



HAL
open science

Sources appliquées aux cavités auto-alimentées pour les nouveaux réseaux d'accès multiplexés en longueur d'onde

Anaëlle Maho

► **To cite this version:**

Anaëlle Maho. Sources appliquées aux cavités auto-alimentées pour les nouveaux réseaux d'accès multiplexés en longueur d'onde. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National des Télécommunications, 2017. Français. NNT : 2017TELE0003 . tel-01534520

HAL Id: tel-01534520

<https://theses.hal.science/tel-01534520>

Submitted on 7 Jun 2017

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

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



THESE DE DOCTORAT

pour obtenir le grade de

**Docteur de Télécom SudParis
en partenariat avec l'Université Pierre et Marie Curie**

Spécialité Télécommunications

Ecole Doctorale Informatique, Télécommunications et Electronique de Paris

SOURCES APPLIQUEES AUX CAVITES AUTO-ALIMENTEES POUR LES NOUVEAUX RESEAUX D'ACCES MULTIPLEXES EN LONGUEUR D'ONDE

Anaëlle Maho

Soutenue le 19 janvier 2017,
devant le jury composé de

M. Joël Jacquet	Président et rapporteur
EIGSI	
Mme Delphine Morini	Rapporteur
C2N	
M. Philippe Chanclou	Examineur
Orange Labs	
M. Cédric Ware	Examineur
Télécom ParisTech	
M. Badr-Eddine Benkelfat	Directeur de thèse
Télécom SudParis	
M. Yann Frignac	Co-directeur de thèse
Télécom SudParis	
M. Romain Brenot	Encadrant scientifique
III-V Lab, Nokia Bell Labs	

*“Votre cœur [...] étrange et solitaire
[...]
Votre cœur [...] bienveillant et borné
[...]
Votre cœur c’ [est] le monde entier
[...]
Votre cœur c’ [est] tous les étés “*

*Le Départ,
Maissiat*

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée au III-V Lab, laboratoire commun entre Nokia, Thales et le CEA-Leti. Merci à Mohand Achouche, administrateur des équipes Nokia Bell Labs du III-V, de m'avoir mis le pied à l'étrier à ma sortie d'école. Je remercie chaleureusement François Luc, administrateur du III-V Lab, et Philippe Bois, administrateur des équipes TRT du III-V, de m'avoir accueillie et guidée pour l'après thèse.

J'adresse ma gratitude aux membres du jury ; à Delphine Marris-Morini (C2N) et Joël Jacquet (EIGSI) d'en avoir été les rapporteurs, en particulier pour votre relecture attentive et vos critiques constructives ; à Cédric Ware (Télécom Paris) d'avoir décelé mes étourderies et à Philippe Chanclou (Orange lab) d'être venu du pays breton pour mettre en perspective ces travaux.

Le département EPH de Télécom SudParis a accueilli ces travaux. Merci à son directeur, Badr-Eddine Benkelfat d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse et merci à Yann Frignac, maître de conférences, d'avoir été co-encadrant. Le temps fait toujours défaut mais nos discussions m'ont aiguillée le long de ces trois années. Sans oublier les coups de pouce, bienvenus, dans les protocoles administratifs !

Romain Brenot, du III-V lab, ou plus simplement *chef* a accepté de me livrer les secrets de la physique des RSOA- et bien plus. Beaucoup de choses pourraient être dites : l'histoire fut longue, riche en rebondissements, aucun des quelques 800 jours ne s'est ressemblé. Avant tout merci de m'avoir donné la confiance que je n'avais pas : ces coups de pieds m'ont fait grandir et mûrir ; m'ont défiée scientifiquement, évidemment, et humainement. Chaque jour, j'ai appris un peu plus.

Ce manuscrit retranscrit les travaux d'une thèse, fruit d'un travail long et complexe qui ne serait rien sans le savoir et les compétences techniques des équipes du laboratoire.

A commencer par le travail remarquable des technologues qui m'ont livré les rudiments du métier. Sophie, je te dois énormément. Tu m'as transmis ton savoir-faire, donné de ton temps et as toujours été là, même quand ça n'allait pas. Un merci ne suffirait pas. L'équipe ne serait pas complète sans Frédéric Pommereau, dont l'ombre exigeante m'a imprégnée d'une rigueur perfectionniste et le fameux JFP, incontournable de la salle

blanche, dont le sourire rend agréable n'importe quelle journée : n'oublions pas les bonnes habitudes d'une blague par jour !

La salle blanche est plus remplie que l'on ne pourrait le penser. Je salue les collègues des autres équipes avec qui l'entraide fut chaleureuse. En particulier merci à Muriel Riet et Stéphane Bernard pour mon utilisation récurrente des dépôts de Titane...

Le travail de techno n'aurait pas la saveur qu'on lui connaît sans les imprévus qui rajoutent du piment au quotidien. Merci à Raphaël Aubry et Estelle Derouin d'avoir contribué à identifier mes angoissants et persistants points noirs.

Un dicton de salle blanche, rempli de mauvaise foi, dirait qu'importe le problème la cause vient toujours d'eux. Il n'en est rien et merci aux épitaxieurs de réaliser l'étape -un peu magique- de la croissance de matériau. En particulier merci à François Lelarge, Nadine Lagay, Yohann Mustapha-Rabault et à Olivier Patard de s'être occupé de la quinzaine de plaques manipulées pendant ces trois ans.

Le labeur ne s'arrête pas une fois la plaque finie. C'est n'est que le début du minutieux travail de clivages, traitements et montages. Merci à Catherine, Delphine et Karim d'assurer la continuité de ce travail. Karim, tu seras mon *MacGyver* du montage, avec toi, même l'impossible reste possible ! Merci de m'avoir fait une petite place aux montages de temps en temps !

Je voudrais aussi gratifier Alexandre Larrue, Michel Garcia et Alexandre Garreau avec qui les échanges furent enrichissants et qui ont contribué à me forger ma culture dans le domaine.

Il y a un avant et un après fabrication. Merci à Hélène Debrégeas pour les indications lors de la phase, un peu solitaire, de la conception et plus généralement de m'avoir partagé son regard et son expérience sur les composants. J'ai aussi apprécié de partager des moments plus informels et qui rendirent cette aventure plus humaine.

Comment évoquer "l'après" sans évoquer Jean-Guy Provost, le maître incontesté des mesures. Si, au premier abord, je trouvais un peu éloigné le déménagement du banc SOA vers la salle "Jean-Guy", je dois reconnaître que j'aurais bien prolongé de quelques mois ma thèse pour profiter un peu plus de ton savoir. Merci d'avoir ouvert mon champ d'horizon et mes réflexions. Merci également à Frédéric Van Dijk, pour l'emprunt répété de vos équipements et l'usage de vos bancs. Merci aussi pour tous les moments informels et l'accueil à Palaiseau !

Parmi tous ces rouages, il en est un essentiel. Merci au support apporté par Valérie Deshayes, Nathalie Martin et Laurence Lorcy. Vous avez été de surcroît une oreille attentive et d'une chaleur qui reconforte. Merci également à Pascale Téfaïne, Maryline Beguet et Aline Rablat pour leur réactivité et leur efficacité.

Comment ne pas finir ces remerciements par tous ceux avec qui les relations ne furent pas que professionnelles ?

Guillaume, nous nous serons suivis du début jusqu'à la fin. Je t'épargnerai des mots trop flatteurs puisque c'est la ritournelle entre nous. Qui aime bien châtie bien ;) . Vient le clan "physique" / "des grands" qui a toléré ma présence, Piero, Olivier (*bis !*), Cédric, Ronan : à défaut d'avoir gagné des cm, suis-je devenue "physique" ?

Les semaines et les mois auraient été bien fades sans mes compagnons de bureau, de course à pied, de sortie ; mes compagnons de moments de vie. Virginie, Nicolas, Pep', Andrzej, Gaël, Axel, Florian, Guillaume S., Agnès, Hugue, Olivier T. : rendez-vous à Toulouse !

Cette liste ne saurait être exhaustive sans Mickaël. L'aventure fut belle au III-V, le terrain de jeu s'annonce tout aussi séduisant à TAS ! Il y a juste une chose sur laquelle tu ne m'avais pas prévenue : manger à 13h30 ? ;)

La thèse fut un long chemin, merci à mes proches d'avoir été présents. Nos moments furent trop peu nombreux mais le cœur y a toujours été.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1	
ARCHITECTURE DES NOUVEAUX RESEAUX D'ACCES : EVOLUTION ET ENJEU	5
1.1. Réseaux centralisés d'accès radio	6
1.1.1. Architecture	6
1.1.2. Normes et protocoles	7
1.2. Solutions achromatiques bas-coût	8
1.2.1. Historique et typologie	8
1.2.2. Description des principales architectures	9
1.2.2.1. Fabry-Pérot verrouillés en longueur d'onde	9
1.2.2.2. RSOA injecté et RSOA remodelé	10
1.2.2.3. SOA-REAM injecté	12
1.2.2.4. Récapitulatif	12
1.3. RSOA en cavité auto-alimentée	14
1.3.1. Description	14
1.3.2. Historique	15
1.3.3. Etat de l'art	17
1.3.4. Paramètres	21
1.3.4.1. Equipements	21
1.3.4.2. Architecture	23
1.3.4.3. Transmission	24
1.4. Cadre de la thèse	24
1.4.1. Position du III-V Lab	24
1.4.2. ERMES & LAMPION	25
1.4.3. Ambitions de la thèse	26
Conclusion du chapitre 1	29
Bibliographie du chapitre 1	31

CHAPITRE 2

ELABORATION DE SOURCES DIRECTEMENT MODULEES POUR LES NOUVEAUX RESEAUX

D'ACCES	39
2.1. Généralités sur les composants étudiés.....	39
2.1.1. Principes physiques élémentaires.....	40
2.1.1.1. Structure épitaxiale	40
2.1.1.2. Confinement opto-électronique.....	41
2.1.2. Techniques de fabrication	43
2.1.2.1. Etapes génériques	43
2.1.2.2. Procédé standard	45
2.1.2.3. Traitements et embases	46
2.1.3. Composants étudiés	48
2.1.3.1. Laser Fabry-Pérot.....	48
2.1.3.2. SOA.....	48
2.1.3.3. RSOA.....	49
2.1.3.4. Laser à contre-réaction répartie.....	49
2.1.3.5. Modulateur à électro-absorbtion	50
2.2. Caractérisation de sources pour cavité auto-alimentée	51
2.2.1. Gain du RSOA	51
2.2.2. Effacement des données.....	52
2.2.3. Modulation haut-débit.....	54
2.3. Conception de nouvelles sources	56
2.3.1. Etat de l'art.....	56
2.3.2. Choix des structures.....	60
2.3.3. Diagramme de bandes	61
2.3.4. Structures complètes.....	63
2.3.5. Conception des guides d'onde	64
2.4. Développements technologiques spécifiques.....	66
2.4.1. Aluminium.....	66
2.4.2. Rendement et robustesse.....	67
Conclusion du chapitre 2	69
Bibliographie du chapitre 2.....	71

CHAPITRE 3

ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSIQUE DU RSOA	77
3.1. Physique du RSOA	77
3.1.1. Modèle	77
3.1.2. Simulations	83
3.1.3. Vers une définition du RSOA	84
3.1.3.1. Seuil du RSOA.....	84
3.1.3.2. Influence du confinement et de la longueur	88
3.1.4. Rôle du facteur d'émission spontanée	90
3.2. Réflexions parasites dans les RSOA à fort gain	94
3.2.1. Réflexions parasites et RSOA	94
3.2.2. Influence de l'adaptateur de mode	96
3.2.3. Influence des défauts dans le ruban.....	99
3.3. Fuites de porteurs	102
3.4. Evaluation de l'aluminium et de la bande O	105
3.4.1. Caractérisation statique	105
3.4.2. Caractérisation dynamique.....	107
3.4.3. Vieillessement et reproductibilité	110
3.5. Influence de la température	112
3.6. Analyse	116
Conclusion du chapitre 3	125
Bibliographie du chapitre 3	127

CHAPITRE 4

SOURCES BAS COÛT EN CAVITE AUTO-ALIMENTEE	133
4.1. RSOA en cavité auto-alimentée	133
4.1.1. Cavité auto-alimentée, un laser comme un autre ?	133
4.1.2. Performances obtenues	134
4.1.3. Influence de l'élément réflectif	135
4.1.4. Limites et discussions	138
4.2. Optimisation du Fabry-Pérot en cavité auto-alimentée	139
4.2.1. Etat de l'art	139
4.2.2. Choix du Fabry-Pérot adapté	140
4.2.3. Paramètres de la cavité	142
4.2.4. Transmissions à 2,5 Gbit/s	144
4.3. Intégration d'une nouvelle source : l'EAM-RSOA	146
4.3.1. Contexte et principe	146

4.3.2. Composants étudiés	147
4.3.3. EAM-RSOA en cavité	149
Conclusion du chapitre 4	153
Bibliographie du chapitre 4.....	155
CONCLUSION GENERALE	157
ANNEXES	161
A. Modélisation du RSOA.....	161
B. Mesure simplifiée de l'émission spontanée.....	165
C. Evaluation du RSOA SIBH.....	167
D. Conception et fabrication de réseaux directement gravés dans le ruban.....	169
E. DFB SOA double sortie pour réseau cohérent UDWDM PON	173
F. RSOA en cavité externe	175
VALORISATION SCIENTIFIQUE.....	177
RESUME	181

INTRODUCTION GENERALE

La consommation des données numériques évoluent ; les réseaux qui les transportent aussi. Toutes les couches de communication sont concernées par cette quête continue du débit au meilleur coût, coût tant économique qu'énergétique. Chaque optimisation prise séparément pourrait probablement avoir un impact à moyen terme. A plus long terme, une rupture est sans doute nécessaire, fruit d'une combinaison incluant plusieurs facteurs dont celui de la couche physique.

Dans ce contexte compétitif, l'amplificateur optique réfléchissant à semiconducteur (RSOA) modulé directement est apparu comme une alternative bas coût par rapport aux sources plus classiques que sont les lasers directement modulés, accordables ou non. Hérité du SOA dont les connaissances et le savoir-faire datent des années 1980, ce type d'applications est encore récent, y compris pour le III-V Lab qui fut parmi les premiers à s'y intéresser. D'abord associé à un laser continu (configuration injectée) dans la thèse de Guilhem de Valicourt pour de la radio sur fibre, l'application actuelle au plus fort potentiel est la cavité auto-alimentée. Proposée originellement en 2007 par Elaine Wong, cette configuration consiste à injecter un signal fourni non plus par une source externe mais par le RSOA lui-même, grâce à un miroir placé après le multiplexeur. Moins coûteuse et plus souple que les configurations injectées, plus favorable aux transmissions haut-débit et longue distance que les configurations simples (RSOA seul), le potentiel des cavités auto-alimentées était, en 2013, renforcé par le contexte applicatif concret des réseaux d'accès, en particulier mobiles, dont les standards n'étaient pas encore établis.

Cette thèse débuta alors que la preuve de concept et le potentiel des cavités auto-alimentées avaient été démontrés. Néanmoins, la nature même de la cavité restait encore méconnue tout comme les conditions pour obtenir les meilleures performances. En particulier, le composant s'avéra être décisif puisque déterminant le débit nominal accessible.

Dès lors, notre principal sujet de recherche fut de trouver le composant idéal, capable de répondre aux exigences de débit, de distance de transmission, de coût et de consommation énergétique. Ce principe étant posé, les premières questions concernèrent le rôle du composant dans la cavité puis leur traduction en termes de conception. Quelle structure pour quelle propriété? Quels compromis effectuer entre deux tendances opposées? Les règles

d'ingénierie, même poussées, ne suffisent pas toujours à obtenir les spécifications visées. Nous nous interrogeâmes alors sur les principes physiques sous-jacents au RSOA dont le comportement se singularise de celui du laser et de l'amplificateur optique. Quoique d'allure simple, les phénomènes y sont complexes, contre-intuitifs en comparaison à la physique traditionnelle des lasers. Si, d'un point de vue subjectif, nous sommes convaincus que ses limites intrinsèques peuvent être repoussées, les échéances imposées par la vivacité des réseaux d'accès nous ont amené à chercher le meilleur compromis entre spécifications et temps de développement. Si la rupture ne peut venir du RSOA lui-même, quel composant pourrait la provoquer? Pour cela, nous avons cherché à tirer profit de la place privilégiée occupée par le III-V Lab dans la conception et la fabrication des composants optoélectroniques.

Pour mener à bien notre recherche du composant idéal, nous avons croisé études théoriques et expérimentales, fait des allers-retours entre conception, fabrication et caractérisation. Nos études s'appuient sur les connaissances et les briques développées dans le laboratoire ainsi que sur les échanges avec nos partenaires du projet européen ERMES et de l'Agence National de la Recherche LAMPION. Enfin, en parallèle de ces développements spécifiques, nous nous sommes souciés de la valorisation plus générale du RSOA, notamment au travers de cavités externes.

Ce manuscrit se divise en quatre parties. Celles-ci s'articulent de manière à dégager une cohérence globale, de la récolte des besoins et des spécifications du point de vue du concepteur de composants, jusqu'à la proposition de solutions à moyen terme, en passant par les études physiques et les contraintes matérielles qui orientèrent nos décisions. Ce document a été écrit pour satisfaire aussi bien le lecteur soucieux d'évaluer les cavités auto-alimentés qui le lira dans son ensemble que le lecteur curieux d'un aspect plus spécifique qui pourra choisir de n'en lire qu'une partie. De même, nous nous sommes efforcés de maintenir plusieurs niveaux de lectures possibles en dégageant les messages principaux.

Enfin l'ambition plus globale du manuscrit et de cette thèse furent d'inscrire ces recherches dans un contexte global afin de rendre nos contributions plus pertinentes.

Le chapitre 1 définit le cadre dans lequel nous allons évoluer. Après une brève description du contexte applicatif et des standards, nous évoquerons les évolutions historiques qui aboutirent aux cavités auto-alimentées, puis nous nous concentrerons sur le cas spécifique des RSOA en cavité auto-alimentées. A nouveau, nous ancrerons cette solution dans l'état de l'art puis nous détaillerons les paramètres qui influent sur les performances. Enfin, à la lumière de tous ces éléments, nous fixerons les ambitions de cette thèse.

Le chapitre 2 est une première approche des composants adaptés aux cavités. Dans un premier temps, nous décrirons les bases générales, les possibilités techniques, sur lesquelles nous nous appuierons dans la suite du chapitre. Nous évaluerons ensuite les RSOA disponibles au début de cette thèse pour relier les fonctions du composant dans la cavité à ses caractéristiques

physiques. Enfin nous en déduirons une conception adaptée, notamment d'un point de vue de la structure et de la fabrication.

Le chapitre 3 se concentre sur le comportement physique du RSOA. Pour cela nous commencerons par évoquer les principaux aspects théoriques et leur implémentation dans des modèles de simulations. A l'aide de ces éléments, nous tenterons de donner une définition du RSOA, ou, plus modestement, d'identifier ce qui le distingue du laser. Nous nous attarderons d'ailleurs sur deux particularités des RSOA adaptés aux cavités alimentées: les réflexions parasites et les fuites de porteurs. Nous montrerons en quoi elles sont dramatiques pour ce type de composants et dresserons des pistes d'améliorations. Outre ces optimisations, nous nous concentrerons sur l'évaluation des nouveaux composants en bande O et en aluminium. En plus des caractérisations statiques et dynamiques, nous les comparerons au RSOA de référence afin d'identifier les phénomènes dominants et leurs causes.

Le chapitre 4 traite de l'implémentation des cavités auto-alimentées et de leur optimisation. Les nouveaux RSOA seront tout d'abord jaugés. Les résultats obtenus chez nos partenaires seront abordés tout comme l'impact du miroir sur la bande passante de la cavité. Confrontés aux limites, actuelles, du RSOA en cavité, nous avons cherché d'autres solutions bas coût. Nous étofferons une configuration encore peu exploitée, celle du Fabry-Pérot en cavité, avant d'en proposer une nouvelle, basée sur un RSOA intégré avec un modulateur en sortie. Notre propos ne sera pas d'effectuer une démonstration système que nos partenaires maîtrisent mais de démontrer la faisabilité de la solution.

CHAPITRE 1

ARCHITECTURE DES NOUVEAUX RESEAUX D'ACCES : EVOLUTION ET ENJEU

Les réseaux de télécommunications n'ont eu de cesse d'évoluer. Si les années 80 ont vu naître internet et les téléphones portables, le *cloud* et les *smartphones* ont profondément transformé les interactions sociales et économiques dans les années 2000. Ces changements ont ainsi conduit à une très forte augmentation du trafic des données mobiles, multiplié par 4000 ces 10 dernières années (figure 1.1). Outre cette augmentation, d'autres critères traduisent la mutation actuelle. Parmi eux, citons l'impact environnemental ainsi que la qualité du service fourni à l'utilisateur comprenant notamment le débit nominal disponible (figure 1.2). Certains considèrent ces changements comme une sixième révolution technologique, d'autres comme la troisième révolution industrielle ou encore la troisième vague d'internet [1]. Quelles qu'elles soient, les années futures constituent un enjeu important pour les équipementiers et les opérateurs.

Composants, architecture des réseaux et normes s'entrecroisent dans cette recherche de solutions nouvelles. L'architecture en cavité auto-alimentée résulte ainsi d'un long processus débuté depuis une trentaine d'années et dont le domaine d'application est aujourd'hui en pleine expansion.

Dans ce chapitre nous contextualiserons d'abord la problématique des sources achromatiques bas coût pour les réseaux d'accès avant de décrire un peu plus les travaux autour de l'amplificateur réflectif optique à semiconducteur placé en cavité auto-alimentée. Enfin nous établirons la place et le rôle de cette thèse dans le cadre préalablement décrit.

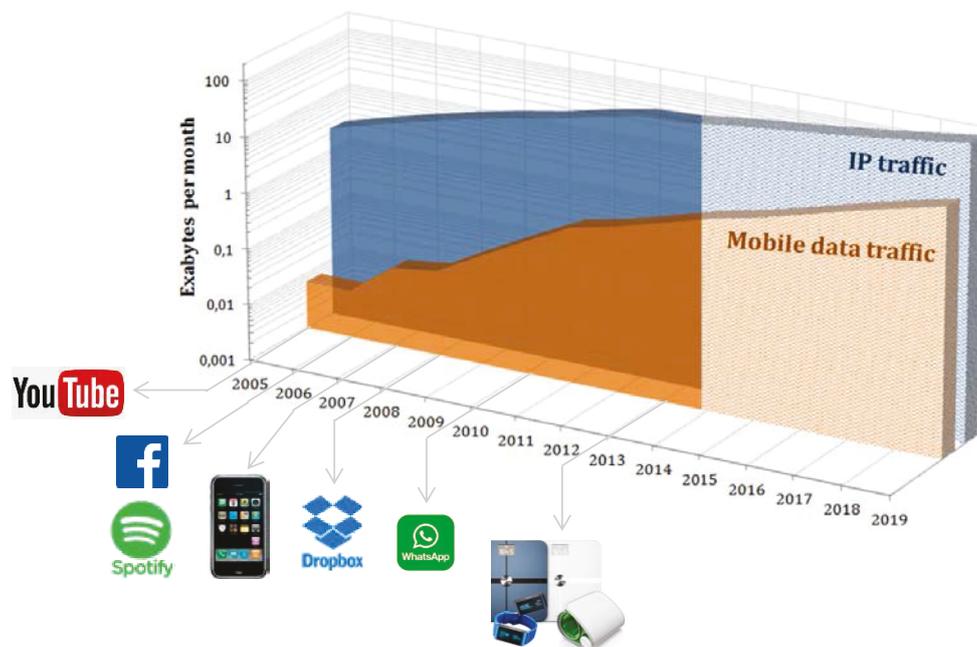


Figure 1.1- Evolution de la consommation des données dans les réseaux [2].

