** - *J. Appl. Phys., Vol. 53 (3), March 1982, pp. 1364-1372.*

- [64] F. J. M. Verdier, L. Béchou - **"Contribution de la simulation statistique à l'évaluation de la fiabilité de composants électroniques et optoélectroniques"** - *Rapport Laboratoire IXL, Bordeaux, 2002.*
- [65] L. Mendizabal, J. L. Verneuil, L. Bechou, C. Aupetit-Berthelemot, Y. Deshayes, F. J. M. Verdier, J. M. Dumas, Y. Danto, D. Laffitte, J. L. Goudard, Y. Hernandez - **"Impact of 1.55 μm laser diode degradation laws on fibre optic system performances using a system simulator"** - *Microelectronics Reliability, Vol. 43, September-November 2003, pp. 1743-1749.*
- [66] Y. Frignac - **"Contribution à la conception d'un système de transmission terrestre de capacité Térabit/s par multiplexage en longueur d'onde de canaux 40Gbit/s"** - *Thèse de doctorat, ENST, 2003.*
- [67] ITU-T RECOMMENDATION G.707 - **"Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)"** - *October, 2000.*
- [68] ITU-T RECOMMENDATION G.708 - **"Sub STM-0 network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)"** - *June, 1999.*
- [69] GR-468-CORE, Bellcore - **"Generic Reliability Assurance Requirement for Optoelectronic Devices Used In telecommunication Equipment" (a module of RQGR, FR-796)** - *Issue1, December, 1998.*
- [70] GR-1221-CORE, Bellcore - **"Generic Reliability Assurance Requirement for Passive Optical Components" (a module of RQGR, FR-796)** - *Issue2, January, 1999.*
- [71] GR-1312-CORE, Bellcore - **"Generic Reliability Assurance Requirement for Optical Fiber Amplifiers and Proprietary Dense Wavelength-Division Multiplexed Systems" (a module of RQGR, FR-796)** - *Issue3, April, 1999.*
- [72] G. Talli, M. J. Adams - **"Amplified spontaneous emission in semiconductor optical amplifier : modelling and experiments"** - *Optics Communications 218, 2003, pp. 161-166.*
- [73] J. Pankove - **"Optical processes in semiconductors"** - *Dover, 1995 (ouvrage).*
- [74] L. Mendizabal, L. Béchou, Y. Deshayes, F. J. M. Verdier, Y. Danto, D. Laffitte, J. L. Goudard, and F. Houé - **"Study of influence of failure modes on lifetime distribution prediction of 1.55 μm DFB Laser diodes using weak drift of monitored parameters during ageing tests"** - *à paraître ESREF 2004.*
- [75] A. Dargys, J. Kundrotas - **"Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs, and InP"** - *Vilnius, Science and Encyclopedia Publishers, 1994.*
- [76] H. Temkin, S. Mahajan, A. DiGiuseppe, A. G. Dentai - **"Optically induced catastrophic degradation in InGaAsP/InP layers"** - *Appl. Phys. Lett., Vol. 40 (7), April 1982, pp. 562-565.*
- [77] G. Romo, T. Smy, D. Walkey and B. Reid - **"Modeling facet heating in ridge lasers"** - *Microelectronics Reliability, Vol. 43, January 2003, pp. 99-110.*
- [78] P. G. Eliseev - **"Optical strength of semiconductor laser materials"** - *Prog. Quant. Electr., Vol. 20, pp. 1-82.*
- [79] Document interne Alcatel 2004 - **"Revue Bilan projet SOA : Qualif puces"** - *Rapport Alcatel, Juin 2004.*

- [80] F. Aniel, P. Boucaud, A. Sylvestre, P. Crozat, F. H. Julien, R. Adde, Y. Jin - **"Electro-luminescence Spectroscopy analysis of AlGaAs/InGaAs and AlGaAs/GaAs HEMTs"** – *J. Appl. Phys.*, Vol. 77 (5), Mars 1995.
- [81] A. Sylvestre, F. Aniel, P. Boucaud, F. H. Julien, P. Crozat, R. Adde, A. De Lustrac, Y. Jin - **"Electroluminescence Spectroscopy of HEMTs on InP at cryogenic temperatures"** – *J. Appl. Phys.*, Vol. 80 (1), July 1996, pp. 464-469.
- [82] N. Cavassilas, F. Aniel, P. Boucaud, R. Adde, H. Maher, J. Decobert, A. Scavennec – **"Electroluminescence of composite Channel AlInAs/InGaAs/InP/AlInAs HEMT"** – *J. Appl. Phys.*, Vol. 8 (5), March 2000.
- [83] T. Brunhes, P. Boucaud, S. Sauvage, F. Aniel, J. M. Lourtioz, C. Hernandez, Y. Campidelli, D. Bensahel, G. Faini, I. Sagnes - **"Electroluminescence of Ge/Si self-assembled quantum dots grown chemical vapor deposition"** - *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77 (11), September 2000.
- [84] N. Cavassilas, F. Aniel, R. Adde, H. Maher, J. Decobert, A. Scavennec - **"Electroluminescence of triple channel HFETs on InP at low temperature"** - *J. de Phys. IV*, pp. 89-92.
- [85] G. J. Exarhos - **"Characterization of optical materials"** – *Materials Characterization series*, 1995.
- [86] S. K. K. Lam, R. E. Mallard, D. T. Cassidy - **"An extended multi-component model for the change of threshold current of semiconductor lasers as a function of time under the influence of defect annealing"** - *J. Appl. Phys.*, Vol. 95 (5), March 2004, pp. 2264-2271.
- [87] K. Doguchi, H. Yano, M. Murata, H. Nishizawa - **"Reliability analysis of InP-based HBTs"** – *Proc. of the IPRM*, 1995, pp. 460-463.
- [88] H. V. Baghdasaryan, S. G. Dashyan - **"Semiconductor Optical Amplifier Performance Investigation by Computer Modelling"** – *Proc. of ICTON*, 2001, pp. 295-298.
- [89] W. N. Cheung - **"Virtual analogue simulation of semiconductor lasers and photon transport transistors"** – *Int. J. Numerical modelling*, 2001, pp. 367-377.
- [90] D. D'alessandro, G. Giuliani, S. Donati - **"Spectral gain and noise evaluation of SOA and SOA-based switch matrix"** – *Proc. Optoelectron.*, Vol. 148, *Int. J. Numerical modelling*, June 2001, pp. 125-130.
- [91] D. Ban, E. H. Sargent - **"Influence of Nonuniform Carrier Distribution on the Polarization Dependence of Modal Gain in Multiquantum-Well Lasers and Semiconductor Optical Amplifiers"** - *J. Quantum Electronics*, Vol. 36 (9), 2000, pp. 1081-1088.
- [92] P. A. Barnes, T. L. Paoli - **"Derivates measurements of the current-voltage characteristics of double heterostructure injection lasers"** - *J. Quantum Electronics*, Vol. 12 (10), 1976, pp. 633-639.
- [93] C. Jacob-Maneux - **"Etude des mécanismes de dégradation des transistors bipolaires à hétérojonction sur substrat GaAs"** - *Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Janvier 1998.*
- [94] B. M. Cretu - **"Performances et fiabilité des transistors MOS SUB-0.1 µm"** – *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Janvier 2003.*
- [95] J. Jiménez - **"Laser diode reliability : crystal defects and degradation modes"** – *C. R. Phys.*, Vol. 4, 2003, pp. 663-673.