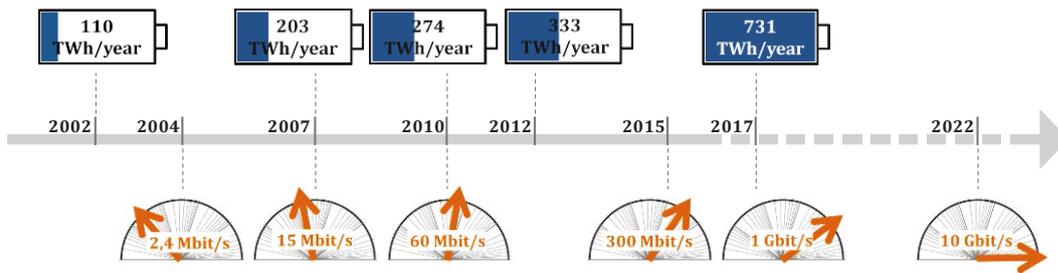


Figure 1.2- Consommation en énergie des réseaux dans le monde et débit maximal possible sur un terminal mobile ([1], [3]).

1.1. Réseaux centralisés d'accès radio

1.1.1. Architecture

Schématiquement, un réseau de télécommunication se décompose entre le réseau de cœur et le réseau d'accès (figure 1.3). Le réseau de cœur se structure en mailles, couvre plusieurs centaines de kilomètres et assure des liaisons d'une centaine de gigabits par seconde. Les réseaux d'accès maillent le territoire, ils relient un terminal à un commutateur du réseau de cœur. Les distances et débits sont plus faibles, de l'ordre de la dizaine de kilomètres et de quelques gigabits par seconde. On distingue les réseaux d'accès fixes qui couvrent, entre autres, les réseaux d'entreprises et de particuliers, des réseaux d'accès mobiles. Ces derniers connaissent une croissance particulièrement forte (figure 1.1) qui s'accroîtra dans les prochaines années. Par ailleurs, les contraintes en termes de coûts, de débit, de qualité de service et de consommation énergétique y sont importantes [4].

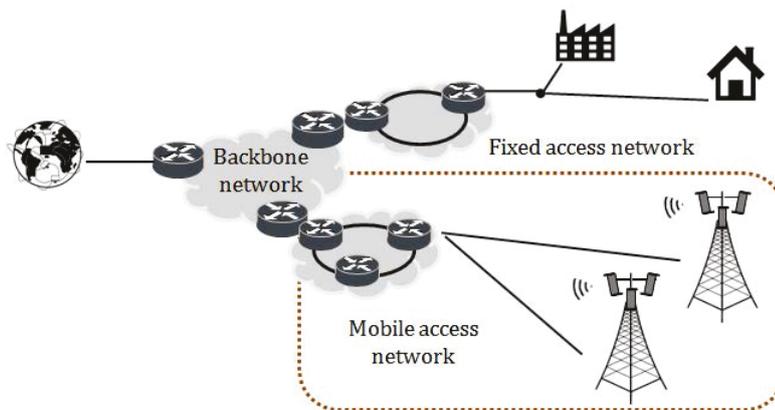


Figure 1.3- Exemple d'un réseau de télécommunication.

Pour répondre aux nouvelles exigences, un nouveau modèle d'architecture a donc émergé, basé sur le partage des ressources. Dans une architecture de réseau mobile classique appelée réseau distribué (*Distributed Radio Access Network, D-RAN*), les signaux radio sont reçus par les antennes puis transmis via un câble coaxial à la station de base quelques mètres plus loin. Dans ce local, les signaux sont convertis en format digital par une unité radio (*Remote Radio Unit, RRU*) et traités par le *baseband unit* (BBU) qui communique directement avec le cœur de réseau (figure 1.4). Une évolution consiste à déporter l'unité radio au niveau de l'antenne (*Remote Radio Head, RRH*) et à remplacer le câble coaxial par de la fibre optique. Un nouveau lien est alors créé, il s'agit du *fronthaul*. Ces nouveaux réseaux sont dits centralisés, *C-RAN*, car ils regroupent les BBU au niveau du *central office* (CO). Ce regroupement peut être simplement spatial (*hoteling*) mais certaines configurations les font

communiquer entre eux (*pooling*) et d'autres les relient à des serveurs pour une plus grande flexibilité (*cloud*). Une telle configuration réduit le matériel et ainsi l'espace et l'énergie nécessaires. Les règles d'ingénierie, l'installation et la maintenance des équipements sont aussi simplifiées. *In fine*, les frais d'installation et d'exploitation sont réduits ([5]-[7]).

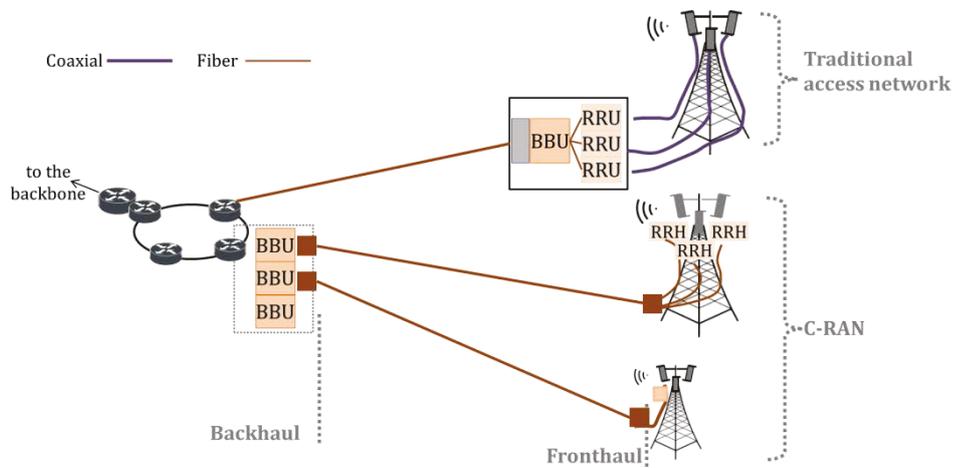


Figure 1.4- Schémas des architectures D-RAN (traditionnelles) et C-RAN.

1.1.2. Normes et protocoles

Bien que n'étant pas normalisée en tant que telle, une architecture C-RAN (*Common Radio Access Network*) doit intégrer les spécifications des protocoles utilisés pour permettre la communication entre RRH et BBU. Les deux principaux sont le *Common Public Radio Interface* (CPRI) et l'*Open Base Station Architecture Initiative* (OBSAI). Elle doit aussi intégrer les normes des différentes technologies mobiles notamment celle de la LTE (*Long Term Evolution*) éditée par le groupement 3GPP (*3rd Generation Partnership Generation*) et tenir compte des futures évolutions telles que la 5G ou les communications machine à machine de l'internet des objets. Enfin, remarquons que l'architecture devra aussi s'interfacer avec l'implémentation choisie (NGPON2 par exemple) réglementée par l'Union Internationale des Télécommunication (ITU) et le forum de standardisation *Full Service Access Network* (FSAN). Les principaux critères sont regroupés dans la table 1.1. Citons le débit allant jusqu'à 10 Gbit/s, la distance de transmission sur 40 km et des températures atteignant les 85°C.

Le C-RAN est d'ores et déjà développé en Asie grâce à des liaisons point à point, sans multiplexage en longueur d'onde (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM). D'autres solutions techniques existent à moyen terme pour multiplexer jusqu'à 18 canaux (*Coarse WDM*, CWDM) mais ce sont les cavités auto-alimentées en longueur d'onde basées sur les amplificateurs réflectifs à semiconducteurs (*Reflective Semiconductor Optical Amplifier*, RSOA) qui semblent être les plus prometteuses à long terme [5]. Elles ont pour avantage d'être achromatiques en longueur d'onde, tous les émetteurs sont rigoureusement identiques, ce qui simplifie d'autant plus le système et les coûts associés.

PARAMETRES	ORGANISMES	VALEURS
Débit	CPRI	614 Mbit/s à 10 Gbit/s
Latence	3GPP	~ 400 μs
Distance	Dépend de la latence	40 km
Température	ITU / Utilisateur	-40°C à 85°C
Encombrement	Utilisateur	Plus faible possible
Puissance	Utilisateur	Plus faible possible
Nombre de canaux	Utilisateur / ITU	3 antennes/ site * 4 à 5 technologies radio ~ 15
Qualité de services	3GPP / CPRI	BER de 10 ⁻¹²
Gigue / Synchronisation	3GPP / CPRI	Précision sur génération de la fréquence de l'horloge et sa dérive temporelle
Coût	Utilisateur	Plus bas possible
Garantie de la disponibilité du réseau	Future évolution	A fixer
Sécurité de la communication	Future évolution	A fixer

Table 1.1- Principaux critères du C-RAN [8, 9].

1.2. Solutions achromatiques bas-coût

1.2.1 Historique et typologie

Dès la fin des années 1980, une partie de la recherche autour des réseaux optiques d'accès multiplexés en longueur d'onde s'oriente vers des solutions achromatiques en longueur d'onde. Placées côté utilisateur (*Optical Network Unit, ONU*), elles doivent générer le signal remontant vers l'OLT (*Optical Line Terminal*) avec déjà le coût comme principale contrainte. Ainsi, en 1988, M. H. Reeve de British Telecom proposa d'associer des LED à un multiplexeur en longueur d'onde. La longueur d'onde de chaque canal est déterminée par le port du multiplexeur auquel il est connecté (figure 1.5). Il parvint à une transmission de 4 canaux à 2 Mbit/s sans erreur sur 2,2 km [10].

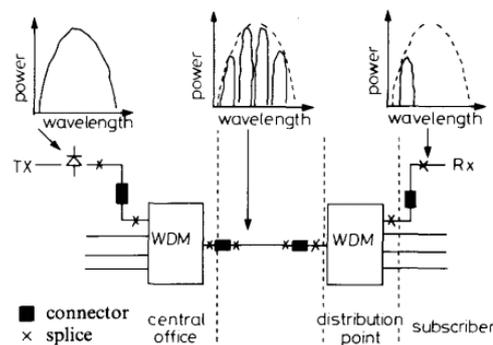


Figure 1.5- Filtrage en longueur d'onde de LED (M.H. Reeve, 1988 [10]).

Durant une vingtaine d'années, diverses pistes ont été explorées afin d'obtenir des transmissions avec un débit plus important et des distances plus grandes. Pour pallier aux limites de puissance et de bande passante engendrées par le filtrage optique, une alternative a été d'injecter un signal laser depuis le central office. Les coûts et la complexité étant plus importants, un compromis a été trouvé dans l'architecture auto-alimentée ou *self-seeded*. On peut distinguer trois à quatre types d'architectures en fonction de la source optique utilisée et de l'attribution de la longueur d'onde (table 1.2).

Plus précisément, les solutions étudiées se classifient aussi par le composant utilisé dont dépend la performance globale du système. Comme évoqué précédemment, les premières sources furent des LED [10, 11]. Des transmissions avec un amplificateur optique dopé Erbium (*Erbium Doped Fibre Amplifier*, EDFA) associé à un modulateur furent ensuite proposées [12], fournissant un débit certes plus élevé mais à un coût plus important car nécessitant plus d'équipements. L'introduction de lasers Fabry-Pérot (FP) [13, 14] et d'amplificateurs optiques à semiconducteur (*Semiconductor Optical Amplifier*, SOA) [15, 16], principalement par des chercheurs d'AT&T et de Lucent Bell Laboratories, a permis toute une combinaison de possibilités, exploitées par la suite dans les années 2000.

	ATTRIBUTION DE LA LONGUEUR D'ONDE	SOURCE OPTIQUE	SCHEMA
Sliced (filtré)	Par le port de l'AWG	Source d'ASE (ONU)	
Reused (rémodulé)	Correspond à celle du signal descendant	Laser modulé au central office	
Seeded (injecté)	Correspond à celle du signal injecté	Laser continu au central office	
Self-seeded (auto-alimentée)	Par le port de l'AWG	Source d'ASE (ONU) + Miroir	

Table 1.2- Typologie des architectures étudiées (AWG : Array Waveguide Grating, ASE : Amplified Spontaneous Emission).

1.2.2. Description des principales architectures

1.2.2.1. Fabry-Pérot verrouillés en longueur d'onde

De par sa simplicité et son faible coût, le Fabry-Pérot a été très largement utilisé dans ces configurations. Très vite, le type *seeded* a été préféré au *sliced* [13] ou au *reused* [17] qui sont limités par le bruit de partition modale [18]. Un exemple est donné en figure 1.6 où le mode Fabry-Pérot correspondant au canal du filtre en longueur d'onde est favorisé par l'injection d'un signal de même longueur d'onde [19, 20]. Cette source se décline généralement soit sous forme d'une source large bande de type EDFA [21] soit sous la forme d'un second Fabry-Pérot « maître » [22] ou encore sous la forme d'un laser accordable [23].

Quoiqu'amointri, le bruit reste toujours un facteur limitant. Certains ont ainsi formé une source faible bruit en associant deux Fabry-Pérot [24], d'autres ont fabriqué un Fabry-Pérot maître à base de boîtes quantiques [25] ou encore un Fabry-Pérot "esclave" insensible à la polarisation [26]. Plusieurs études ont par ailleurs montré qu'une faible réflectivité (1%) de la facette de sortie du Fabry-Pérot diminuait le bruit de partition et améliorait la transmission [23, 27]. Plus généralement, un Fabry-Pérot verrouillé par une source d'ASE ou un second Fabry-Pérot permet d'atteindre des transmissions sur 20 km à 2,5 Gbit/s.

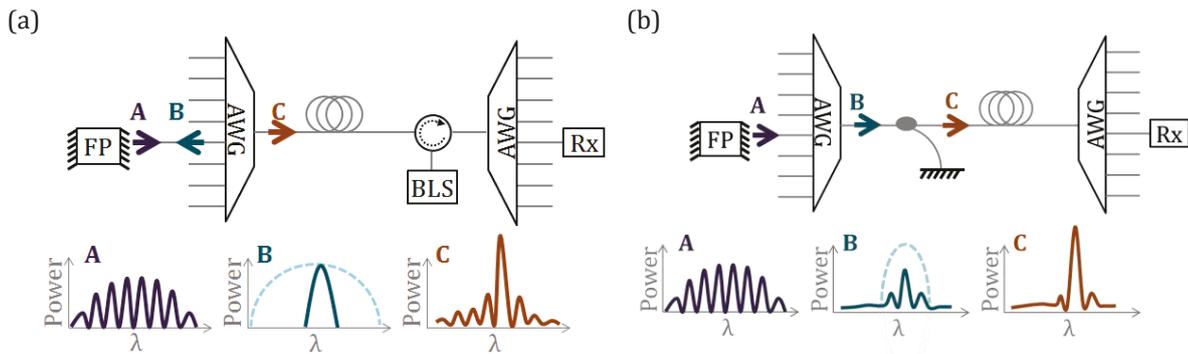


Figure 1.6- Laser Fabry-Pérot verrouillé (a) par une source large (BLS) et (b) par auto-injection.

Néanmoins l'ajout d'une source supplémentaire accroît la complexité du système, induit des interférences entre les différents signaux et engendre de la diffusion Rayleigh. Pour s'en affranchir, la source peut être remplacée par un élément réflectif (miroir [28], fibre à réseau de Bragg [29, 30], boucle de Sagnac [31]) qui renvoie le signal vers la source ; on parle de *self-seeded* ou d'auto-injection, domaine exploré auparavant pour la génération d'impulsions [14, 32]. Les performances publiées dans la littérature (1,25 Gbit/s sur 25 km) sont similaires à celles d'une architecture avec injection externe même si certains sont parvenus à des distances plus grandes [31, 33] ou des débits plus élevés [30].

1.2.2.2. RSOA injecté et RSOA remodulé

Une autre approche, développée en parallèle, consiste à remplacer le Fabry-Pérot par un RSOA qui a pour avantage de présenter plus de gain, moins de bruit et d'être peu sensible à la polarisation. Malgré des transmissions sans erreurs sur 25 km pour des températures de 0 à 60°C, l'architecture *sliced*, s'est à nouveau avérée limitée par un débit trop faible (155 Mbit/s) [34]. En revanche, la littérature concernant les architectures *reused* et *seeded* est riche, alimentée principalement par les chercheurs coréens de KAIST (*Korean Advanced Institute of Science and Technology*) et dans une moindre mesure par ceux de l'ETRI (*Electronics and Telecommunications Research Institute*) et de Samsung. Le sujet est si développé que l'opérateur Korea Telecom a déployé des premières solutions commerciales *Fiber To The Home* (FTTH) basée sur des RSOA injectés [35]. En Europe, cette thématique est portée par Orange, en collaboration avec le III-V Lab, ainsi que par les universités de Pise et de Catalogne. Enfin, on peut mentionner les contributions des opérateurs Chungwah Telecom (Taiwan) et des équipementiers Cisco, Ericson et NTT (*Nippon Telegraph and Telephone*).

L'architecture RSOA *seeded* est similaire à celle Fabry-Pérot *seeded* (figure 1.6). L'émetteur est relié à un filtre en longueur d'onde qui détermine le canal associé. La source d'injection est soit une source large, elle aussi filtrée, soit une source cohérente accordée selon le canal de l'émetteur. Quelles que soient les solutions proposées, les distances de transmission sont généralement comprises entre 20 et 30 km. Sans optimisation particulière, le débit est de 1,25 Gbit/s [36, 37]. Plusieurs possibilités rendent néanmoins les 10 Gbit/s atteignables. L'égalisation électronique s'appuie sur des circuits de décision à plusieurs étages et s'adapte bien aux réponses électro-optiques linéaires, à l'image de celle du RSOA. Utilisée dès 2008 [38, 39], on lui associe souvent un code correcteur d'erreur (FEC) optimisé pour ce type d'architecture [40]. L'égalisation optique augmente également le débit du système. Complètement passive, elle repose sur un décalage en longueur d'onde du filtre optique vers le bleu qui transforme la modulation de phase due au *chirp* du RSOA par de la modulation d'intensité [38, 41]. Une alternative à ces techniques est le recours à des formats de modulation complexes : modulation d'amplitude [42, 43], de phase [44], format retour à zéro (RZ) [45] ou encore multiplexage

en fréquences orthogonales [43, 46]. La détection cohérente représente une autre alternative et est d'autant plus facile à mettre en œuvre que le signal continu injecté dans le RSOA peut servir d'oscillateur local [47]. En mêlant ces techniques variées, différentes équipes sont parvenues à des débits de 25 Gbit/s [48, 49]. Parmi toutes les optimisations précédentes, rares sont celles qui concernent le composant lui-même. Pourtant c'est lui qui impose la contrainte la plus forte sur le débit final. Bien qu'à puits quantiques, le RSOA développé par Shin et al. reste limité à 1,25 Gbit/s [50]. Les RSOA issus du III-V Lab ont permis des transmissions à 5 Gbit/s [51].

Un cas particulier de RSOA *seeded* se présente lorsque le signal injecté est le signal descendant lui-même (figure 1.7), on parle alors de *reused* ou de remodulation. Cette configuration a pour avantage de s'affranchir d'une source lumineuse et donc de réduire le coût du système. Il faut néanmoins effacer suffisamment la modulation descendante pour éviter les interférences avec celle que l'on souhaite envoyer. L'effacement des données se fait de différentes manières. La plus simple est de placer le composant en régime saturé où la puissance de sortie reste constante quelle que soit la puissance d'entrée. D'abord étudiée pour des applications impliquant des SOA [52, 53], cette solution s'est étendue aux RSOA [54] suite à la première publication sur le sujet par Koponen [55]. Pour favoriser cette saturation, certains ont conçu des RSOA de 8 mm permettant d'effacer jusqu'à 56 Gbit/s et des taux d'extinction de 12 dB [56]. Une autre méthode pour effacer les données incidentes est d'introduire une boucle de rétroaction qui récupère en amont le signal descendant grâce à une photodiode et injecte le courant opposé dans le RSOA [52, 57]. Plutôt que d'effacer, un autre point de vue consiste à séparer signal descendant et signal remontant. La séparation prend plusieurs formes : fréquentielle dans des bandes séparées [58, 59], temporelle par mode *burst* [60], formats de modulations orthogonaux [61]. Même avec les techniques d'optimisation employées pour la configuration injectée, les performances restent moindres en remodulé avec des débits ne dépassant pas les 10 Gbit/s [62, 63].

L'architecture *self-seeded* ou auto-alimentée sera présentée au paragraphe 3.

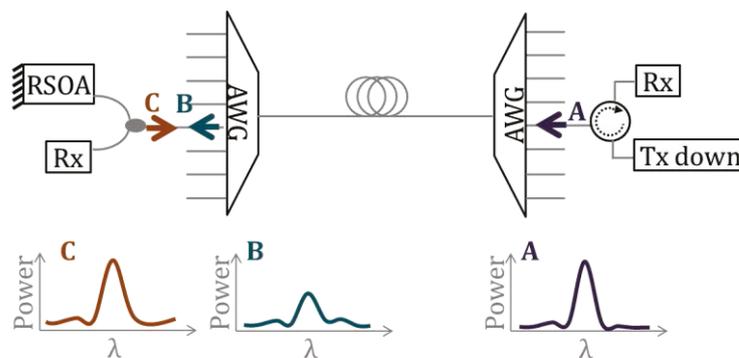


Figure 1.7- Remodulation du signal descendant par un RSOA.

1.2.2.3. SOA-REAM injecté

Les architectures avec RSOA sont limitées par la bande passante du composant. L'ajout d'un modulateur externe de type Mach-Zehnder serait coûteux et les techniques d'égalisation ajoutent de la complexité au système. Un compromis est d'ajouter au RSOA une seconde section de modulateur à électro-absorption (EAM). Souvent associé à un laser (de type DFB par exemple) pour former un laser modulé, l'EAM offre des débits allant jusqu'à 100 Gbit/s [64]. Il introduit néanmoins des pertes optiques conséquentes, d'où son association fréquente avec un SOA.

Le SOA-REAM est formé d'une section SOA à l'entrée/sortie du composant et d'un EAM avec une facette traitée haute réflectivité. Ce composant a connu un essor particulier à la moitié des années 2000, développé parallèlement par le laboratoire Tyndall (Irlande) associé à l'industriel CIP (Royaume-Uni) dans le cadre du projet européen PIEMAN et par le III-V Lab associé à l'opérateur Orange et au laboratoire FOTON dans le cadre du projet de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) ANTARES. Dans les deux cas, le SOA-REAM est placé dans une configuration injectée ou *seeded*. En plus du signal descendant, un signal continu est envoyé depuis le *central office*. Ce signal est amplifié une première fois par le SOA, modulé par l'EAM puis à nouveau amplifié par le SOA. Des études théoriques et expérimentales ont montré que le SOA placé en régime de gain saturé avait pour avantage de réduire le bruit créé par la diffusion Rayleigh [65] et de réduire les écarts de puissance entre les différents ONU [66]. Ces études ont aussi démontré que les pertes induites par le modulateur permettent de diminuer la puissance incidente dans le SOA, et ainsi de réduire la distorsion du signal remontant [67]. Les performances atteintes furent prometteuses puisque le débit typique de ce système est de 10 Gbit/s [68-70] et ce sur un large spectre optique (80 nm) et pour des températures allant jusqu'à 60°C [71]. En se basant sur les recherches menées pour les architectures RSOA, certains ont atteint 25 Gbit/s (bande de fréquences séparées) [72] et même 40 Gbit/s en utilisant des techniques poussées d'égalisation électronique [73].

1.2.2.4. Récapitulatif

Dans ce paragraphe, diverses solutions d'émetteur achromatique ont été décrites. Le panel, relativement large, se décompose en fonction de l'architecture choisie et du composant qui fournit le signal remontant. Le tableau 1.3 croise ces options et présente les éléments marquants associés. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.4.

	FP	RSOA	REAMSOA
Sliced (Filtré)	Peu étudié. Réf. : Woodward [13].	Peu étudié. Réf. : Park [34].	Non étudié
Reused (Remodulé)	Peu étudié. Réf. : Chan [17].	Très étudié. Réf. : Al-Qzawini [59]. Débit moyen : 1,25 Gbit/s Débit max : 10 Gbit/s	Non étudié
Seeded (Injecté)	Très étudié par KAIST, déployé par KT [26]. Débit moyen : 2,5 Gbit/s	Très largement étudié, poussé par KAIST. Réf. : Cho [48] Débit moyen : 10 Gbit/s Débit max : 25,8 Gbit/s	Etudié de 2006 à 2012 par Tyndall et III-V Lab [66, 71]. Débit moyen : 10 Gbit/s Débit max : 40 Gbit/s
Self-Seeded (Auto-alimenté)	Quelques papiers. Réf. : Presi [75] Débit moyen : 1,25 Gbit/s	Projet européen ERMES et ANR LAMPION. Réf. : Wong [74]	Non étudié

Table 1.3– Résumé des solutions existantes : intérêt suscité, papier référence et débit associé.

		AVANTAGES	INCONVENIENTS
ARCHI- TECTURE	Sliced (Filtré)	Simplicité Bas coût	Faible puissance Faible débit Bruit
	Reused (Remodulé)	Simplicité Bas coût	Effacement du descendant Interférences, solutions complexes pour les éviter
	Seeded (Injecté)	Débit/puissance plus élevés	Diffusion Rayleigh Coût supplémentaire
	Self-Seeded (Auto-alimenté)	Compromis coût/simplicité/performances	Battements entre les modes RIN
COMPOSANT	FP	Bas coût Commercialisés Simple	Bruit de partition Accordabilité Dépendant à la polarisation
	RSOA	Simple Bas coût Bande optique Gain Indépendant à la polarisation	Peu commercialisé Débit Bruit
	RSOAEAM	Débit élevés Indépendant à la polarisation	Fabrication plus complexe Coût

Table 1.4 – Récapitulatif des solutions en fonction du type d'architecture et du composant.

Il reste néanmoins une solution non décrite, celle des RSOA en cavité auto-alimentée, architecture centrale des projets européen ERMES et ANR LAMPION, cadres dans lesquels cette thèse s'est déroulée.

1.3. RSOA en cavité auto-alimentée

1.3.1. Description

Evolution des architectures précédentes, le RSOA en cavité auto-alimentée est la configuration la plus courante lorsque l'on parle de *self-seeded. A minima*, celle-ci se compose d'un RSOA, d'un filtre en longueur d'onde, d'un coupleur et d'un élément réfléchissant reliés par de la fibre optique. Placé dans chaque ONU, le RSOA émet un large spectre d'émission spontanée amplifiée (*Amplified Spontaneous Emission, ASE*) (①, fig. 1.8) lorsqu'on lui injecte un courant. Ces spectres, tous identiques, sont ensuite filtrés par un multiplexeur en longueur d'onde, ici un AWG, (②). L'AWG sélectionne une petite partie du signal d'ASE, chaque canal étant centré sur une longueur d'onde différente. En sortie de l'AWG, les signaux sont multiplexés (③) puis une partie se retrouve réfléchi, est à nouveau filtrée puis routée vers le RSOA associé (④). Celui-ci amplifie et renvoie le signal. Au fur et à mesure des allers-retours, la puissance du signal augmente, son spectre s'affine (⑤).

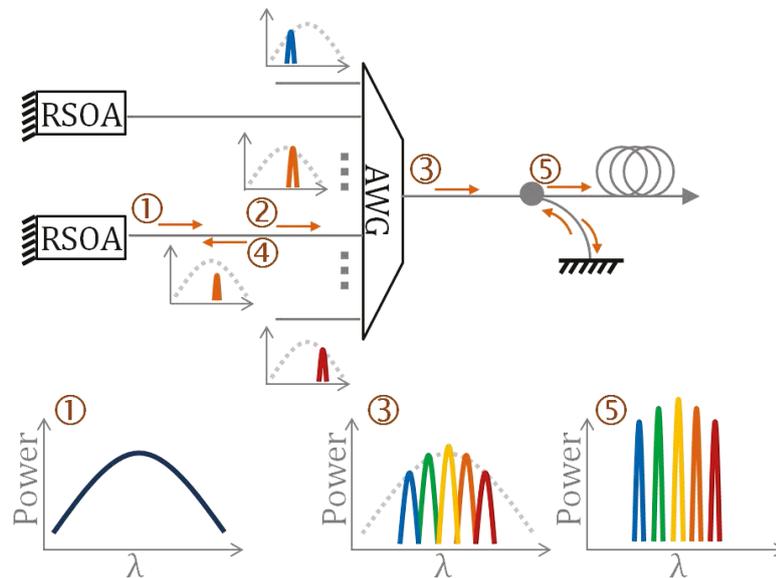


Figure 1.8- Fonctionnement d'une cavité étendue auto-alimentée.

En régime dynamique, le RSOA est directement modulé. Après être passé par l'AWG et le coupleur, le signal codé est transmis vers le cœur de réseau (⑤, fig. 1.8). La partie réfléchi revient atténuée mais toujours modulée vers le RSOA. En supposant une cavité de 1 m, le signal met 10 ns à revenir à l'ONU. Or le temps entre deux bits est de 1 ns en supposant un débit de 1 Gbit/s. Cela signifie qu'une dizaine de bits auront déjà été codés. Le signal incident et le signal sortant sont décorrélés. Cette problématique est peu usuelle puisque dans le cas d'une cavité laser classique de 500 μm , le temps d'aller-retour des photons est 100 à 1000 fois plus faible que le temps entre deux bits. Afin d'éviter toute interférence entre les signaux, la modulation incidente doit donc être effacée. En plus de fournir du gain et de moduler, on attache ainsi une troisième fonction au RSOA, celle d'effacer.

Les cavités auto-alimentées occupent une place particulière, entre deux échelles, à mi-chemin entre la physique du composant et l'intégration système. A la fois simple, car constituées de peu d'éléments, et complexes car chaque détail impacte les performances globales.

1.3.2. Historique

Le RSOA placé en cavité auto-alimentée est apparu en tant que tel en 2006 dans une première publication d'Elaine Wong de l'université de Melbourne [76], suivie quelques mois plus tard d'un article le *Journal of Lightwave Technology*, considéré aujourd'hui comme référence [74] (figure 1.9).

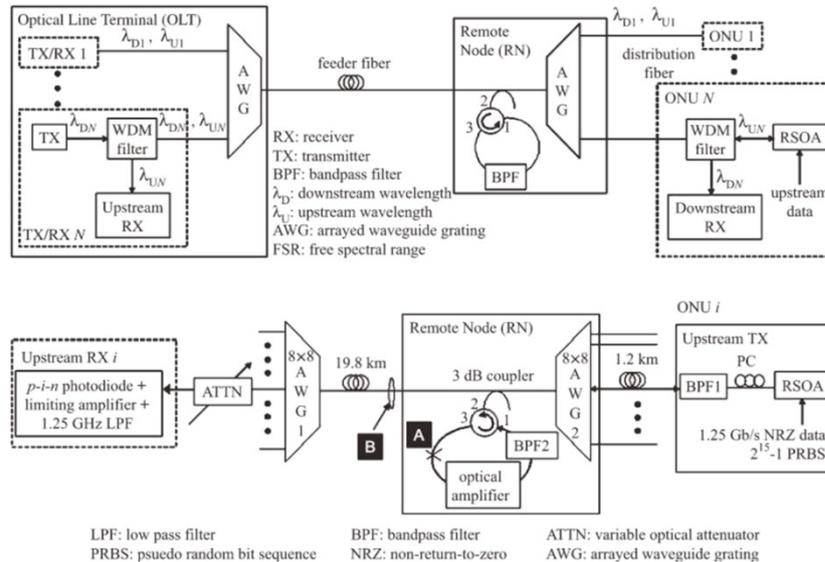


Figure 1.9- Architecture proposée par Elaine Wong [74].

Elle y propose un élément réflectif composé d'un filtre et d'un circulateur dont la fonction de transfert est similaire à celle d'une fibre à réseaux de Bragg (FBG). Il s'agit d'ailleurs de la solution adoptée la même année par un groupe de l'université de Yonsei en Corée [77] et par une autre équipe de l'université de Melbourne [78]. Il faudra attendre quatre années supplémentaires avant que cette architecture ne suscite à nouveau de l'intérêt. Malgré des résultats prometteurs [79, 84], c'est l'introduction d'un miroir rotateur de Faraday (FRM) comme élément réflectif par Marco Presi en 2011 [80] qui permet de stabiliser le système. Dès lors, de nombreux groupes travaillèrent à comprendre et optimiser ce système. Académiques comme industriels publient ainsi régulièrement leurs avancées dans les journaux, les conférences ainsi que dans les instances de réglementation. Sans être exhaustif, le tableau 1.5 résume les principales contributions sur le sujet.

Orange Labs et le III-V Lab font partie des groupes historiques qui travaillent sur le sujet depuis les prémices de cette architecture jusqu'aux essais de terrains actuels. Quelques groupes universitaires tels que l'université de Zagreb ou celle de Sao Paulo se sont spécialisés sur un aspect de la cavité et publient régulièrement. Huawei participe depuis 2010 à la valorisation du système, proposant presque uniquement des démonstrateurs (composants en module standard SFP, transmissions avec les protocoles usuels...). Remarquons l'absence des laboratoires coréens, notamment de KAIST pourtant acteur majeur de la configuration RSOA injecté. Leurs connaissances poussées sur le composant pourraient toutefois lui conférer une place dans le tableau ci-dessus. Enfin, l'université de Tokyo soutenue par Oclaro étudie cette architecture depuis peu. C'est un des rares laboratoires qui a, tout comme le III-V Lab, développé son approche autour du composant.

La plupart des brevets sur le sujet sont détenus par les acteurs ci-dessus, en particulier Huawei, Ericsson et dans une moindre mesure Samsung et Alcatel.

LABO.	PAYS	FINANCEMENT	1 ^{IERE} PUBLI.	FREQ. PUBLI.	CONTRIBU- TEURS	APPROCHE
Uni. de Melbourne	AU	Académique	2006	Ponctuel	E. Wong	Référence
Politecnico di Milano	IT	Académique	2010	Très actif	P. Parolari; L. Marazzi	Performances
Orange Labs	FR	Industriel	Historique	Très actif	F. Saliou; P. Chanclou	Pragmatique, opérateur
Uni. Pise	IT	Académique	2011	Très actif	M. Presi; E. Ciaramella	Polarisation
III-V Lab	FR	Industriel	Historique	Régulier	R. Brenot	Composant
Huawei/ China Tel.	US, CN	Industriel	2011	Régulier	N. Cheng; Y. Ma	Démonstrateur
ZTH	CH	Académique	2012	Ponctuel	J. Leuthold	Modélisation
Uni. Sao Paulo/ CQPD	BR	Académique	2011	Régulier	U.R. Duarte; A. Romero	Globale
Uni. Zagreb	HR	Académique	2011	Régulier	T. Komljenovic	Élément réflectif
Uni. Tokyo / Oclaro	JP	Académique, industriel	2015	Ponctuel	T.Tanemura ; Y. Nakano	Composant
Ericsson	IT	Industriel	2013	Ponctuel	L. Giorgi	
Uni. Catalogne	ES	Académique	2015	Ponctuel	J. Prat	Exploratoire
Uni. Laval	CA	Académique	2009	Ponctuel	W. Mathlouthi	
Uni. Chend Du / British Tel.	CN, UK	Académique, industriel	2015	Ponctuel	M. L. Deng	

Table 1.5- Principaux contributeurs sur les RSOA en cavités auto-alimentées.

1.3.3. Etat de l'art

Malgré une architecture commune, comparer les résultats des divers groupes n'est pas trivial. La comparaison a pour limite le domaine d'application. Par exemple, les performances sont globalement moins bonnes pour de longues cavités (> 10 km). Pourtant agrandir la cavité permet de repousser le second miroir vers le *central office*, donc de s'affranchir d'un local déporté et ainsi de diminuer les coûts d'infrastructure et d'ingénierie. Jauger une solution nécessite de prendre en compte les performances, l'application, le coût et la complexité globale du système.

Pour ce faire, nous avons repris les travaux des différents groupes et dégagé des points de comparaison. A notre sens, les principaux critères de performances (figure 1.10) sont :

- le débit nominal par utilisateur ou ONU dont dépend la capacité globale du système ;
- la longueur de la cavité qui détermine l'application future. Plus elle sera grande, plus l'architecture gagnera en flexibilité ;
- la distance utilisateur / nœud de réseau ;
- le nombre d'utilisateurs. Le système étant partagé, son coût par utilisateur baisse avec le nombre,
- le taux d'erreur à la réception. La valeur limite pour que la séquence puisse être corrigée par un code correcteur d'erreurs (FEC) étant comprise entre 10^{-4} et 10^{-3} ;
- le budget optique, qui correspond à la différence entre la puissance minimale à la réception pour obtenir un taux d'erreur satisfaisant et la puissance de sortie de la cavité. Souvent peu disponible, on retrouve plus couramment la puissance reçue par la photodiode.

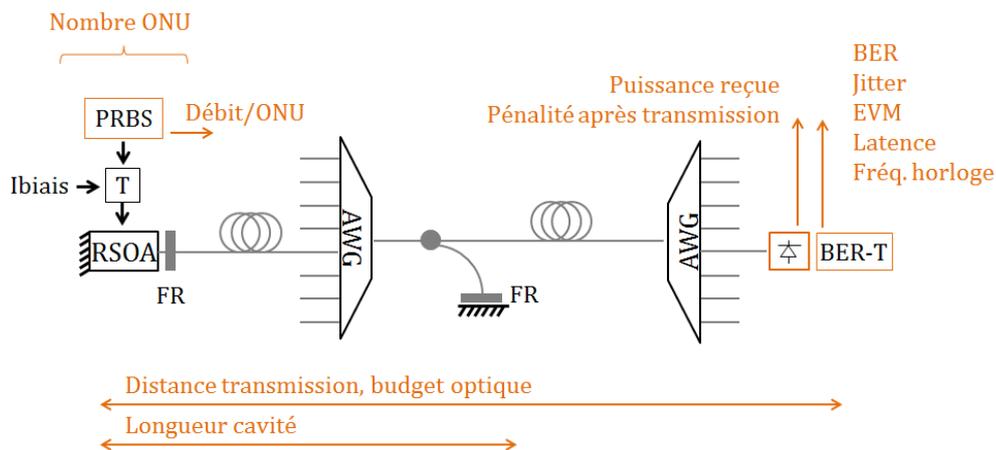


Figure 1.10- Principaux critères de performance d'une architecture auto-alimentée.

Il faut néanmoins rester attentif à la présence de certains éléments qui améliorent ces résultats. Notamment :

- l'amplification apportée par d'éventuels EDFA, SOA ou RSOA saturés ;
- l'égalisation électronique après réception du signal. Ils ajoutent de la complexité et donc un coût au système ;
- les filtres de fréquence et la récupération d'horloge à la réception, moins impactants que l'égalisation ;
- le format de modulation.

Le tableau 1.6 présente un aperçu des architectures publiées depuis 2012 ; la figure 1.11 en extrait les performances globales. Par soucis de clarté, quelques références ont été retirées.

REF.	SYMB.	GROUPE	ANNEE	PERFORMANCES				TRANSMISSION			ARCHITECTURE		TRAITEMENT DU SIGNAL			
				DEBIT/ONU	DIST. TRANS.	DIST. OLT/ONU	NB. ONU	LARGEUR AWG	RSOA	BANDE	MOD.	AMPL.	LONG. CAV.	EGALISAT. ELEC.	RECUP. HORLOGE	CIRCUIT DECISION
				Gbit/s	km	km		GHz				km				
81	◇	Zagreb	2012	1,25	23	23,5	16	150	CIP	C	n. a.	non	0,5	non	non	non
82		Huawei	2012	1,25	20	25	512	100	Huawei	C	n. a.	non	5	non	oui	non
83	□	Orange	2012	6,14	40	50	32	n.a.	Huawei	L & C	n. a.	non	10	non	non	non
84	◁	Orange	2012	10	20	25	8	100,200	III-V	C	NRZ	non	5	>5 Gbit/s	oui	non
85	○	Orange	2013	5	60	60	16	n.a.	III-V	C	NRZ	non	6	non	non	non
86	▷	Polimi	2013	10,7	24	25	n. a.	55, 110, 220	III-V	C	n. a.	non	0,9	>5 Gbit/s	oui	non
87-89		Polimi	2014	10	72	72	32	65, 145	III-V	0	n. a.	non	1	oui	oui	non
90	◇	Orange	2014	2,5	90	90	4	200	III-V	0	NRZ	non	26	non	non	non
90		Orange	2014	2,5	70	70	4	200	III-V	0	NRZ	RSOA saturé	70	non	oui	non
91		Orange	2014	10	80	80	16	100	III-V	n. a.	FDM	EDFA	n.a	oui (DCF*)	non	non
92		Sao Paulo	2014	1,25	100	100	n. a.	62	MeI Inc.	C	NRZ	EDFA	0,01	non	non	oui
93	◻	Polimi	2015	10	72	73	32	55,65, 100,200	III-V	C & O	n. a.	non	1	>10Gbit/s	oui	non
94		Polimi	2015	12	10	10	n. a.	60, 65, 146	III-V	0	FDM	non	n.a.	oui	non	non
95	◐	Orange	2015	2,5	125	125	4	200	III-V	0	NRZ	Avec et sans RSOA saturé	125	non	oui	non
96	◑	Polimi	2015	10	50	56	n. a.	146	III-V	0	n. a.	non	6	>10Gbit/s	oui	non
97		Huawei	2015	2,5	20	21	16	n. a.	Huawei	C	QAM/QPSK	non	1	non	non	non
98	◒	Tokyo	2015	2,5	25	25	n. a.	n. a.	Oclaro	C	n. a.	non	n.a.	non	non	non

Table 1.6- Architecture et performances (débit, distance, nombre d'ONU) des cavités auto-alimentées basées sur un RSOA. (* DCF : fibre à compensation de la dispersion, les auteurs considèrent que cette fibre peut être remplacée par de l'égalisation électronique). Les valeurs sont les valeurs maximales obtenues.

Le graphique 1.11 n'est qu'une représentation partielle de la littérature. Pourtant, nous nous permettons d'en tirer plusieurs conclusions. La plus évidente est la prédominance de débits à 2,5 Gbit/s. Il existe une grande variété de configurations à ce débit. Des transmissions dépassant les 50 km ont été atteintes grâce à la conception de nouveaux RSOA en bande O [85, 93, 95] et ce, même avec des cavités de 26 km [90]. Plus conventionnellement, les transmissions se font sur 20 km pour des cavités de quelques mètres seulement. Plusieurs démonstrateurs intégrant les protocoles CPRI et le RSOA dans un module SFP ont abouti à des essais de terrain [96, 97], démontrant la faisabilité du concept. Dans une perspective d'hybridation avec les réseaux déjà existants, d'autres ont introduit du multiplexage temporel [82, 99]. Un dernier point de vue développé en parallèle par Orange [100, 101] et l'université de Chengdu associée à British Telecom est de repousser le miroir jusqu'au nœud de réseau en le remplaçant par un RSOA saturé. Celui-ci assure un double rôle : amplifier le signal incident et effacer la modulation retournant vers l'ONU. Partagé par tous les utilisateurs, le coût de cet ajout devrait être minime. Dans ce cas, la taille de la cavité correspond à la distance de transmission et peut dépasser les 100 km [95].

En revanche, peu de papiers relatent des opérations à un débit supérieur à 5 Gbit/s. Seuls Orange et Polimi ont publié à ce sujet en utilisant des composants III-V Lab et en ayant recours à de l'égalisation électronique à 10 Gbit/s. Pour contourner la bande passante limitée du RSOA et atteindre les 10 Gbit/s, une dernière technique est la modulation en sous-bandes de fréquences en attribuant aux fréquences les plus faibles le format le plus complexe (16 QAM par exemple) et aux fréquences plus élevées un format plus simple (BPSK par exemple) [91, 94].