- [96] Agilent Technologies - **"85190A IC-CAP Parameter Extraction and Device Modeling Software"**
- [97] C. H. Henry, R. A. Logan, F. R. Merritt - **" The effect of surface recombination on current in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterojunctions "** - *J. Appl. Phys.*, Vol. 49 (6), June 1978, pp. 3530-3542.
- [98] P. E. Dodd, T. B. Stellwag, M. R. Melloch, M. S. Lundstrom - *IEEE Trans. Electron Devices*, 38, 1991, 1253.
- [99] DGA - **"Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques : Guide FIDES 2004"** - *DM/STTC/CO/477*.
- [100] Document interne Alcatel - **"Plan de qualification de l'AOS"** - *Rapport Alcatel, 2004, Nozay*.

Production scientifique

- [R1] "RELIABILITY INVESTIGATIONS OF 1.55 μm BULK SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER USING FUNCTIONAL PARAMETER MEASUREMENTS"
S. Huyghe, L. Béchou, Y. Danto, D. Laffitte, X. Boddaert, P. Volto, A. Denolle, A. Coquelin, C. Ollivier, D. Keller, C. Porcheron, A. Crottini, S. Squedin, M. Renaud
2003 International Conference : Indium Phosphide and Related Materials, Santa Barbara, Mai 2003, p171-174.
- [R2] "FIABILITE DES AMPLIFICATEURS OPTIQUES A SEMICONDUCTEUR 1.55 μm : ANALYSE EXPERIMENTALE ET MODELISATION PHYSIQUE"
S. Huyghe, L. Béchou, Y. Danto, D. Laffitte, A. Denolle, C. Ollivier, D. Keller, M. Renaud
2004 JNMO, La Grande Motte, Mai 2004.

Fiabilité des amplificateurs optiques à semiconducteurs 1,55 μ m pour des applications de télécommunication : Etude expérimentale et modélisation physique

Résumé :

Ces travaux de thèse décrivent le développement et la mise en œuvre d'un protocole expérimental pour estimer la fiabilité d'une technologie "bulk" d'amplificateur optique à semiconducteur (AOS) 1,55 μ m de couche active InGaAsP épitaxiée sur substrat InP. Il est basé sur l'analyse des paramètres électriques et optiques (puissance optique, pseudo-courant de seuil, gain, figure de bruit, puissance de saturation, ...) suivis lors de différents tests de vieillissement sous différents facteurs d'accélération (courant-température). Ces études expérimentales, confortées par des simulations physiques 2D par éléments finis en introduisant un grand nombre de paramètres physiques extraits de caractérisations expérimentales, ont permis de mettre en évidence trois signatures de défaillance distinctes. Une première prédiction de distribution des durées de vie d'un AOS est également proposée à partir d'une approche statistique basée sur la méthode Monte-Carlo appliquée dans le cadre d'une faible population de composants et d'une faible dérive des paramètres.

Mots clés :

Optoélectronique, amplificateurs optiques à semiconducteur, fiabilité, simulation physique.

Reliability of 1.55 μ m Semiconductor Optical Amplifiers for telecommunication applications : Experimental study and physical simulations

Summary :

These works describe the implementation of an experimental protocol implemented to estimate the reliability of a technology "bulk" of 1.55 μ m Semiconductor Optical Amplifier (SOA) with an InGaAsP active layer grown on InP substrate. The tests are based on the analysis of electric and optical parameters (optical power, threshold current, gain, noise figure, saturation power...) monitored during ageing tests with various acceleration factors (current-temperature). These experimental studies, correlated to 2D finite elements physical modelling introducing a great number of physical parameters extracted from experimental characterizations, highlighted three distinct failure signatures. First predictions of SOA lifetime's distribution is also proposed considering a statistical approach based on the Monte-Carlo method applied for a weak population of components and a weak drift of the parameters.

Key words :

Optoelectronic, semiconductor optical amplifiers, reliability, physical modelling