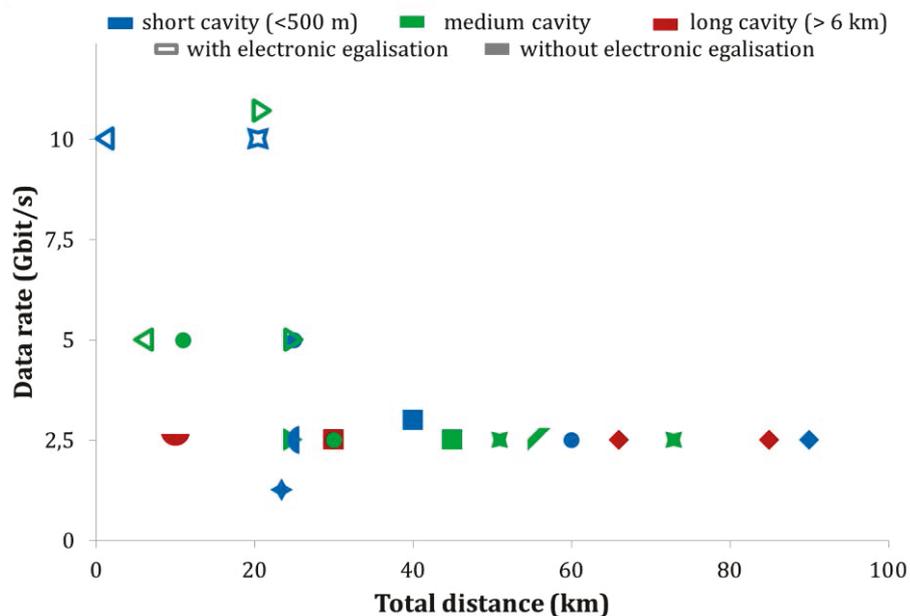


Figure 1.11- Débits et distances ONU/central office des résultats [81-98] en fonction de la longueur de la cavité et d'utilisation d'égalisation électronique. Les résultats sont extraits des données publiées pour un BER de 10^{-3} . Se référer au tableau 1.6 pour les correspondances.

On remarquera l'absence de propositions à haut-débit et pour de longues distances, ce qui correspond au "vide" sur le quart supérieur droit du graphique 1.11. Cette cible constitue évidemment un axe important de la recherche actuelle autour des cavités auto-alimentées.

Un dernier aspect concerne la puissance disponible. En général le budget optique est compris entre 20 et 30 dB et les pénalités dues à la transmission varient d'une solution à l'autre (fig. 1.12). Comme

nous le détaillerons par la suite, les composants en bande O sont les seuls à atteindre de longues distances car de faible dispersion chromatique.

Toutefois, la comparaison entre les divers résultats publiés présente des limites. En effet, le choix des éléments du système et leur intégration les uns avec les autres constituent des degrés de liberté non négligeables qu'il est important de quantifier.

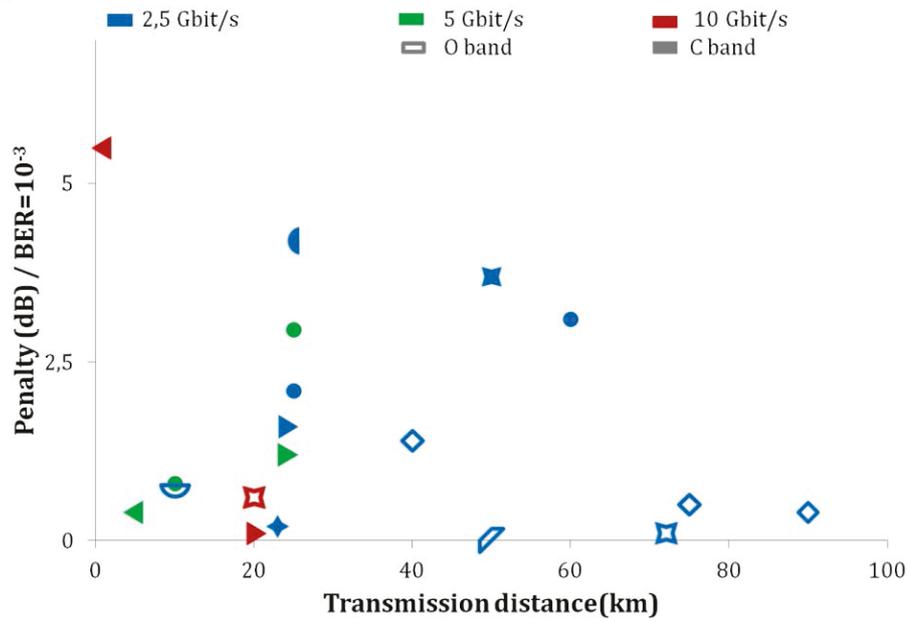


Figure 1.12- Pénalités à la réception pour un BER de 10⁻³ en fonction de la distance de transmission. Se référer au tableau 1.6 pour les références.

1.3.4. Paramètres

Le bon fonctionnement de la cavité résulte d'un équilibre ténu entre tous les paramètres de la cavité. Nous les avons classés en quatre grandes catégories résumées dans le tableau 1.7 et détaillées dans les paragraphes ci-dessous. Le RSOA est une sous-catégorie des équipements, mais sa place est telle qu'il apparaît comme une catégorie à part entière.

EQUIPEMENTS	RSOA	TRANSMISSION	ARCHITECTURE	RECEPTION
Réfectivité miroir	Gain	Distance	Longueur cavité	Récepteur
Ratio du coupleur	Longueur d'onde	Débit	Place miroir	Bande passante
AWG, espacement canaux	Puissance de sortie	Format de modulation	Puissance de sortie	Filtre fréquentiel
AWG, nombre canaux	Puissance de saturation	Taux d'extinction	Temps d'allumage	Récupération d'horloge
AWG, forme	Confinement	Longueur séquence	Courant de seuil	Détection
AWG, FWHM	Courant	Splitter (TDM)	RIN	FEC
Polarisation (FR, PC)	Bande passante E/O	Amplification	Dispersion chromatique	Egalisation électronique
	Largeur optique	Pertes	Signal descendant (débit, format, longueur séquence, longueur d'onde, ER, puissance...)	Egalisation optique
	Réfectivités facettes			Contrôle courant du RSOA
	Régulation en température		Distance ONU/Miroir	
			Puissance / canal	
			Effacement des données	

Table 1.7- Paramètres déterminants dans une cavité auto-alimentée.

1.3.4.1. Equipements

La gestion de la polarisation a été un apport majeur dans la démocratisation des cavités auto-alimentées. Un simple contrôleur de polarisation fut initialement placé en sortie du RSOA [74]. Pourtant la biréfringence intrinsèque à la fibre optique rend imprédictible le vecteur de Jones qui décrit l'état de polarisation d'une onde électromagnétique. Le signal revient alors au RSOA avec un état de polarisation quelconque, ce qui affecte la stabilité du système. En 2011, M. Presi et E. Ciaramella introduisirent un miroir rotateur de Faraday (FRM) comme élément réflectif déporté [80]. Un FRM réfléchit le signal dans un état orthogonal à l'état du signal incident. Associé avec un RSOA faiblement dépendant à la polarisation (PDG), le taux d'erreur (BER) de la transmission devint non seulement plus faible mais aussi plus stable. Si on ajoute un rotateur de Faraday (FR) à la sortie du RSOA, l'état de polarisation du signal revenant est alors aligné avec l'état initial, et ce quelle que soit la dépendance à la polarisation du RSOA [102].

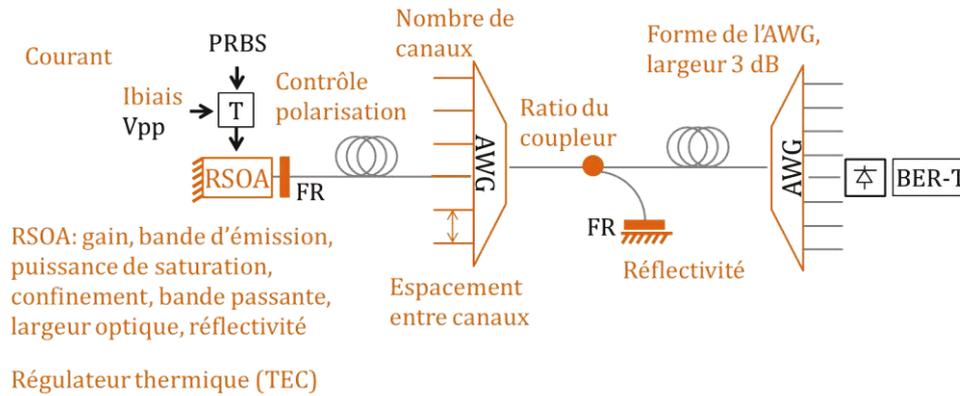


Figure 1.13- Schéma des principaux paramètres liés au matériel utilisé dans une cavité (PRBS ; Pseudorandom Binary Sequence).

Le second paramètre majeur est le multiplexeur/démultiplexeur en longueur d'onde. Plusieurs études ont montré qu'un filtre de forme plate ou *flat-top* présentait un BER et des pénalités de transmission plus faibles qu'un filtre de forme gaussienne [103]. Cela peut s'expliquer par un pic laser plus étroit dans le cas du filtre *flat-top*. De même, le BER et la sensibilité à la réception en *back-to-back* s'améliorent avec une largeur à mi-hauteur plus grande [103, 104]. Un filtre trop étroit conduit d'ailleurs à un plancher d'erreurs [81, 86] car cela augmente le bruit d'intensité (*Relative Intensity Noise*, RIN) [105]. En revanche, après transmission, un filtre trop large permet à la dispersion chromatique de s'accumuler entraînant plus de pénalités [86]. La largeur du filtre résulte donc d'un compromis. Si le décalage du pic de la cavité vers les grandes longueurs d'ondes par rapport au pic central du filtre a été plusieurs fois observé [92, 103], l'impact du démultiplexage l'a peu été. Or, le démultiplexeur, identique au multiplexeur, filtre les bords du spectre. Il filtre donc une partie des informations contenues dans le signal laser modulé, ce qui dégrade les performances [106]. Enfin, quelques papiers comparent les canaux entre eux. Puisque le gain du RSOA varie en fonction de la longueur d'onde, les raies laser n'ont pas la même puissance en sortie de cavité. Leur RIN varie également, les écarts étant plus prononcés à hautes fréquences [85]. En général le canal du milieu est le plus favorisé avec une meilleure sensibilité et un meilleur budget optique [88, 107, 108].

Outre le multiplexeur et le FRM, le RSOA occupe une place centrale dans ce système. La plupart des résultats dépendent de ses performances. Le RSOA assure un triple rôle dans la cavité : fournir un gain suffisant pour compenser les pertes, moduler le signal et effacer le signal revenant. Ce dernier point est rendu possible par la compression du gain qui "écrase" la modulation : quelles que soient les puissances entrant dans le composant, la puissance de sortie sera la même [109, 110]. Pour cela, il est préférable d'utiliser un matériau massif à fort confinement optique. Ce type de RSOA est peu dépendant à la polarisation. Au contraire, pour obtenir un composant rapide, on préférera utiliser des puits quantiques, très dépendants à la polarisation, et de plus faible confinement. La conception d'un RSOA adapté à une cavité auto-alimentée répond donc à un compromis entre deux logiques contraires. Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.3, concilier haut débit et longue distance reste aujourd'hui une question ouverte. Les optimisations éparées ou le recours à de l'égalisation électronique pourront certes améliorer l'existant mais seule une conception plus poussée du composant permettra d'y répondre. Un autre défi est celui de la régulation en température, énergivore, dont on souhaite s'affranchir de plus en plus. Dans le domaine des RSOA injectés, K. Y. Cho a développé des composants plus robustes à la température ainsi qu'un circuit de décision qui ajuste le courant [39]. Plus récemment, un groupe de l'université du Japon associé à Oclaro a réalisé des transmissions non

refroidies entre 25 et 50°C [98]. Ces enjeux constituent la problématique centrale de cette thèse que nous détaillerons au paragraphe suivant.

Dans une moindre mesure, le ratio entre la quantité de signal qui sort de la cavité de celle qui est renvoyée vers le RSOA est une valeur à ajuster. Diminuer les pertes dans la cavité signifie augmenter le couplage vers le miroir. Plus de signal est renvoyé vers le RSOA, les données sont mieux effacées et le taux d'extinction en sortie s'accroît [111]. En parallèle, la puissance de sortie, de fait, diminue et réduit le budget optique disponible [103, 111]. Pour obtenir une valeur optimale, il faut aussi tenir compte de la longueur de la cavité qui participe aux pertes dans la cavité [90].

1.3.4.2. Architecture

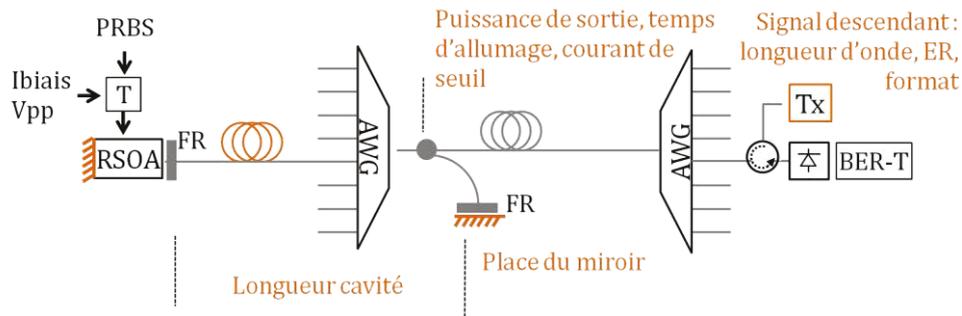


Figure 1.14- Schéma des principaux paramètres liés à l'architecture de la cavité.

La longueur de la cavité est sans doute le paramètre le plus étudié dans la littérature. En effet, les pertes optiques qu'elle ajoute ne sont pas la seule cause de la dégradation du budget optique et du BER [84, 85]. Ces pénalités sont toujours présentes, même en insérant un atténuateur optique variable (VOA) pour travailler à pertes constantes [103]. Cela peut s'expliquer par deux phénomènes : le bruit de battement entre les modes et la dispersion chromatique. Comme dans un laser Fabry-Pérot, l'espacement entre deux modes est inversement proportionnel à la longueur de la cavité [105]. Il y a, par exemple, 1000 fois plus de modes dans une cavité de 1 km par rapport à une cavité de 1 m. Pour une cavité courte de quelques mètres, la relation de phase entre les modes maintient une puissance relativement constante, le RSOA effaçant les fluctuations résiduelles. Pour des cavités plus longues (1 km), la dispersion chromatique perturbe cette relation de phase et la compression du gain du RSOA ne suffit plus à compenser ces variations [112]. En bande C, la fibre à compensation de dispersion rétablit une stabilité similaire à celle d'une cavité courte, confirmant l'effet de la dispersion chromatique [113]. Dans la pratique, l'ajout d'un SOA saturé placé juste avant le FRM ou d'un RSOA saturé, réduit les variations que le RSOA initial ne pouvait effacer seul. L'œil est plus ouvert et des distances plus grandes sont atteignables [100]. Une architecture dite en face à face développée par Orange consiste d'ailleurs à remplacer le FRM par un RSOA saturé après le démultiplexeur. En plus d'éliminer le nœud déporté, l'avantage de cette solution est que le signal prenne la forme des deux multiplexeurs, ce qui réduit la perte d'informations [95, 106]. En bande O, où la dispersion chromatique est plus faible, la taille de la cavité influe peu sur le BER [87]. Néanmoins le temps nécessaire pour atteindre le régime stationnaire continue de dépendre de la taille de la cavité, tant pour la bande O que la bande C et la bande L [83, 114]. Le régime permanent de la puissance est atteint après quelques allers-retours tandis que ceux du spectre et du BER ne s'en approchent qu'après plus d'une centaine d'allers-retours. Le temps d'allumage (temps mis pour que la puissance atteigne 95 % de sa valeur finale) pour une cavité de 5 km est d'environ 50 μ s, le temps d'extinction de l'ordre de 3 μ s quelle que soit la taille de la cavité [111]. Ces temps ne sont pas

compatibles avec le mode paquet ou *burst* dont la période est de 125 μ s. Ils sont en revanche appropriés avec le mode veille pour économiser de l'énergie.

1.3.4.3. Transmission

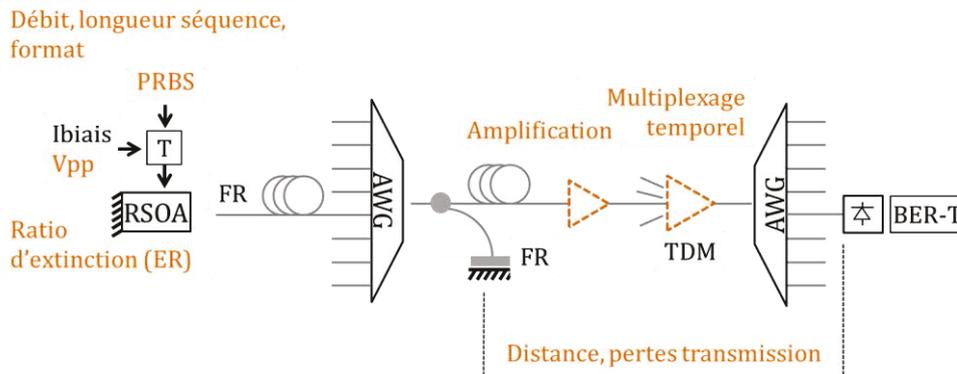


Figure 1.15- Schéma des principaux paramètres attrayants à l'architecture de la cavité.

Un dernier point à prendre en compte dans la compréhension de la cavité est la transmission. Le débit est un des paramètres les plus évidents. La longueur de la séquence PRBS l'est moins. Pourtant, le composant se comporte moins bien avec de longues séquences ($2^{31}-1$ par exemple), ce qui entraîne des pénalités voire un plancher d'erreur par rapport à une longueur de 2^7-1 [103, 115, 95]. Dans les réseaux d'accès, on se base sur le codage "8B/10B" qui correspond à des séquences de 2^7-1 . De plus, la sensibilité à la réception sera affectée un taux d'extinction trop faible mais la modulation du signal au taux d'extinction trop fort sera mal effacée et engendrera des interférences avec le signal à transmettre [103]. Contrairement à la littérature sur les RSOA injectés, le format de modulation reste généralement standard (OOK, NRZ, ...). Récemment une modulation en sous bandes de fréquences a introduit des formats plus complexes [94].

La littérature désormais fournie sur le sujet des cavités auto-alimentées, démontre la faisabilité de cette architecture bien que quelques aspects restent à ajuster avant de proposer une solution commerciale pour les futurs réseaux mobiles [116]. Entre 2012 et 2015, les performances en termes de débits et de distances de transmissions ont connu des progrès significatifs atteignant 10 Gbit/s et 80 km. Ces derniers sont le fruit d'optimisations à tous les niveaux de la cavité dont chaque détail est susceptible de perturber un fonctionnement délicat.

1.4. Cadre de la thèse

1.4.1. Position du III-V Lab

Grâce à son savoir-faire sur les composants à semi-conducteurs et de par ses multiples collaborations avec Orange, le III-V Lab contribue depuis plus d'une dizaine d'années au développement des architectures agnostiques en longueur d'onde basées sur des RSOA [37].

Ce composant initialement dérivé du SOA [117] dans les années 90, s'est considérablement développé dans les années 2000 en tant qu'émetteur bas-coût. C'est à cette période que le III-V Lab a produit les premiers RSOA dont la conception et la réalisation furent héritées de celles des SOA. En bande C, indépendants à la polarisation et à fort gain, les premiers RSOA du III-V Lab étaient simplement formés d'un ruban de zone active en matériaux massifs (*bulk*). Un traitement antireflets sur la facette

d'entrée/sortie et un *tilt* (angle) permirent de réduire les réflexions parasites, un adaptateur de mode améliora le couplage [118-120]. L'intérêt autour du RSOA comme alternative aux lasers standards grandit en même temps que les besoins dans les réseaux d'accès. C'est dans ce contexte qu'en 2008 Guilhem de Valicourt débuta sa thèse intitulée “ *Conception, fabrication et évaluation de modulateurs déportés pour les réseaux d'accès et radio sur fibre* ” dans le cadre du projet européen FUTON. Durant cette période, des RSOA à l'état de l'art furent conçus, offrant 30 dB de gain [121] et 3 GHz de bande passante [122]. Ces résultats furent réalisés grâce à de nouvelles structures au confinement optique plus faible et une longueur adaptée. L'introduction d'une seconde électrode diminua le *chirp* augmentant ainsi la distance de transmission jusqu'à 100 km [123].

Parallèlement à cette nouvelle génération de RSOA directement modulé, le contrôle de la polarisation dans les cavités auto-alimentées fut maîtrisé [80]. Ces deux avancées majeures aboutirent aux premières transmissions sans erreurs sur 50 km à 1,25 Gbit/s [124] qui marquèrent le début du projet européen ERMES.

1.4.2. ERMES & LAMPION

Débuté en septembre 2011 et financé pour trois ans par le programme européen FP7-ICT, ERMES signifie *Embedded Resonant and Modulable Self-tuning laser cavity for next generation access network transmitter*. Il rassemblait à l'origine cinq partenaires mais KIT et Alcatel-Lucent Italie se sont partiellement désengagés durant le projet. Le III-V Lab y assure la livraison de composants adaptés, ETH modélise la cavité, la réalisation d'un prototype et l'essai de terrain sont assurés par Orange et Polimi. Quantitativement, les objectifs initiaux étaient une modulation à 10 Gbit/s, une distance de transmission à 40 km et une longueur de cavité de 1 km.

PARTENAIRES	ROLE
Politecnico di Milano	Coordinateur, réalisation d'un prototype
III-V Lab	Développement de la puce active
Orange Lab	Définition des besoins, conduite des essais de terrain
ETH	Modélisation de la cavité et recommandations pour le composant

Table 1.8- Partenaires et objectifs du projet ERMES [125].

Simon Gebrewold et Marco Brunero ont effectué leur thèse dans le cadre d'ERMES, respectivement à ETH et Polimi. S. Gebrewold a principalement travaillé sur la modélisation de la cavité, M. Brunero sur le prototype de la cavité.

PARTENAIRES	ROLE
Orange Lab	Coordinateur, spécifications et évaluations système, intégration dans SFP
III-V Lab	Développement de RSOA adaptés
Ekinops	Spécifications et évaluations système, cartes de services
Xlim	Simulations, FEC
Foton	Modélisation

Table 1.9 – Partenaires et objectifs du projet LAMPION [126].

A l'issu de ce projet, III-V Lab et Orange Lab ont décidé de poursuivre leurs recherches dans le cadre du projet ANR LAMPION pour *Lambda based Access and Metropolitan Passive Optical Networks* débuté en octobre 2013. La finalité de ce projet consiste à produire une première version d'une solution commerciale. Conditionné dans un module SFP standard, le RSOA doit y opérer de préférence sans refroidissement afin de diminuer les coûts tout en présentant un débit de 10 Gbit/s sur 80 km. En plus de cet émetteur, la solution intègre aussi une carte de service et un code correcteur d'erreur (FEC) adaptés. Gaël Simon chez Orange Lab et Ao Li chez Xlim ont mené leur thèse respectivement sur le prototypage de la cavité et le développement d'un FEC.

Enfin, ce travail de thèse possède aussi quelques liens avec le projet européen COCONUT, clos en 2016, qui a exploré de nouvelles solutions pour les réseaux d'accès WDM PON ultra dense [127].

1.4.3. Ambitions de la thèse

L'axe de recherche principal de cette thèse est l'optimisation des cavités auto-alimentées en prenant pour sujet la puce active. La première génération de composants haut-débit, bas coûts et agnostiques en longueur d'onde a démontré la viabilité du système, le défi scientifique de cette thèse consiste à se diriger vers l'idéal d'une puce modulée à 10 Gbit/s émettant sur 80 km sans refroidissement et agnostique en longueur d'onde. Les problématiques autour de cette solution étaient encore ouvertes en 2013.

Comment augmenter la bande passante du RSOA, candidat idéal pour cette architecture, tout en conservant ses autres propriétés ? A contrario, comment augmenter les distances de transmissions en maintenant un débit élevé ? Comment gérer d'importants écarts de température ?

Ces considérations concrètes ne peuvent être résolues sans une compréhension fine des phénomènes physiques intrinsèques de la puce et plus généralement de la cavité. Même avant cela, il apparaît manifeste qu'une simple optimisation incrémentale du RSOA ne permettra pas d'atteindre la cible visée.

La démarche adoptée lors de cette thèse est décrite ci-dessous. Elle se décompose en quatre objectifs principaux : la compréhension des phénomènes physiques, la production d'une nouvelle génération de composants, l'évaluation de nos composants en cavité auto-alimentée et la valorisation de ces études. Pour mener à bien ces travaux, le III-V Lab dispose d'une expertise poussée sur toutes les étapes intermédiaires, notamment sur la simulation, les matériaux, la fabrication et la caractérisation. Dans le cadre des projets ERMES et LAMPION, nous avons pu nous appuyer sur les compétences en modélisation et évaluation système de nos partenaires.

OBJECTIFS	OBJECTIFS INTERMEDIAIRES	LIAISONS
Compréhension physique du RSOA & de la cavité	<ul style="list-style-type: none"> - Modélisation du composant - Modélisation de la cavité - Simulations matériau et optiques - Observations et comparaisons expérimentales 	<ul style="list-style-type: none"> - Thèse de S. Gebrewold (ETH) - -
Conception & Fabrication d'une nouvelle génération	<ul style="list-style-type: none"> - Simulations matériau et optiques - Etude et optimisation du procédé de fabrication - Ajout de composants élémentaires pour 1^{ière} caractérisation et comparaisons 	<ul style="list-style-type: none"> - - -
Intégration des composants à la cavité & évaluation	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation en cavité de la nouvelle génération - Caractérisations détaillées et comparaisons théoriques - Optimisation de composants existants et évaluation 	<ul style="list-style-type: none"> Thèse G. Simon (Orange) - -
Valorisation	<ul style="list-style-type: none"> - Participation à ERMES & LAMPION - Ajout de composants innovants au lot fabriqué - Participation à des projets complémentaires - Applications connexes (cavités externes, cavités intégrées sur silicium) 	<ul style="list-style-type: none"> - - COCONUT Externe et interne III-V Lab / Bell Labs

Table 1.10- Principaux objectifs de cette thèse et relations externes (appui, collaboration).

Conclusion du chapitre 1

Au cours de ce chapitre, nous avons pu saisir l'importance du composant dans les nouvelles architectures pour les réseaux d'accès.

La demande de solutions nouvelles est belle et bien présente tout comme la concurrence avec les lasers, composants plus génériques dont les performances sont établies. Les sauts technologique et de performances se doivent donc d'être conséquents : plus de débit, une portée non limitée, un faible coût et une faible consommation énergétique tout en présentant une installation et une maintenance simples.

Les premières recherches ont montré que le RSOA en cavité auto-alimentée était un bon candidat. Tant les paramètres d'architecture que des équipements pris individuellement ont été étudiés et optimisés. Dépasser les 10 Gbit/s ou les 40 km ne peut se faire sans solutions complémentaires (égalisation électronique, circuit de contrôle...), coûteuses et ajoutant de la complexité au système global.

Proposer un composant capable de répondre aux idéaux de rapidité, de puissance et de coût serait donc un différenciateur non négligeable dans la compétition aux nouveaux réseaux d'accès. Cette thèse vise à répondre à ces attentes, en exploitant les ressources propres au III-V Lab que sont la conception, la fabrication et la caractérisation des composants à semiconducteurs tout en s'inscrivant dans les projets ERMES et LAMPION en collaboration avec industriels et académiques.

Les prochains chapitres détaillent les possibilités et contraintes autour des composants bas coût, en particulier autour du RSOA adapté pour cavité auto-alimentée. Afin de comprendre les limites intrinsèques actuelles, nous entrerons dans la physique du composant via des rappels théoriques et des caractérisations croisées sur une grande diversité de RSOA. A l'aide de tous ces éléments, nous évaluerons les solutions les plus à même de répondre aux contraintes établies dans ce premier chapitre.

Bibliographie chapitre 1

- [1] The future X Network, a Bell Labs perspective, Marcus Weldon, CRC Press, 2016
- [2] White paper, Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2006-2020
- [3] Ward Van Heddeghem, Sofie Lambert, Bart Lannoo, Didier Colle, Mario Pickavet, Piet Demeester, Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012, *Computer Communications*, Volume 50, 1 September 2014, Pages 64-76, ISSN 0140-3664.
- [4] S. Gosselin, F. Saliou, F. Bourgart, E. Le Rouzic, S. Le Masson and A. Gati, "Energy consumption of ICT infrastructures: An operator's viewpoint," *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, Amsterdam, 2012, pp. 1-3. doi: 10.1364/ECEOC.2012.We.1.G.4
- [5] A. Pizzinat, P. Chanclou, F. Saliou and T. Diallo, "Things You Should Know About Fronthaul," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 1077-1083, March 1, 2015. doi: 10.1109/JLT.2014.2382872
- [6] T. Pfeiffer, "Next generation mobile fronthaul architectures," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015*, Los Angeles, CA, 2015, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2015.M2J.7
- [7] Enabling Cloud RAN with Mobile Fronthaul, Infinera application note, février 2016
- [8] 40 Gigabit capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements, Amendment 1, ITU-T, G.989.1, 08/2015
- [9] CPRI Specification v6.0 (2013-08-30)
- [10] M. H. Reeve, A. R. Hunwicks, W. Zhao, S. G. Methley, L. Bickers and S. Hornung, "LED spectral slicing for single-mode local loop applications," in *Electronics Letters*, vol. 24, no. 7, pp. 389-390, 31 March 1988. doi: 10.1049/el:19880263
- [11] M. Zirngibl, C. R. Doerr and L. W. Stulz, "Study of spectral slicing for local access applications," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 721-723, May 1996. doi: 10.1109/68.491607
- [12] J. S. Lee, Y. C. Chung and D. J. DiGiovanni, "Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multichannel WDM applications," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 12, pp. 1458-1461, Dec. 1993. doi: 10.1109/68.262573
- [13] S. L. Woodward, P. P. Iannone, K. C. Reichmann and N. J. Frigo, "A spectrally sliced PON employing Fabry-Perot lasers," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 9, pp. 1337-1339, Sept. 1998. doi: 10.1109/68.705635
- [14] M. Schell, D. Huhse, W. Utz, J. Kaessner, D. Bimberg and I. S. Tarasov, "Jitter and dynamics of self-seeded Fabry-Perot laser diodes," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 1, no. 2, pp. 528-534, Jun 1995. doi: 10.1109/2944.401238
- [15] M. D. Feuer *et al.*, "Single-port laser-amplifier modulators for local access," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 9, pp. 1175-1177, Sept. 1996. doi: 10.1109/68.531827
- [16] N. Buldawoo, S. Mottet, F. Le Gall, D. Sigogne, D. Meichenin and S. Chelles, "A semiconductor laser amplifier-reflector for the future FTTH applications," *Integrated Optics and Optical Fibre Communications, 11th International Conference on, and 23rd European Conference on Optical Communications (Conf. Publ. No.: 448)*, Edinburgh, 1997, pp. 196-199 vol.2. doi: 10.1049/cp:19971450
- [17] L. Y. Chan, C. K. Chan, T. K. Tong, S. Y. Cheung, F. Tong and L. K. Chen, "Demonstration of data remodulation for upstream traffic in WDM access networks using injection-locked FP laser as modulator," *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001. OFC 2001*, Anaheim, CA, 2001, pp. WU5-WU5. doi: 10.1109/OFC.2001.928408
- [18] Laser diode modulation and noise, K. Petermann, 1988, chapitre 7 (7.3.2)
- [19] Hyun Deok Kim, Seung-Goo Kang and Chang-Hee Le, "A low-cost WDM source with an ASE injected Fabry-Perot semiconductor laser," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, no. 8, pp. 1067-1069, Aug. 2000. doi: 10.1109/68.868010

- [20] K. Y. Park and C. H. Lee, "Intensity Noise in a Wavelength-Locked Fabry-Perot Laser Diode to a Spectrum Sliced ASE," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 44, no. 3, pp. 209-215, March 2008. doi: 10.1109/JQE.2007.911685
- [21] Y. S. Liao and G. R. Lin, "22-Channel Detuning Capacity of a Side-Mode Injection Locked FPLD for Directly Modulated 2.5Gbit/s DWDM-PON," *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. OFC/NFOEC 2007. Conference on*, Anaheim, CA, 2007, pp. 1-3. doi: 10.1109/OFC.2007.4348638
- [22] H. Kwon and S. Han, "Performance analysis of a wavelength-locked Fabry-Perot laser diode by light injection of an external spectrally sliced Fabry-Perot laser diode," *Appl. Opt.* 45, 6175-6179 (2006).
- [23] C. H. Yeh, C. W. Chow, Y. F. Wu, S. P. Huang, Y. L. Liu and C. L. Pan, "Performance of Long-Reach Passive Access Networks Using Injection-Locked Fabry-Perot Laser Diodes With Finite Front-Facet Reflectivities," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 12, pp. 1929-1934, June15, 2013. doi: 10.1109/JLT.2013.2254700
- [24] Ki-Man Choi, Jin-Serk Baik and Chang-Hee Lee, "Broad-band light source using mutually injected Fabry-Pe'rot laser diodes for WDM-PON," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2529-2531, Dec. 2005. doi: 10.1109/LPT.2005.859122
- [25] Q. T. Nguyen *et al.*, "Bidirectional 2.5-Gb/s WDM-PON Using FP-LDs Wavelength-Locked by a Multiple-Wavelength Seeding Source Based on a Mode-Locked Laser," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 11, pp. 733-735, June1, 2010. doi: 10.1109/LPT.2010.2044569
- [26] H. K. Lee, H. S. Cho, J. Y. Kim, S. H. Yoo and C. H. Lee, "A WDM-PON with an 80 Gb/s capacity based on wavelength-locked polarisation independent Fabry-Perot laser diode," *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Torino, 2010, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2010.5621175
- [27] G. R. Lin, H. L. Wang, G. C. Lin, Y. H. Huang, Y. H. Lin and T. K. Cheng, "Comparison on Injection-Locked Fabry-Perot Laser Diode With Front-Facet Reflectivity of 1% and 30% for Optical Data Transmission in WDM-PON System," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 14, pp. 2779-2785, July15, 2009. doi: 10.1109/JLT.2009.2016676
- [28] C. Yeh, F. Shih, C. Wang, C. Chow, and S. Chi, "Cost-effective wavelength-tunable fiber laser using self-seeding Fabry-Perot laser diode," *Opt. Express* 16, 435-439 (2008).
- [29] S. Hann, Tae-Young Kim and Chang-Soo Park, "Direct-modulated upstream signal transmission using a self-injection locked F-P LD for WDM-PON," *Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on*, Glasgow, 2005, pp. 451-452 vol.3. doi: 10.1049/cp:20050557
- [30] Y. C. Su, Y. C. Chi, H. Y. Chen and G. R. Lin, "Using Self-Feedback Controlled Colorless Fabry-Perot Laser Diode for Remote Control Free Single-Mode DWDM-PON Transmission," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 50, no. 8, pp. 658-668, Aug. 2014. doi: 10.1109/JQE.2014.2333662
- [31] Fu Yuan Shih, Chien Hung Yeh, Chi Wai Chow, Chia Hsuan Wang, Sien Chi, Utilization of self-injection Fabry-Perot laser diode for long-reach WDM-PON, *Optical Fiber Technology*, Volume 16, Issue 1, January 2010, Pages 46-49, ISSN 1068-5200, <http://dx.doi.org/10.1016/j.yofte.2009.10.001>.
- [32] Generation of tunable single-mode picosecond pulses from an AlGaAs semiconductor laser with grating feedback, Lundqvist, S. and Andersson, T. and Eng, S. T., *Applied Physics Letters*, 43, 715-717 (1983), DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.94487>
- [33] T. Komljenovic, D. Babic and Z. Sipus, "C and L band self-seeded WDM-PON links using injectionlocked Fabry-Pérot lasers and modulation averaging," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014*, San Francisco, CA, 2014, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2014.W3G.1
- [34] S. B. Park *et al.*, "Colorless Operation of WDM-PON Employing Uncooled Spectrum-Sliced Reflective Semiconductor Optical Amplifiers," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 248-250, Feb.15, 2007. doi: 10.1109/LPT.2007.891197
- [35] H. H. Lee *et al.*, "First commercial service of a colorless Gigabit WDM/TDM hybrid PON system," *Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*, San Diego, CA, 2009, pp. 1-3.

- [36] H. S. Shin et al., "Temperature Characteristics of a Wavelength-seeded Reflective SOA in WDM-PONs", *European Conference on Optical Communications, ECOC 2004*
- [37] F. Payoux, P. Chanclou, M. Moignard and R. Brenot, "Gigabit optical access using WDM PON based on spectrum slicing and reflective SOA," *Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on*, Glasgow, 2005, pp. 455-456 vol.3. doi: 10.1049/cp:20050559
- [38] I. Papagiannakis et al., "Investigation of 10-Gb/s RSOA-Based Upstream Transmission in WDM-PONs Utilizing Optical Filtering and Electronic Equalization," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 24, pp. 2168-2170, Dec.15, 2008. doi: 10.1109/LPT.2008.2007746
- [39] K. Y. Cho, Y. Takushima and Y. C. Chung, "10-Gb/s Operation of RSOA for WDM PON," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 18, pp. 1533-1535, Sept.15, 2008. doi: 10.1109/LPT.2008.928834
- [40] K. Y. Cho, A. Agata, Y. Takushima and Y. C. Chung, "FEC optimization for 10-Gb/s WDM PON implemented by using bandwidth-limited RSOA," *Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*, San Diego, CA, 2009, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2009.OMN5
- [41] M. Presi, A. Chiuchiarelli, R. Corsini, P. Choudury and E. Ciaramella, "Enhanced 10-Gb/s operation of bandwidth-limited R-SOAs without electronic equalization," *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, Amsterdam, 2012, pp. 1-3. doi: 10.1364/ECEOC.2012.We.1.B.2
- [42] K. Y. Cho, Y. Takushima and Y. C. Chung, "Demonstration of 11-Gb/s, 20-km reach WDM PON using directly-modulated RSOA with 4-ary PAM signal," *Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010 Conference on (OFC/NFOEC)*, San Diego, CA, 2010, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2010.OWG1
- [43] C. H. Yeh, C. W. Chow, H. Y. Chen and Y. F. Wu, "10-Gbps OFDM upstream rate by using RSOA-ONU with seeding-light for 75 km long-reach PON access," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Los Angeles, CA, 2012, pp. 1-3.
- [44] S. P. Jung, Y. Takushima, K. Y. Cho, S. J. Park and Y. C. Chung, "Demonstration of RSOA-based WDM PON employing self-homodyne receiver with high reflection tolerance," *Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*, San Diego, CA, 2009, pp. 1-3. doi: 10.1364/NFOEC.2009.JWA69
- [45] K. Y. Cho and Y. C. Chung, "10-Gb/s operation of RSOA for WDM PON using return-to-zero modulation format," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Los Angeles, CA, 2012, pp. 1-3.
- [46] T. Duong, N. Genay, P. Chanclou, B. Charbonnier, A. Pizzinat and R. Brenot, "Experimental demonstration of 10 Gbit/s upstream transmission by remote modulation of 1 GHz RSOA using Adaptively Modulated Optical OFDM for WDM-PON single fiber architecture," *2008 34th European Conference on Optical Communication*, Brussels, 2008, pp. 1-2. doi: 10.1109/ECOC.2008.4729576
- [47] S. P. Jung, Y. Takushima and Y. C. Chung, "Generation of 5-Gbps QPSK signal using directly modulated RSOA for 100-km coherent WDM PON," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Los Angeles, CA, 2011, pp. 1-3.
- [48] K. Y. Cho, B. S. Choi, Y. Takushima and Y. C. Chung, "25.78-Gb/s Operation of RSOA for Next-Generation Optical Access Networks," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 8, pp. 495-497, April 15, 2011. doi: 10.1109/LPT.2011.2112759
- [49] M. Presi et al., "25 Gb/s operation of 1-GHz bandwidth R-SOA by using DMT and optical equalization," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013*, Anaheim, CA, 2013, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2013.OW1A.7
- [50] S. H. Shin et al., "16 /spl times/ 1.25 Gbit/s WDM-PON based on ASE-injected R-SOAs in 60/spl deg/C temperature range," *2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Anaheim, CA, 2006, pp. 3 pp.-.doi: 10.1109/OFC.2006.215350

- [51] P. Chanclou *et al.*, "Demonstration of RSOA-based remote modulation at 2.5 and 5 Gbit/s for WDM PON," *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. OFC/NFOEC 2007. Conference on*, Anaheim, CA, 2007, pp. 1-3. doi: 10.1109/OFC.2007.4348854
- [52] E. Conforti, C. M. Gallep, S. H. Ho, A. C. Bordonalli and Sung-Mo Kang, "Carrier reuse with gain compression and feed-forward semiconductor optical amplifiers," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 1, pp. 77-81, Jan 2002. doi: 10.1109/22.981250
- [53] H. Takesue and T. Sugie, "Wavelength channel data rewrite using saturated SOA modulator for WDM networks with centralized light sources," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 11, pp. 2546-2556, Nov. 2003. doi: 10.1109/JLT.2003.819532
- [54] Wooram Lee *et al.*, "Bidirectional WDM-PON based on gain-saturated reflective semiconductor optical amplifiers," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 11, pp. 2460-2462, Nov. 2005. doi: 10.1109/LPT.2005.858148
- [55] J. J. Koponen and M. J. Soderlund, "A duplex WDM passive optical network with 1:16 power split using reflective SOA remodulator at ONU," *Optical Fiber Communication Conference, 2004. OFC 2004*, Los Angeles, CA, USA, 2004, pp. 298-.
- [56] N. S. Ribeiro, C. M. Gallep and E. Conforti, "Limits on High Bit Rate Wavelength Reuse Using Ultralong Semiconductor Optical Amplifier," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 20, pp. 3229-3236, Oct.15, 2013. doi: 10.1109/JLT.2013.2280118
- [57] M. Presi, A. Chiuchiarelli, G. Contestabile, E. Ciaramella and L. Giorgi, "Modulation format transparent subcarrier reuse by feed forward current injection in a reflective SOA," *Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*, San Diego, CA, 2009, pp. 1-3. doi: 10.1364/NFOEC.2009.JWA71
- [58] J. M. Kang, S. H. Lee, H. C. Kwon and S. K. Han, "WDM-PON with Broadcasting Function Using Direct ASE Modulation of Reflective SOA," *2006 European Conference on Optical Communications*, Cannes, France, 2006, pp. 1-2. doi: 10.1109/ECOC.2006.4801353
- [59] Z. Al-Qazwini and H. Kim, "Symmetric 10-Gb/s WDM-PON Using Directly Modulated Lasers for Downlink and RSOAs for Uplink," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 12, pp. 1891-1899, June15, 2012. doi: 10.1109/JLT.2012.2190975
- [60] J. Prat, C. Arellano, V. Polo and C. Bock, "Optical network unit based on a bidirectional reflective semiconductor optical amplifier for fiber-to-the-home networks," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 250-252, Jan. 2005. doi: 10.1109/LPT.2004.837487
- [61] J. Prat, V. Polo, C. Bock, C. Arellano and J. J. V. Olmos, "Full-duplex single fiber transmission using FSK downstream and IM remote upstream Modulations for fiber-to-the-home," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 702-704, March 2005. doi: 10.1109/LPT.2004.840930
- [62] M. Omella, I. Papagiannakis, B. Schrenk, D. Klonidis, J. A. Lázaro, A. N. Birbas, J. Kikidis, J. Prat, and I. Tomkos, "10 Gb/s full-duplex bidirectional transmission with RSOA-based ONU using detuned optical filtering and decision feedback equalization," *Opt. Express* **17**, 5008-5013 (2009)
- [63] Q. Guo and A. V. Tran, "Wavelength-reused WDM access network supporting 40 Gb/s downlink and 10 Gb/s uplink," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013*, Anaheim, CA, 2013, pp. 1-3.
- [64] C. Kazmierski *et al.*, "100 Gb/s operation of an AlGaInAs semi-insulating buried heterojunction EML," *Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*, San Diego, CA, 2009, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2009.OTThT7
- [65] E. K. MacHale, G. Talli, C. W. Chow and P. D. Townsend, "Reduction of Signal-Induced Rayleigh Noise in a 10Gb/s WDM-PON using a Gain-Saturated SOA," *Optical Communication (ECOC), 2007 33rd European Conference and Exhibition of*, Berlin, Germany, 2007, pp. 1-2.

- [66] A. Naughton, G. Talli, S. Porto, C. Antony, P. Ossieur and P. D. Townsend, "Design Optimization of R-EAM-SOA for Long-Reach Carrier-Distributed Passive Optical Networks," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 22, pp. 4386-4392, Nov.15, 15 2014. doi: 10.1109/JLT.2014.2357183
- [67] G. Talli, A. Naughton, S. Porto, C. Antony, P. Ossieur and P. D. Townsend, "Advantageous Effects of Gain Saturation in Semiconductor Optical Amplifier-Based Integrated Reflective Modulators," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 392-401, Feb.1, 2014. doi: 10.1109/JLT.2013.2293712
- [68] E. K. MacHale *et al.*, "Extended-reach PON employing 10Gb/s integrated reflective EAM-SOA," *2008 34th European Conference on Optical Communication*, Brussels, Belgium, 2008, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2008.4729416
- [69] A. Garreau *et al.*, "10Gbit/s Amplified Reflective Electroabsorption Modulator for Colourless Access Networks," *2006 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings*, 2006, pp. 168-170. doi: 10.1109/ICIPRM.2006.1634139
- [70] D. C. Kim, H. S. Kim, K. S. Kim, B. S. Choi, J. S. Jeong and O. K. Kwon, "10 Gbps SOA-REAM using monolithic integration of planar buried-heterostructure SOA with deep-ridge waveguide EA modulator for colourless optical source in WDM-PON," *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Geneva, 2011, pp. 1-3.
- [71] N. Dupuis *et al.*, "10 Gbit/s Semi-Insulating Buried Heterostructure Loss-less Reflective Amplified Modulator for Wavelength Agnostic Networks," *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on*, San Diego, CA, 2008, pp. 1-3. doi: 10.1109/OFC.2008.4528436
- [72] X. Zhou and N. Deng, "A 25-Gb/s 20-km wavelength reused WDM system for mobile fronthaul applications," *Optical Communication (ECOC), 2015 European Conference on*, Valencia, 2015, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2015.7341998
- [73] Q. Guo and A. V. Tran, "40 Gb/s operation of SOA-REAM in single-feeder WDM-PON [Invited]," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 4, no. 11, pp. B77-B84, Nov. 2012. doi: 10.1364/JOCN.4.000B77
- [74] E. Wong, K. L. Lee and T. B. Anderson, "Directly Modulated Self-Seeding Reflective Semiconductor Optical Amplifiers as Colorless Transmitters in Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Networks," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 67-74, Jan. 2007. doi: 10.1109/JLT.2006.888936
- [75] . Presi, A. Chiuchiarelli, R. Corsini and E. Ciaramella, "Uncooled and Polarization Independent Operation of Self-Seeded Fabry-Pérot Lasers for WDM-PONs," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 17, pp. 1523-1526, Sept.1, 2012. doi: 10.1109/LPT.2012.2207886
- [76] E. Wong, K. L. Lee and T. Anderson, "Low-cost WDM passive optical network with directly-modulated self-seeding reflective SOA," in *Electronics Letters*, vol. 42, no. 5, pp. 299-301, 2 March 2006. doi: 10.1049/el:20060097
- [77] J. M. Kang, T. Y. Kim, I. H. Choi, S. H. Lee and S. K. Han, "Self-seeded reflective semiconductor optical amplifier based optical transmitter for up-stream WDM-PON link," in *IET Optoelectronics*, vol. 1, no. 2, pp. 77-81, April 2007. doi: 10.1049/iet-opt:20050116
- [78] N. Nadarajah, K. L. Lee and A. Nirmalathas, "Upstream Access and Local Area Networking in Passive Optical Networks Using Self-Seeded Reflective Semiconductor Optical Amplifier," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 19, pp. 1559-1561, Oct.1, 2007. doi: 10.1109/LPT.2007.90385
- [79] L. Marazzi, P. Parolari, G. de Valicourt and M. Martinelli, "Network-embedded self-tuning cavity for WDM-PON transmitter," *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Geneva, 2011, pp. 1-3.
- [80] M. Presi and E. Ciaramella, "Stable self-seeding of Reflective-SOAs for WDM-PONs," in *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper OMP4.
- [81] T. Komljenovic, D. Babic, and Z. Sipus, "Extended Cavity Light Source Using Modulation-Averaging Reflectors for WDM-PON," in *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2012), paper We.1.B.5.

- [82] N. Cheng, Z. Xu, H. Lin and D. Liu, "20Gb/s hybrid TDM/WDM PONs with 512-split using self-seeded reflective semiconductor optical amplifiers," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Los Angeles, CA, 2012, pp. 1-3.
- [83] F. Saliou *et al.*, "Up to 15km cavity self seeded WDM-PON system with 90km maximum reach and up to 4.9Gbit/s CPRI links," *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, Amsterdam, 2012, pp. 1-3. doi: 10.1364/ECEOC.2012.We.1.B.6
- [84] Q. Deniel, F. Saliou, L. Anet Neto, N. Genay, B. Charbonnier, D. Erasme, and P. Chanclou, "Up to 10 Gbit/s transmission in WDM-PON architecture using External Cavity Laser based on Self-Tuning ONU," in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2012), paper JTh2A.55.
- [85] S. D. Le, Q. Deniel, F. Saliou, A. Lebreton and P. Chanclou, "16x2.5 Gbit/s and 5 Gbit/s WDM PON based on self-seeded RSOA," *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Cartagena, 2013, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICTON.2013.6602922
- [86] L. Marazzi *et al.*, "Up to 10.7-Gb/s High-PDG RSOA-Based Colorless Transmitter for WDM Networks," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 7, pp. 637-640, April1, 2013. doi: 10.1109/LPT.2013.2243138
- [87] P. Parolari, L. Marazzi, M. Brunero, M. Martinelli, A. Maho, S. Barbet, F. Lelarge, R. Brenot, G. Gavioli, G. Simon, F. Saliou, Q. Deniel, and P. Chanclou, "Operation of a RSOA WDM PON Self-seeded Transmitter Over More than 50 km of SSMF up to 10 Gb/s," in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper W3G.4.
- [88] P. Parolari *et al.*, "10-Gb/s Operation of a Colorless Self-Seeded Transmitter Over More Than 70 km of SSMF," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 6, pp. 599-602, March15, 2014. doi: 10.1109/LPT.2014.2301192
- [89] P. Parolari, L. Marazzi, M. Brunero, A. Gatto, M. Martinelli, P. Chanclou, Q. Deniel, F. Saliou, Sy Dat Le, R. Brenot, S. Barbet, F. Lelarge, S. Gebrewold, S. O'Duill, D. Hillerkuss, J. Leuthold, G. Gavioli, P. Galli, Self-tuning transmitter for fibre-to-the-antenna PON networks, *Optical Switching and Networking*, Volume 14, Part 1, August 2014, Pages 25-31, ISSN 1573-4277, <http://dx.doi.org/10.1016/j.osn.2014.01.008>.
- [90] G. Simon, F. Saliou, P. Chanclou, Q. Deniel, D. Erasme and R. Brenot, "70km external cavity DWDM sources based on O-band self seeded RSOAs for transmissions at 2.5Gbit/s," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014*, San Francisco, CA, 2014, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2014.W3G.5
- [91] S. D. Le, A. Lebreton, F. Saliou, Q. Deniel, B. Charbonier and P. Chanclou, "Up to 60 km bidirectional transmission of a 16 channels x 10 Gb/s FDM-WDM PON based on self-seeded reflective semiconductor optical amplifiers," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014*, San Francisco, CA, 2014, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2014.Th3G.8
- [92] U. R. Duarte, J. B. Rosolem, R. S. Penze and M. A. Romero, "Analysis of ASE-related impairments on wavelength-reuse WDM-PONs based on self-seeded reflective SOAs," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, no. 9, pp. 773-781, Sept. 2014. doi: 10.1364/JOCN.6.000773
- [93] P. Parolari *et al.*, "C- and O-band operation of RSOA WDM PON self-seeded transmitters up to 10 Gb/s [Invited]," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 2, pp. A249-A255, February 1 2015. doi: 10.1364/JOCN.7.00A249
- [94] .Gatto, M. Brunero, P. Parolari, P. Martelli, R. Brenot and P. Boffi, "O-band 12-Gb/s FDM-WDM PON transmission exploiting self-seeding in reflective semiconductor optical amplifiers," *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Budapest, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICTON.2015.7193397
- [95] F. Saliou *et al.*, "125-km Long Cavity Based on Self-Seeded RSOAs Colorless Sources for 2.5-Gb/s DWDM Networks," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 8, pp. 1602-1607, April15, 15 2015. doi: 10.1109/JLT.2014.2384397
- [96] M. Brunero *et al.*, "WDM PON RSOA-based self-tuning transmitters: An insight from the EU FP7 ERMES project," *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Budapest, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICTON.2015.7193396

- [97] Y. Ma *et al.*, "Demonstration of CPRI over self-seeded WDM-PON in commercial LTE environment," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015*, Los Angeles, CA, 2015, pp. 1-3.
- [98] W. Zhan, T. Tanemura, S. Yamauchi, M. Mukaikubo and Y. Nakano, "Uncooled (25–50 °C) operation of self-seeded RSOA for low-cost colorless WDM-PON transmitter," *Optical Communication (ECOC), 2015 European Conference on*, Valencia, 2015, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2015.7341972
- [99] J. Prat, B. Schrenk, F. Bonada, G. de Valicourt, J. A. Lazaro and R. Brenot, "Extension of self-seeding to 10/2.5Gb/s T(W)DM PONs through remotely pumped ODN extenders," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015*, Los Angeles, CA, 2015, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2015.Th2A.57
- [100] Q. Deniel, F. Saliou, S. D. Le, P. Chanclou, D. Erasme and R. Brenot, "Amplified RSOA self-tuning laser for WDM PON using saturated SOA for noise reduction and data cancellation," *Optical Communication (ECOC 2013), 39th European Conference and Exhibition on*, London, 2013, pp. 1-3. doi: 10.1049/cp.2013.1407
- [101] M. L. Deng *et al.*, "Intra-Cavity Chromatic Dispersion Impacts on 10-Gb/s Optical OFDM Transmissions Over 25-km Dual-RSOA-Based Self-Seeded PON Systems," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 1-12, Feb. 2015. doi: 10.1109/JPHOT.2014.2381636
- [102] M. Martinelli, L. Marazzi, P. Parolari, M. Brunero and G. Gavioli, "Polarization in Retracing Circuits for WDM-PON," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 14, pp. 1191-1193, July 15, 2012. doi: 10.1109/LPT.2012.2199296
- [103] F. Xiong, W. D. Zhong, M. Zhu, H. Kim, Z. Xu and D. Liu, "Characterization of Directly Modulated Self-Seeded Reflective Semiconductor Optical Amplifiers Utilized as Colorless Transmitters in WDM-PONs," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 11, pp. 1727-1733, June 1, 2013. doi: 10.1109/JLT.2013.2257684
- [104] Yiran Ma, Dekun Liu, Jingwen Yu, and Xiaomu Wang, "System evaluation of economic 16/32chs 1.25Gbps WDM-PON with self-seeded RSOA," *Opt. Express* 20, 22523-22530 (2012).
- [105] Gebrewold, S.; Bonjour, R.; Barbet, S.; Maho, A.; Brenot, R.; Chanclou, P.; Brunero, M.; Marazzi, L.; Parolari, P.; Totovic, A.; Gvozdic, D.; Hillerkuss, D.; Hafner, C.; Leuthold, J. Self-Seeded RSOA-Fiber Cavity Lasers vs. ASE Spectrum-Sliced or Externally Seeded Transmitters—A Comparative Study. *Appl. Sci.* 2015, 5(4), 1922-1941; doi:10.3390/app5041922.
- [106] G. Simon, F. Saliou, P. Chanclou and R. Brenot, "Infrastructure impact on transmission performances of self seeded DWDM colorless sources at 2.5Gbps," *2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Cannes, 2014, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2014.6964061
- [107] F. Saliou, S. Dat Le, Q. Deniel and P. Chanclou, "Reach extension of RSOA-self seeded transmitters for DWDM metropolitan networks with a single EDFA," *Optical Communication (ECOC 2013), 39th European Conference and Exhibition on*, London, 2013, pp. 1-3. doi: 10.1049/cp.2013.1379
- [108] Y. F. Wu, C. H. Yeh, C. W. Chow, J. Y. Sung and J. H. Chen, "Stable and Wavelength-Tunable Self-Injected Reflective Semiconductor Optical Amplifier-Based Fiber Laser," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 1-7, Aug. 2015. doi: 10.1109/JPHOT.2015.2445098
- [109] S. Ó Dúill, L. Marazzi, P. Parolari, R. Brenot, C. Koos, W. Freude, and J. Leuthold, "Efficient modulation cancellation using reflective SOAs," *Opt. Express* 20, B587-B594 (2012)
- [110] R. Brenot *et al.*, "Evidence of gain modulation in km-long lasers," *ISLC 2012 International Semiconductor Laser Conference*, San Diego, CA, 2012, pp. 108-109. doi: 10.1109/ISLC.2012.6348351
- [111] Q. Deniel, F. Saliou, P. Chanclou and D. Erasme, "Self-seeded RSOA based WDM-PON transmission capacities," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013*, Anaheim, CA, 2013, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2013.OW4D.3
- [112] M. L. Deng *et al.*, "Intra-cavity dispersion-induced performance degradations of dual-RSOA-based self-seeded PON systems," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015*, Los Angeles, CA, 2015, pp. 1-3.

- [113] S. A. Gebrewold *et al.*, "Reflective-SOA Fiber Cavity Laser as Directly Modulated WDM-PON Colorless Transmitter," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 503-511, Sept.-Oct. 2014. doi: 10.1109/JSTQE.2014.2307314
- [114] M. Brunero, P. Parolari, L. Marazzi, R. Brenot and M. Martinelli, "Build-up and burst-mode of an O-band RSOA-based self-seeded transmitter," *Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies, 2015*, Turin, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2015.0117
- [115] U. R. Duarte, R. S. Penze, F. R. Pereira, F. F. Padela, J. B. Rosolem and M. A. Romero, "Combined Self-Seeding and Carrier Remodulation Scheme for WDM-PON," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 8, pp. 1323-1330, April 15, 2013. doi: 10.1109/JLT.2013.2248076
- [116] T. diallo; A. Pizzinat; F. Saliou; P. Chancelou; G. Simon; C. Aupetit-Berthelemot, "Self-Seeded DWDM Solution for Fronthaul Links in Centralized-Radio Access Network," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1 doi: 10.1109/JLT.2016.2588
- [117] N. A. Olsson, M. G. Oberg, L. D. Tzeng and T. Cella, "Ultra-low reflectivity 1.5 μ m semiconductor laser preamplifier," in *Electronics Letters*, vol. 24, no. 9, pp. 569-570, 28 April 1988. doi: 10.1049/el:19880387
- [118] P. Doussiere *et al.*, "1.55 μ m /spl mu/m polarisation independent semiconductor optical amplifier with 25 dB fiber to fiber gain," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 170-172, Feb. 1994. doi: 10.1109/68.275418
- [119] J. Y. Emery *et al.*, "New, process tolerant, high performance 1.55 μ m polarization insensitive semiconductor optical amplifier based on low tensile bulk GaInAsP," *Optical Communication, 1996. ECOC '96. 22nd European Conference on*, Oslo, Norway, 1996, pp. 165-168 vol.3.
- [120] R. Brenot *et al.*, "High modulation bandwidth reflective SOA for optical access networks," *Optical Communication (ECOC), 2007 33rd European Conference and Exhibition of*, Berlin, Germany, 2007, pp. 1-2. doi: 10.1049/ic:20070372
- [121] G. de Valicourt *et al.*, "High Gain (30 dB) and High Saturation Power (11 dBm) RSOA Devices as Colorless ONU Sources in Long-Reach Hybrid WDM/TDM-PON Architecture," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 3, pp. 191-193, Feb. 1, 2010. doi: 10.1109/LPT.2009.203817
- [122] G. de Valicourt, D. Make, C. Fortin, A. Enard, F. Van Dijk and R. Brenot, "10 Gbit/s modulation of Reflective SOA without any electronic processing," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Los Angeles, CA, 2011, pp. 1-3.
- [123] G. de Valicourt *et al.*, "First 100 km uplink transmission at 2.5 Gbit/s for hybrid WDM/TDM PON based on optimized bi-electrode RSOA," *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Torino, 2010, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2010.5621160
- [124] L. Marazzi, P. Parolari, R. Brenot, G. de Valicourt, and M. Martinelli, "Network-embedded self-tuning cavity for WDM-PON transmitter," *Opt. Express* 20, 3781-3786 (2012)
- [125] <http://ermes-project.eu>
- [126] <http://www.anr-lampion.fr/>
- [127] <http://www.ict-coconut.eu/>

CHAPITRE 2

ELABORATION DE SOURCES DIRECTEMENT MODULEES POUR LES NOUVEAUX RESEAUX D'ACCES

Nous l'avons vu dans le premier chapitre, le besoin de composants adaptés aux exigences des nouveaux réseaux est croissant. Des produits commerciaux sont disponibles sur le marché, ils sont génériques et suffisants pour des preuves de concept. Ils se retrouvent en revanche caducs lorsqu'il s'agit d'atteindre des performances à l'état de l'art que seul un développement spécifique peut laisser espérer. La thématique des RSOA directement modulés est apparue récemment. Transmettre plus loin à un débit plus élevé, telle est la ligne directrice actuelle. Pour ce faire, fabrication et conception sont étroitement liées, la fabrication déterminant les propriétés même du composant.

Dans cette thèse, nous avons donc exploré plusieurs possibilités pour augmenter les performances du RSOA. Nous nous sommes basés sur l'héritage des technologies laser et SOA tout en gardant à l'esprit des exigences de coût, de rendement, de fiabilité, de flexibilité et de robustesse. Ces impératifs sont essentiels pour assurer la viabilité de cette solution et plus largement la valorisation des composants.

Nous présenterons tout d'abord des généralités sur les composants étudiés ainsi que sur les principales étapes de fabrication afin de distinguer ce qui est acquis de ce qui relève du développement. Puis nous évaluerons les caractéristiques essentielles d'une source d'ASE placée en cavité auto-alimentée avant de concevoir des composants plus spécifiques. Enfin, nous introduirons les optimisations apportées au procédé de fabrication.

2.1. Généralités sur les composants étudiés

Savoir-faire propre à chaque laboratoire, la fabrication est une connaissance protégée et peu publiée. Dans ce domaine, le III-V Lab occupe une place privilégiée puisqu'elle contrôle toutes les étapes du cycle de vie d'une plaque (figure 2.1).



Figure 2.1- Cycle de vie d'un composant.

Le matériau, déposé par croissance épitaxiale, confère au composant la plupart de ses propriétés: gain, dépendance à la polarisation, plage de longueur d'onde... La fabrication qui suit consiste à le façonner

de manière à guider la lumière et injecter efficacement un courant électrique. Enfin le montage habille le composant brut pour faciliter son intégration dans un système plus complet.

2.1.1. Principes physiques élémentaires

2.1.1.1. Structure épitaxiale

Une première croissance épitaxiale intervient au début du cycle de vie du RSOA pour définir les couches qui le constituent et en particulier la zone active. Elle est traditionnellement dans un quaternaire InGaAsP d'énergie de bande interdite, *gap*, 0,8 eV ou 1,55 μm entourée de deux couches de confinement dans le même quaternaire mais de bande interdite plus large (environ 1,1 eV) pour améliorer le confinement électronique. Les couches intermédiaires, en marron sur la figure 2.2, sont en InP (*gap* de 1,34 eV).

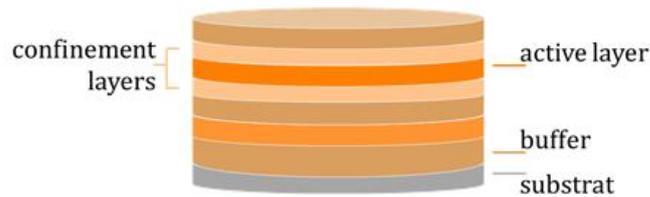


Figure 2.2- Exemple d'une structure épitaxiée.

Deux approches de SOA sensiblement différentes furent développées dans les années 1990 par les chercheurs du CNET d'une part et d'Alcatel Alsthom Recherche d'autre part, laboratoires qui se rejoignirent quelques années plus tard et desquels le III-V Lab hérita le savoir-faire. Les premiers développèrent une couche active en multi-puits quantiques (*Multi Quantum Well*, MQW) [1, 55] tandis que les seconds préférèrent un matériau massif, *bulk* [50]. Si la structure en MQW s'est imposée dans les technologies laser, les RSOA standards du III-V Lab furent fabriqués en matériau massif [60, 64].

Un puits quantique se distingue d'un matériau massif par son épaisseur de quelques nanomètres réduisant la structure à deux dimensions (figure 2.3(a)). Les niveaux d'énergies sont alors quantifiés et dépendent, entre autres, de l'épaisseur de la couche. Les structures multi-puits quantiques sont obtenues en alternant ces puits avec des barrières de *gap* plus élevé. En améliorant le gain, des courants de transparence plus faibles et une moindre sensibilité à la température sont attendus. Tout comme pour un matériau massif, le contrôle de la dépendance à la polarisation du gain s'effectue en introduisant des contraintes selon que le paramètre de maille du matériau soit plus ou moins grand que celui du substrat. En introduisant des contraintes dites en compression (maille plus large) ou en tension (maille plus étroite), on lève la dégénérescence des trous lourds (*heavy holes*, HH) et des trous légers (*light holes*, LH) (figure 2.3(b)). Or une transition d'un état excité vers la bande de trous légers entraîne majoritairement de l'émission TM (Transverse Magnétique) et un peu d'émission TE (Transverse Electrique) tandis qu'une transition vers les trous lourds entraîne seulement de l'émission TE. La dépendance à la polarisation du composant s'obtient donc en ajustant les contraintes et le nombre de puits et barrières dans la zone active.

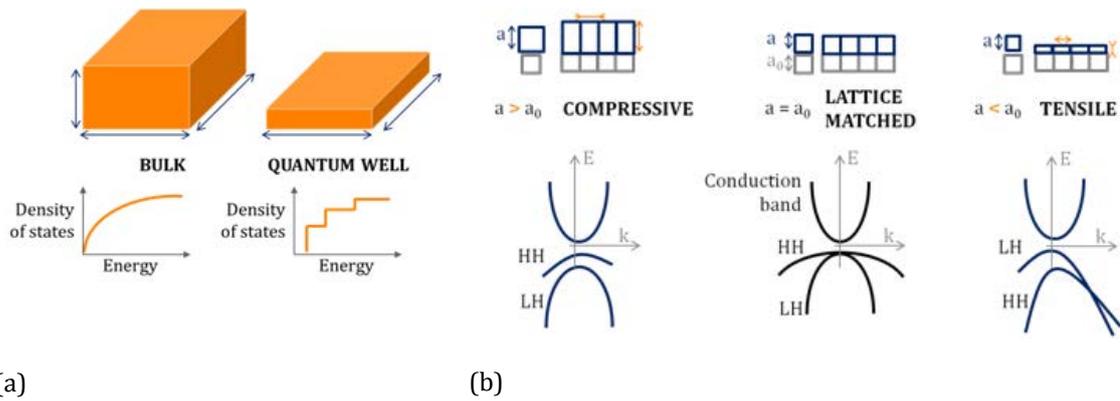


Figure 2.3- (a) Comparaison entre matériau massif et puits quantique (d'après [2]) et (b) effet des contraintes sur le diagramme de bandes (d'après [3]). HH: *Heavy holes*, LH: *light holes*.

Les quatre paramètres importants lors de la conception d'une structure épitaxiale MQW sont:

- le gap du matériau ;
- la contrainte des puits et des barrières ;
- leur épaisseur ;
- leur nombre.

Ils entraînent un plus ou moins bon confinement des trous et des porteurs respectivement dans la bande de valence et la bande de conduction. Un bon confinement est essentiel. Il évite les fuites à travers la jonction via les phénomènes de dérive et de diffusion et est gage de bonne tenue en température. Des logiciels de simulation basés sur la théorie des bandes et des méthodes de calculs kp ont été élaborés au III-V Lab. Ils donnent non seulement une évaluation des niveaux d'énergie (et donc de la qualité de la structure) mais aussi une première approximation du pourcentage des éléments III (Al, Ga, In) et des éléments V (As, P) requis.

Une fois ces valeurs fixées, des calibrations successives ont lieu pour régler le flux de chaque source et obtenir le bon rapport. Il existe deux types d'épitaxie au III-V Lab: l'épitaxie par jets moléculaires à sources gazeuses (*Gas Source Molecular Beam Epitaxy*, GSMBE) et l'épitaxie en phase vapeur aux organo-métalliques (*Metalorganic Vapour Phase Epitaxy*, MOVPE). En GSMBE, les croissances se font dans des conditions d'ultra vide, le dépôt est généralement plus lent et la température plus faible qu'en MOVPE.

La mesure de photoluminescence après croissance donne accès aux transitions dans le matériau. Les couches sont déposées avec une précision équivalente à celle d'une couche atomique. Ces valeurs sont généralement uniformes sur toute la surface de la plaque. En termes d'épaisseur, les écarts maximaux sont inférieurs au nanomètre et de 3 nm en pic de photoluminescence. Ces chiffres sont à modérer en fonction de l'épaisseur totale de la couche déposée.

2.1.1.2. Confinement opto-électronique

En plus d'assurer un confinement électronique, les couches épitaxiées confinent verticalement le mode optique. Il s'agit d'un guidage par contraste d'indice, le mode préférant se propager dans la direction de plus fort indice. Le confinement latéral est apporté par la gravure de la structure sous forme de ruban, qu'il soit profond (*deep ridge*), peu profond (*shallow ridge*) ou enterré (*buried*). Dans cette thèse, nous ne travaillerons qu'avec des structures enterrées car elles présentent une meilleure dissipation thermique, sont plus robustes et le mode y est plus circulaire ce qui facilite le couplage avec la fibre. Elles imposent néanmoins une seconde croissance épitaxiale.

La conception de guides optimisés est une pratique courante dans les laboratoires d'optoélectronique. Le logiciel commercial *Fimmwave* [4] utilisé au III-V Lab calcule, par exemple, les modes optiques d'une structure à partir des indices des différentes couches, de leur épaisseur et de leur largeur. Dans le cas de nos RSOA, on s'attachera à déterminer le confinement du mode dans la zone active mais aussi dans les autres couches. En effet, le gain matériau étant apporté par les puits, plus le mode y sera confiné (proportionnellement à la puissance totale), plus le gain modal sera grand. *A contrario*, certaines autres couches peuvent provoquer des pertes de propagation. La taille du mode sera aussi évaluée pour limiter les pertes de couplages en sortie de composant. L'élément clef dans de telles simulations est la bonne estimation des indices optiques qui dépendent de plusieurs paramètres tels que la stœchiométrie des éléments III et V, le gap du matériau, les contraintes, la densité de porteurs chargés négativement... La plupart de ceux utilisés au laboratoire sont connus mais l'introduction de nuances, de fait, les modifie.

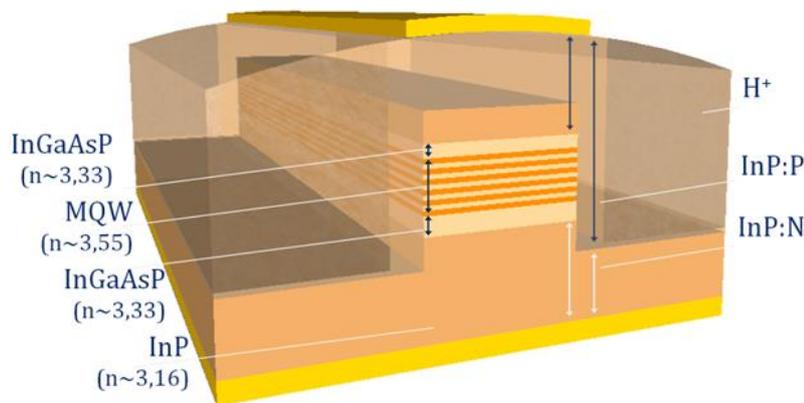


Figure 2.4- Confinements optique et électronique dans une structure MQW.

La structure épitaxiale apporte le gain matériau, le ruban guide l'onde le long du composant. Le dernier aspect indispensable est une injection efficace de porteurs. Dans les structures enterrées, le principal écueil sont les fuites latérales de courant. Historiquement, le matériau InP qui a servi pour enterrer le ruban est isolé électriquement par implantation de protons, c'est la technique BRS (*Buried Ridge Structure*). Une zone non implantée subsiste toutefois au bord du ruban. Cette jonction entre InP dopé p et InP dopé n entraîne une capacité parasite qui diminue la bande passante de modulation. Une parade repose sur une recroissance en deux temps où on dépose un matériau semi-isolant avant la reprise d'InP dopé p. Cette technique est appelée SIBH pour *Semi-Insulating Buried Heterostructure*. Couramment employée par Fujitsu Laboratories puis Oclaro, tant pour les lasers [5] que pour les SOA [45], le III-V Lab a approfondi cette technique durant les thèses de S. Gouraud (de 2002 à 2005) [6] et d'O. Patard (de 2009 à 2012) [7]. Les autres laboratoires dont l'activité porte sur les (R)SOA ont plutôt choisi d'adopter une reprise dite pnBH basée sur un empilement bloquant de couches dopées p et n [31, 39]. Pour optimiser complètement l'injection des porteurs, il convient de tenir compte des électrodes de contact, du report sur embase, de l'embase et du câblage.

2.1.2. Techniques de fabrication

La fabrication de composants se résume de manière schématique par une succession de lithographies, de dépôts et de gravures à partir desquelles des briques de base sont définies puis intégrées les unes aux autres.

2.1.2.1. Etapes génériques

Lithographies

La lithographie est un procédé qui permet de transférer une forme géométrique sur un matériau photosensible par l'intermédiaire d'un masque. Les trois techniques les plus utilisées au III-V Lab sont décrites dans le tableau 2.1. La plus courante est la lithographie de contact qui a pour avantage d'être plus flexible et plus rapide que les deux autres. L'*ebeam* ou photolithographie électronique consiste à concentrer un faisceau d'électrons sur une zone très réduite de la plaque, ce qui offre une grande précision. Ce faisceau se déplace en fonction du fichier source du masque au format ".gds". Le *stepper* nécessite toujours un masque physique mais pour lecture seulement. Après avoir parcouru le motif du masque, une lampe éclaire la cellule à écrire et itère cette opération autant de fois qu'il y a de cellules.

	MASQUE	EXPOSITION	CONTACT	ALIGNEMENT	ECRITURE	RESOLUTION
PHOTOLITO. DE CONTACT	Dur, physique	UV (463 nm)	Contact vide	Manuel	Pleine plaque	200 nm
PHOTOLITO. ELECTRONIQUE	Numérique	Faisceau électrons	Sans contact	Automatique	Par cellule ou pleine plaque	50 nm
STEPPER	Projeté (physique pour lecture)	UV (365 nm)	Sans contact	Automatique	Cellule par cellule	120 nm

Table 2.1- Techniques de lithographies au III-V Lab.

Une étape de lithographie se déroule classiquement par l'enduction de la résine, l'exposition et le développement. En fonction des étapes de dépôts et de gravures qui suivront, les propriétés physico-chimiques de la résine comme l'adhérence au substrat ou les liaisons des molécules polymères, sont soigneusement calibrées.

Dépôts

Dans certains cas, la résine ne convient pas pour masquer les zones à protéger lors d'une gravure (déformation des motifs, polymérisation en présence de plasma). On préfère alors utiliser un masque de métal ou de diélectrique. Les diélectriques employés sont la silice (SiO_2) et le nitrure de silicium (Si_3N_4), déposés par évaporation PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*). On utilise fréquemment le Titane (Ti) comme masque de métal, déposé, lui, par pulvérisation (*sputtering*). Dans ce cas, on recourt parfois à une légère gravure de la surface avant le dépôt afin de favoriser l'adhérence. Hormis cela, les recettes de dépôt étant maîtrisées, on choisira seulement le matériau et l'épaisseur à déposer. Ils se déterminent à la fois par le procédé de gravure à venir et par la profondeur à graver (sélectivité du masque). Remarquons que les dépôts métalliques servent aussi pour les contacts ohmiques.

Gravures

On distingue les gravures sèches des gravures humides. Les gravures humides se font par immersion de la plaque dans une solution chimique pour provoquer des réactions acido-basiques et

d'oxydoréduction. Le contrôle de la cinétique est essentiel, elle est calibrée par des tests préalables. On utilise fréquemment ces gravures pour décontaminer la surface de la plaque ou retirer un masque en diélectrique/métal. Elle est plus rarement adoptée pour graver la structure épitaxiale. En effet, il est difficile de maîtriser avec précision l'uniformité et la reproductibilité de la gravure. De plus, la gravure chimique est isotropique (elle concerne toutes les directions), ce qui a pour conséquences des surgravures (en largeur) et un profil arrondi. Lorsque l'on souhaite graver une profondeur précise avec des flancs droits, on s'oriente plus favorablement vers des gravures sèches.

Les gravures dites sèches reposent généralement sur une gravure plasma, combinaison de gravures chimique et physique. Des ions positifs sont accélérés vers la surface de la plaque pendant que les éléments du plasma réagissent avec les atomes en surface pour former un produit volatil. Dans la pratique, la plaque est placée dans une chambre à vide entre deux électrodes reliées par un générateur de gaz. Celui-ci participe autant à la génération du plasma qu'à l'accélération des électrons. Pour découpler l'énergie des ions de la densité de plasma, un second générateur dit de polarisation est ajouté au système. La technique générale de gravure ionique réactive (*Reactive Ion Etching*, RIE) se décline selon le type de génération du plasma. Mentionnons les sources à couplage inductif non résonant ou ICP (*Inductively Coupled Plasma*). Un second type de gravure plasma est la gravure physique par faisceau d'ions positifs, comme l'Argon (Ar^+) assistée d'un gaz réactif tel que le chlore (Cl) ou le fluor (F).

	PROFIL	SELECTIVITE	VITESSE
CHIMIQUE	Isotropique	Forte	Rapide
PHYSIQUE	Anisotropique	Faible	Lente
PLASMA	Anisotropique	Modérée	Modérée

Table 2.2- Comparaison des différentes techniques de gravures.

Une technique particulière de gravure concerne l'amincissement ou planarisation de la plaque en fin de fabrication. Le procédé est mécano-chimique. Les plaques placées dans un support tournant sous des poids sont polies contre un plateau rugueux. Pendant le mouvement mécanique, une solution chimique est injectée. D'autres techniques d'amincissement existent.

Caractérisation

Une plaque deux pouces contient plusieurs centaines de composants. L'homogénéité des procédés et leur reproductibilité représentent deux critères indispensables. Pour de la production, les composants doivent être strictement identiques. Pour de la recherche, des déclinaisons sont introduites pour comparer l'influence de certains paramètres et alors la fabrication se doit aussi d'être identique pour ne pas ajouter d'incertitudes. L'autre critère inhérent à la fabrication est le rendement mis à mal par des contaminations et la création de défauts.

L'évaluation de ces critères s'effectue tout le long du cycle de vie de la plaque. D'une part, les paramètres intrinsèques aux équipements sont sauvegardés à chaque opération permettant de repérer une dérive éventuelle des recettes. Dans la plupart des cas, ils comportent aussi un outil de suivi *in situ*, typiquement un laser et une caméra.

D'autre part, plusieurs équipements de caractérisation aident à représenter l'état de la plaque après chaque étape. Les microscopes optiques donnent une première représentation visuelle et renseignent sur les dimensions 2D. Le microscope à balayage électronique (MEB) est une technique destructive,

dont la résolution atteint quelques nanomètres. Les profondeurs/épaisseurs sont accessibles via un profilomètre ou pour une information plus précise par un microscope à force atomique (*Atomic Force Microscopy*, AFM). Ils renseignent aussi sur la rugosité de la surface. L'ellipsomètre permet de mesurer l'épaisseur d'une couche après dépôt.

2.1.2.2. Procédé standard

Un développement technologique s'appuie sur des briques de base, héritage du savoir-faire du laboratoire. Ces briques représentent un point de départ autour duquel s'articule la conception d'un composant mais aussi à partir duquel une optimisation est possible.

La réalisation d'un ruban résume les différentes étapes technologiques. Puisque nous cherchons à obtenir des rubans droits de 1 μm environ, on emploie une gravure sèche (G, figure 2.5). Selon la marge dont on dispose pour arrêter la gravure, on s'oriente plutôt vers une gravure RIE lente pour des faibles marges et vers une gravure rapide ICP dans les autres cas. Les conditions de température et de puissance étant relativement importantes, un double masque diélectrique-métal est préféré à un masque résine standard (F fig. 2.5). Le masque de silice est déposé pleine plaque puis gravé sélectivement en RIE (A, E fig. 2.5). Pour des largeurs supérieures à 500 nm, la lithographie du masque de métal est obtenue par contact. Pour des largeurs inférieures, l'*ebeam* est nécessaire. Dans notre cas, le choix par défaut est l'*ebeam* avec une résine positive (B fig. 2.5). Puisque les surfaces à insoler sont réduites avec cette technique, c'est le motif du ruban qui est exposé (et non le contraire qui représenterait une surface trop grande). Nous n'avons alors d'autres choix que d'utiliser la technique du *lift-off* pour déposer le masque métallique (C, D fig. 2.5). La résine est retirée par immersion dans un bain d'acétone. Une fois les gravures réalisées (réduites ici à la seule gravure du ruban), la structure est enterrée par croissance épitaxiale.

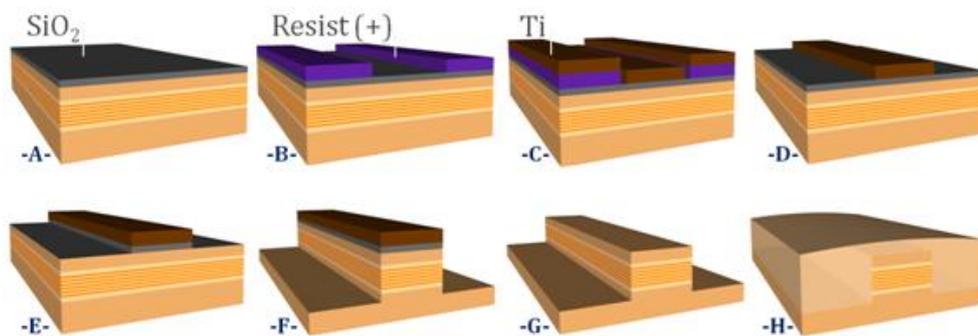


Figure 2.5- Étapes technologiques pour former un ruban enterré. (A à E): définition de la structure active; (F): gravure du ruban; (G): retrait du masque; (H): Enterrement du ruban.

Les étapes de la figure 2.5, de manière générale, concernent la gravure de la structure active. Elles façonnent la propagation de l'onde dans le composant. La figure suivante (2.6) illustre quant à elle l'injection des porteurs. Leur confinement est assuré, dans notre cas, par implantation de protons (J à L). La résine y est épaisse afin de bloquer les protons. L'alignement est réalisé par lithographie de contact. Il est critique car contraint par la largeur du ruban. Trop grande, elle provoquerait des fuites. Trop faible un risque de désalignement et donc d'implantation dans la jonction serait possible. Les contacts P et N s'effectuent par pulvérisation de titane, de platine et d'or. La couche de ternaire InGaAs déposée lors de la reprise est gravée sélectivement par une solution chimique (M fig. 2.6). Enfin la plaque est amincie pour permettre son clivage par la suite.

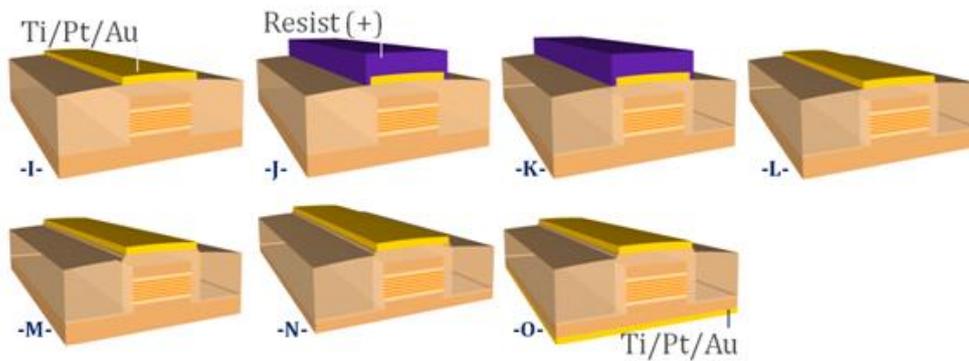


Figure 2.6- Étapes technologiques des contacts ohmiques (I, M, O), de l'implantation de protons (J à L) et de l'amincissement (N).

Taper

Une deuxième brique de base ajustée en fonction des besoins est l'adaptateur de mode (*spot size converter* ou *taper*). Dans un ruban classique, le mode est très confiné, ce qui a pour conséquence une grande divergence en sortie. Pour réduire cette divergence, il faut augmenter la taille du mode et donc celle du guide. Ce sujet est très largement publié et a fait l'objet de nombreux brevets. Pour notre part, nous nous appuyons sur un brevet rédigé en 2000 par les chercheurs d'Alcatel Alsthom (ex III-V Lab) [8]. Le guide le plus large est défini dans une seconde couche dite passive (figure 2.7) dont l'indice de réfraction est proche de celui de la couche active. En termes de fabrication, cet ajout impose une seconde gravure de la structure. Des contraintes d'alignement, de résolution et de définition des pointes devront être gérées.

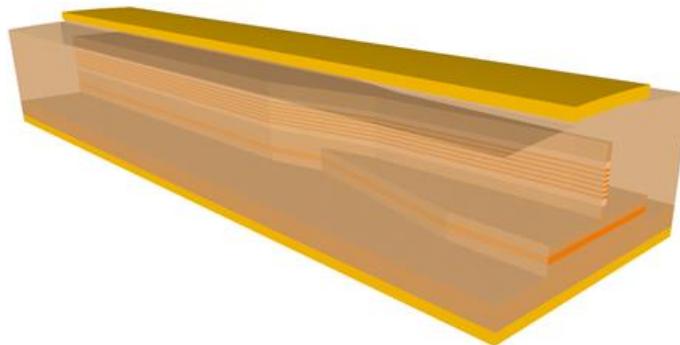


Figure 2.7- Exemple de convertisseur de mode.

2.1.2.3 Traitements et embases

La fabrication d'un composant ne se finit pas avec celle de la plaque. Achevée, elle est ensuite clivée pour séparer les barrettes de composants. L'angle du diamant et la force appliquée sont calibrés pour chaque plaque. Des défauts entraîneraient une facette rugueuse, ce qui serait néfaste aux performances. Laissées en l'état, les facettes ont une réflectivité d'environ 30% (lois de Snell-Descartes) pour un ruban perpendiculaire aux facettes.

Un traitement par dépôts successifs de SiO_2 et de TiO_2 (dioxyde de titane) provoque un contraste d'indices et donc une condition de phase sur l'onde qui se propage. En fonction des interférences constructives ou destructives du signal retour, le traitement augmente (traitement HR, *High Reflectivity*) ou abaisse (traitement AR, *Anti-Reflection*) la réflectivité. L'angle du ruban par rapport à la normale de la surface, la longueur d'onde et la polarisation du mode déterminent le nombre et l'épaisseur des couches diélectriques à déposer. Des contrôles ellipsométriques vérifient l'indice effectif de l'ensemble. Pour cette étape, les barrettes sont placées dans des supports, à la verticale de

manière à dégager la facette à traiter (figure 2.8). Selon leurs dimensions, les supports sont standardisés (TARCOL) ou adaptés au cas par cas. Ces montages doivent être maîtrisés pour obtenir une bonne inclinaison et un bon dépôt, sans quoi les composants peuvent se retrouver inutilisables.

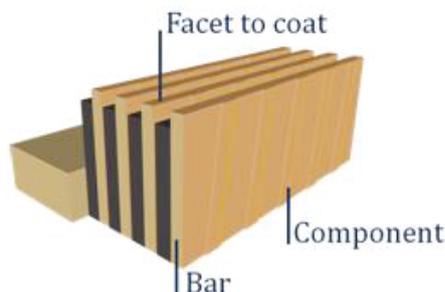


Figure 2.8- Montage pour traitement de la facette.

Traités ou non selon les besoins, chaque composant est clivé unitairement pour être monté sur une embase. Elle facilite l'utilisation, rend possible la modulation du courant et assure une meilleure dissipation thermique, autant d'aspects cruciaux pour les performances futures. Pour cela, une embase standard pour la modulation a été conçue en tenant compte des besoins au III-V Lab (figure 2.9 (a)). Le report du composant s'effectue en le plaçant sur la surface d'or étain dédiée, en appliquant une certaine contrainte et chauffant l'ensemble. La force appliquée sur le composant est calibrée en fonction de sa longueur notamment. La dernière étape est le câblage qui relie l'électrode du composant aux pistes de l'embase. Le diamètre et la longueur du fil conditionnent la bande passante de modulation; le nombre de liaisons entre l'embase et l'électrode influe la répartition du courant injecté. Pour être exhaustif, on distingue le report dit *p-down* (composant à "l'envers") du report dit *p-up*. Si la première configuration améliore la dissipation thermique [97], elle est cependant plus compliquée à mettre en œuvre dans la pratique.

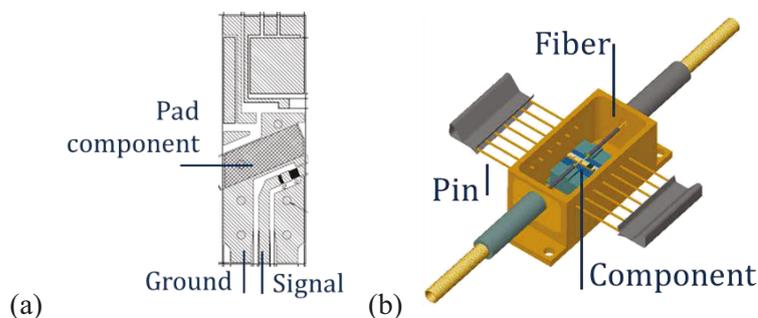


Figure 2.9- (a) Embase pour modulation hautes-fréquences, (b) *module butterfly*.

La mise en module est une étape optionnelle et ne concerne qu'un nombre limité de composants destinés à l'intégration système. Divers conditionnements existent au III-V Lab selon les applications souhaitées. Le boîtier *butterfly* est généralement choisi pour des applications télécom classiques (figure 2.9 (b)). L'embase y est placée sur un régulateur en température (*Thermoelectric Controller*, TEC) dans un boîtier fibré. Chaque broche du boîtier est reliée à une grandeur électrique (courant dans le composant, tension à appliquer à la TEC).

2.1.3. Composants étudiés

Cette thèse est principalement orientée vers l’amplificateur optique réflectif à semiconducteur (RSOA) mais la connaissance et la compréhension des autres composants optoélectroniques sont indispensables pour une approche plus globale du problème.

2.1.3.1. Laser Fabry-Pérot

Le laser Fabry-Pérot est un des lasers les plus simples. Dans notre cas on l’obtient par clivage perpendiculaire au ruban (figure 2.10). Les miroirs ainsi formés (réflectivité de 30 %) imposent une condition de phase au mode guidé, la cavité résonne à des longueurs d’ondes espacées de l’Intervalle Spectral Libre (ISL) ou *Free Spectral Range* (FSR). L’ISL est inversement proportionnel au produit de la longueur de la cavité par l’indice de groupe du mode. Il est couramment utilisé pour tester le bon fonctionnement d’une plaque, élément générique il sert de point de comparaison.

Il est aussi utilisé dans les cavités auto-alimentées (cf. chapitre 1). La réflectivité de ses facettes peut être ajustée afin d’obtenir une cavité plus ou moins résonante.

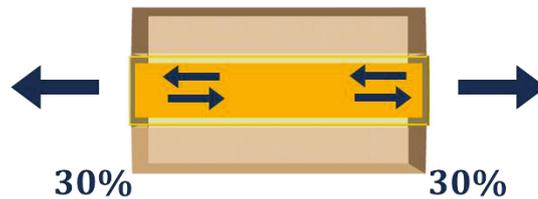


Figure 2.10- Exemple de laser Fabry-Pérot.

2.1.3.2. SOA

Le SOA fut pendant longtemps comparé à l’amplificateur optique à fibre dopée Erbium (*Erbium Doped Fiber Amplifier*, EDFA). Pourtant, ses applications sont bien plus larges telles que la conversion en longueur d’onde, la réalisation de fonctions logiques ou la commutation optique [10]. Au laboratoire, le SOA est très fréquemment intégré comme pré-amplificateur pour la réception [11], comme *booster* pour l’émission [12, 13] ou encore pour compenser les pertes d’un modulateur [14]. Dans son utilisation la plus conventionnelle, les paramètres critiques sont : le gain, le facteur de bruit, la largeur optique, la dépendance à la polarisation et la puissance de saturation. Outre ces critères, la conception d’un SOA s’attache à empêcher la réflexion du mode aux facettes. Si tel était le cas, un signal contre-propagatif pourrait se former et provoquer des raies lasers. C’est pourquoi la majorité des SOA sont inclinés de 7° par rapport à la normale de la facette empêchant la lumière réfléchie d’être guidée dans le ruban (effet géométrique). Une assurance supplémentaire est par des traitements antireflets des facettes (figure 2.11).

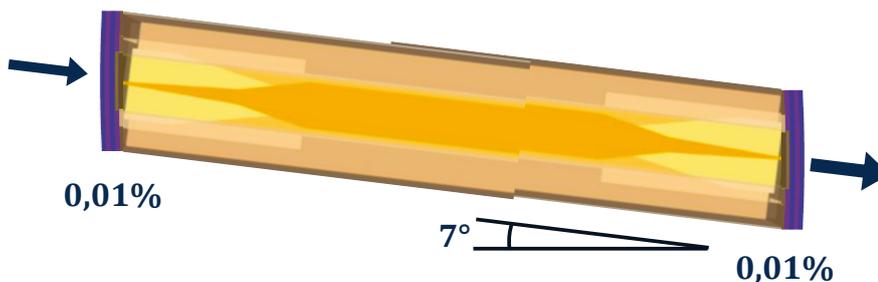


Figure 2.11- Exemple de SOA.

Parmi les laboratoires travaillant ou ayant travaillé sur le sujet, citons succinctement Nokia Bell Labs [15] en Allemagne, HHI/IBM [16], NTT [17] et Fujitsu Laboratories [44] au Japon. Les universités d'Eindhoven [7, 30], de Cambridge [18], d'Athènes et de Tampere [48] publient aussi ponctuellement. Des produits commerciaux sont vendus en module par Innolume [19], Amphotonix (ex Kamelian) [20], Inphenix [21], Optilab [22], Aeon [23] ou encore Thorlabs [24] balayant des longueurs d'onde de 880 nm à 1550 nm.

2.1.3.3. RSOA

Évoqué au chapitre 1, le SOA réflectif ou RSOA est majoritairement employé comme source directement modulée. Au-delà des applications foncièrement distinctes qui dictent des conceptions particulières, SOA, RSOA et même laser Fabry-Pérot se distinguent par leur comportement physique intrinsèque. Par rapport au SOA, la contre-propagation des photons dans le RSOA engendre de profondes modifications en termes de répartition des porteurs, de gain et de recombinaisons. Au regard des propriétés d'un laser Fabry-Pérot, on retrouve des modifications analogues (densité des porteurs, gain...). En particulier, l'absence d'effet laser impacte directement la modulation du composant. Cette thèse s'attachera à étudier ces phénomènes.

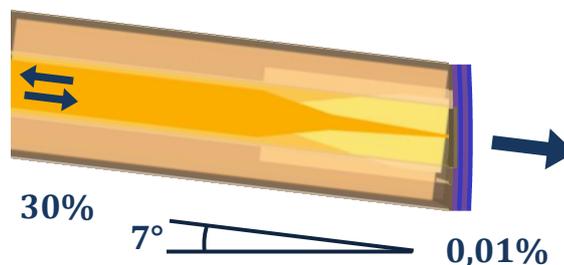


Figure 2.12- Exemple de RSOA.

Si l'offre se développe pour les SOA, il n'existe que de très rares produits commerciaux concernant les RSOA. Les laboratoires en pointe sur le sujet travaillent en général avec des industriels pour qui le composant est un élément différenciateur. Prenons pour exemple CIP, racheté par Huawei fin 2012, l'université de Tokyo en relation étroite avec Oclaro ou encore les laboratoires de l'ETRI et de KAIST dont les recherches sont appliquées par l'opérateur Korea Telecom. Déjà évoqué au premier chapitre (paragraphe 4.1), le III-V Lab possède un long historique sur ce composant, hérité des recherches de la CGE devenue Alcatel-CIT puis Alcatel-Alsthom et des recherches du CNET de Bagneux. Étroitement lié au SOA, le RSOA n'est étudié en tant que tel que depuis le début des années 2000.

2.1.3.4. Laser à contre-réaction répartie

Dans un laser Fabry-Pérot, la condition de phase permettait l'émission de plusieurs longueurs d'onde. L'introduction de réseaux tels que décrits au paragraphe précédent ajoute des conditions supplémentaires, concentrant l'émission laser sur une seule longueur d'onde. Elle est égale, au facteur 2 près, au produit de l'indice effectif du mode par la période du réseau.

Les lasers à réflecteurs de Bragg distribués (*Distributed Bragg Reflector*, DBR) se divisent en trois électrodes. La première contrôle le réseau de Bragg, la deuxième contrôle une section de phase dont l'indice effectif varie en fonction du courant injecté et la troisième électrode est une section à gain. Un cas moins complexe est le laser à contre-réaction distribuée (*Distributed Feedback laser*, DFB) où le réseau est réparti tout le long de la zone active. Il n'y a alors plus qu'une électrode et la longueur d'onde n'est contrôlée que par le pas du réseau.

Leurs applications sont très nombreuses et dépassent le simple cadre de cette thèse. Ils représentent cependant une alternative envisageable aux composants achromatiques et seront étudiés dans ce contexte. Enfin, ils fournissent une information précieuse sur l'indice du mode et pourront être exploités pour des rétro-simulations.

2.1.3.5. Modulateurs à électro-absorption

Les modulateurs à électro-absorption (*Electro-Absorption Modulator*, EAM) ont une structure similaire au SOA. Il s'agit d'une jonction PIN plus ou moins polarisée en inverse. Le champ électrique réduit le gap par effet Stark confiné et donc décale le pic d'absorption vers les plus grandes longueurs d'ondes, ce qui rend possible l'atténuation du signal incident. Globalement, plus le pic est décalé, plus le signal est atténué.

L'avantage de l'EAM est sa vitesse de modulation déterminée principalement par son schéma électrique équivalent. Elle s'exprime en fonction des résistances série, de fuite, de charge et surtout en fonction de la capacité de la jonction qu'on cherche à minimiser. A titre de comparaison, dans une jonction polarisée en direct, on injecte des porteurs ce qui apporte du gain et de l'émission stimulée. La bande passante y est limitée par le temps de vie des porteurs, dont la durée de vie est relativement grande (ordre de la nanoseconde).

2.2. Caractérisation de sources pour cavité auto-alimentée

Évoquées au premier chapitre, les fonctions de la source d’ASE sont multiples. Seul élément actif, elle doit fournir suffisamment de gain pour, dans un premier temps, compenser les pertes de la cavité puis pour fournir le budget optique répondant aux contraintes de distances. Le second aspect pour concurrencer les lasers concerne sa vitesse de modulation. Le dernier point est propre à de telles architectures, il s’agit de l’effacement des données.

2.2.1. Gain du RSOA

Le gain du RSOA dépend de paramètres matériau, du confinement optique, des pertes de propagation ainsi que de la longueur du composant. Le III-V lab dispose déjà d’une grande diversité de RSOA. Dans sa thèse, Guilhem de Valicourt avait croisé les mesures de gain et de puissance de saturation pour des RSOA *bulk* de confinement 20 et 80 % longs de 500 et 700 μm [86]. Nous avons repris et complété ces données pour des confinements variant de 2 à 80 %. Le graphique 2.13 intègre aussi les notions de longueurs et une structure multi-puits quantiques. Chaque forme de marqueur est associée à une plaque. Pour un confinement donné, la longueur du composant peut servir de variable d’ajustement. Un optimum semble se dégager pour un confinement de 20 %. A titre indicatif, nous avons aussi exprimé la puissance de saturation en fonction du confinement optique. La puissance de saturation est la puissance de sortie pour laquelle le gain a diminué de 3 dB. Elle traduit les limites de l’amplification. Les différences sont moins marquées que pour les valeurs de gain maximum. De fortes valeurs de puissance de saturation sont obtenues aussi bien avec des composants courts que des composants longs, avec des confinements de 20 % que des confinements de 80 %.

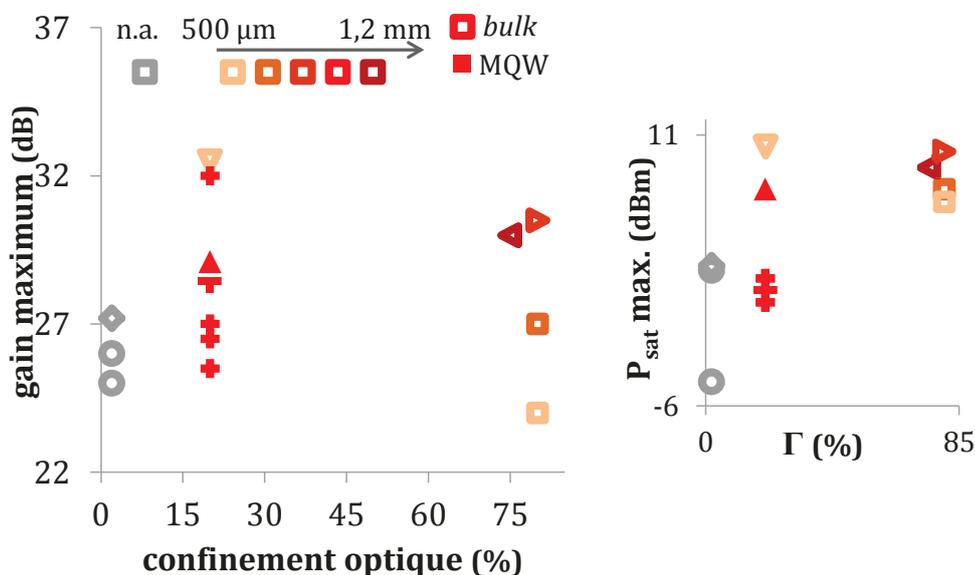


Figure 2.13- Gain en fonction du confinement optique pour des longueurs variées. Chaque forme géométrique correspond à une plaque. Le triangle rouge représente une structure MQW, les autres points une structure *bulk*.

2.2.2. Effacement des données

L’effacement des données est spécifique aux cavités étendues. En effet, à 10 Gbit/s et pour un format de modulation simple (NRZ par exemple) la durée entre deux bits est de 100 ps ce qui est supérieur au temps d’aller-retour d’un photon dans une cavité laser de 300 μm (~2 ps). Or dans une cavité étendue de 1 km, un photon met environ 10 μs à revenir. Entre le temps t_0 où ce photon est sorti du RSOA et le temps $t_0 + \Delta t$ où il revient, 100 000 autres bits auront été codés. Décorrélé de la nouvelle information, le photon crée des interférences, bruite la mesure et limite les performances. D’où l’impératif d’effacer la modulation incidente. Comme décrit au chapitre 1, les solutions interviennent à différents niveaux. En aval, au niveau système, au travers, par exemple, de circuits de décision [87] ou de formats de modulations adaptés [88].

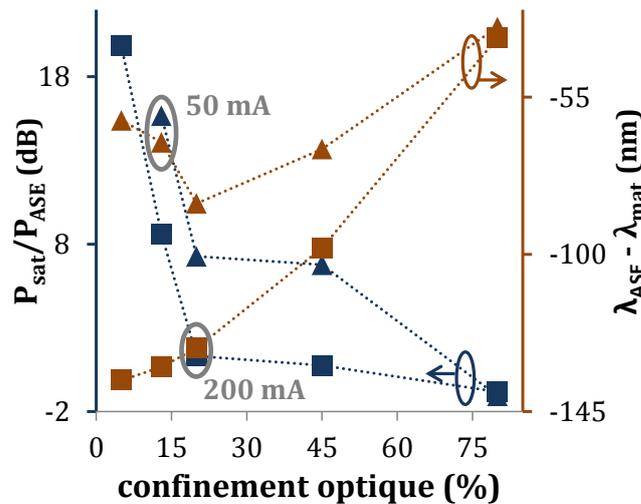


Figure 2.14- Effet du confinement optique sur la saturation dans le (R)SOA.

Nous avons fait le choix d’intervenir en amont, au niveau matériel, via le RSOA et une de ses propriétés établies: la saturation du gain, déjà utilisée dans les configurations de type remodulées [89, 90]. Dans un RSOA comme dans un SOA, la saturation s’obtient soit par des mécanismes internes, soit par une injection externe, soit par une combinaison de ces deux procédés. Par mécanismes internes, nous identifions les recombinaisons non-radiatives, le remplissage des niveaux d’énergie ainsi que l’ASE qui déplete la population de porteurs au bord du composant. Comme expliqué au 3^{ème} chapitre, la longueur et le confinement optique contribuent à l’augmentation de l’émission spontanée amplifiée. Les chercheurs de l’université de Campinas au Brésil ont ainsi proposé un SOA ultra-long de 8 mm [91, 92]. Nous nous sommes concentrés sur l’influence du confinement sur l’ASE et par conséquent sur la saturation [65]. L’axe droit du graphique 2.14 représente l’écart entre le pic d’ASE et le pic de photoluminescence. A 200 mA, cet écart est maximal pour le plus faible des confinements optiques (~2 %). Cet écart augmente aussi avec le courant injecté sauf pour un confinement de 80 % où il reste stable. De ces deux observations, nous pouvons supposer que les composants de faible confinement optique ne sont pas saturés. On remplit les niveaux d’énergie en injectant plus de porteurs, ce qui décale progressivement le pic d’ASE. En revanche pour $\Gamma = 80\%$, l’écart est faible entre les deux pics en longueur d’onde. On explique cela par le *Spatial Hole Burning*. En bord de composant, la densité de porteurs est très faible, et l’absorption est donc massive. Le pic d’ASE ne peut se décaler vers le rouge à cause de cette absorption. L’axe de gauche précise un peu plus cette saturation. Il matérialise l’écart entre la puissance de saturation et la puissance d’ASE à un courant

donné. L'écart minimal entre ces deux valeurs est obtenu pour $\Gamma = 80\%$, l'écart maximal pour $\Gamma \sim 2\%$. Cela confirme que l'augmentation de la longueur et surtout du confinement favorisent fortement la saturation du gain par l'ASE : il devient impossible d'obtenir des puissances de sortie supérieures à la puissance d'ASE.

Ces phénomènes de saturation entraînent des nuances dans les courbes caractéristiques de puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée. Sur la figure 2.15 (b), la puissance de sortie est clampée au-delà de -10 dBm pour un confinement de 80 % alors qu'elle continue à s'accroître légèrement pour des confinements plus faibles. Ces nuances, mêmes légères, se traduisent sur les diagrammes de l'œil en sortie, encore ouverts pour les confinements de 20 et 2 % (figure 2.15 (c)).

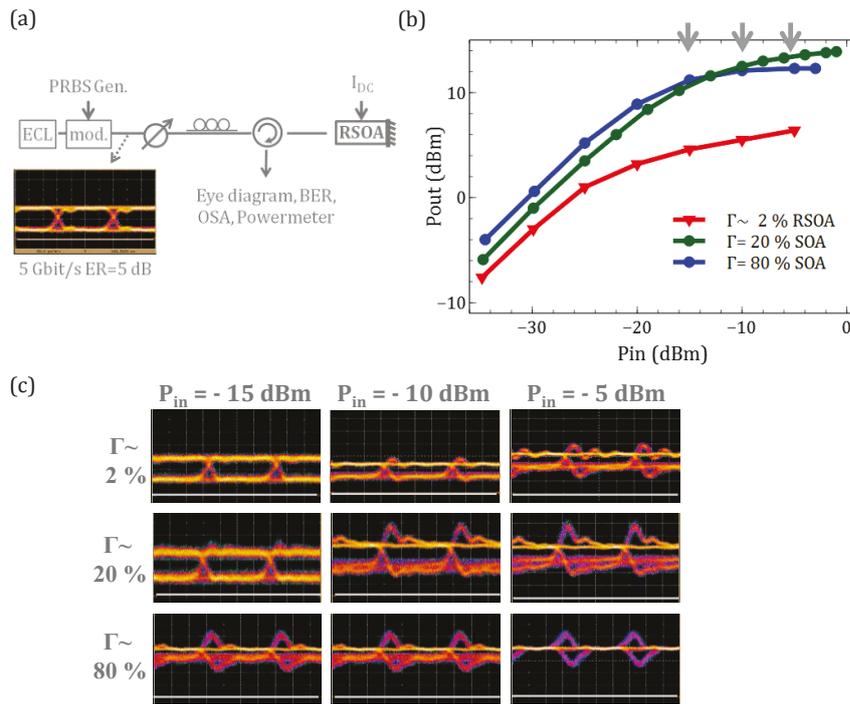


Figure 2.15- Compression du gain pour des confinements de 2, 20 et 80 %. (a) Dispositif expérimental, (b) puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée et (c) diagrammes de l'œil pour des puissances incidentes de -15, -10 et -5 dBm.

Le comportement statique caractérisé par la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée est un prérequis indispensable à l'effacement des données. Une seconde condition, moins connue, est la bande passante optique-optique (O/O) qui transcrit le comportement du gain en fonction de la fréquence de modulation du signal incident. De manière générale, le RSOA est un filtre O/O passe haut. La figure 2.16 représente les réponses pour les trois types de RSOA précédents. A partir de ces courbes, on peut définir une fréquence seuil au-delà de laquelle le RSOA est transparent à la longueur d'onde *i.e.* au-delà de laquelle sa réponse est indifférenciée selon la fréquence optique incidente. Pour $\Gamma \sim 2\%$, le gain est clampé au-delà de 4 GHz. Pour $\Gamma = 20\%$, la fréquence seuil est d'environ 18 GHz tandis qu'elle est au-delà de 20 GHz pour $\Gamma = 80\%$. Le temps de recouvrement du gain augmente avec la puissance d'émission spontanée amplifiée, ce qui explique des valeurs plus faibles à fort confinement, propriété largement exploitée auparavant pour la conversion en longueur d'onde [93, 94]. Les pics transitoires à la figure 2.15 représentent aussi la dynamique du gain. Le passage d'un 0 vers un 1 s'accompagne d'une forte variation de la puissance. Le gain amplifie le signal incident

jusqu'à consommer tous les porteurs disponibles. Il diminue alors jusqu'à atteindre une valeur stable. Réciproquement, le passage d'un 1 vers un 0 cause une diminution abrupte de la densité de photons, le point minimal correspond au produit du gain minimal par la puissance minimale avant de retrouver une valeur de 0 moyenne correspondant au produit de la puissance minimale par le gain moyen. A priori, ces pics ne pénalisent pas la future transmission. Les récepteurs comportent d'ailleurs un filtre de Bessel qui en général filtrera ces transitoires.

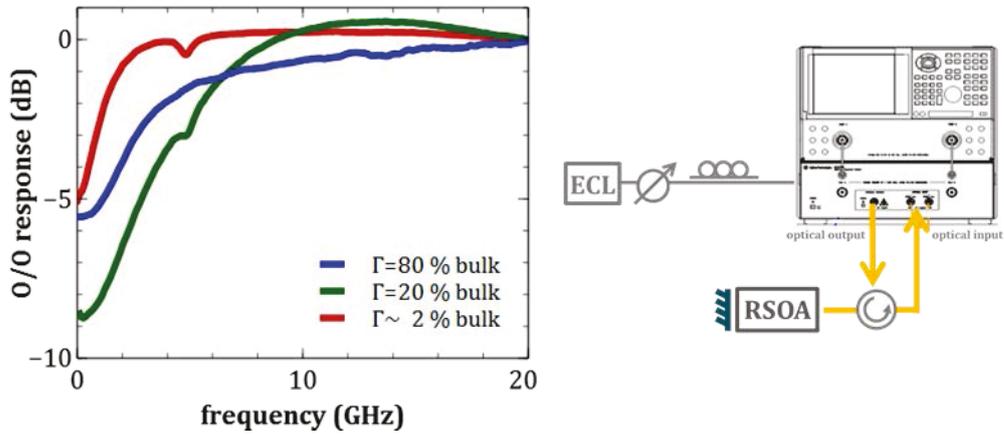


Figure 2.16- Réponse optico-optique pour différents confinements ($I=150$ mA, $P_{IN} \sim -10$ dBm) pour une longueur d'onde incidente correspondant aux pics de gains respectifs des RSOA.

2.2.3. Modulation haut-débit

Contrairement au laser, il n'y a pas d'effet de résonance. La relation particulière entre les porteurs injectés et les photons émis s'exprime non seulement par des caractérisations statiques de puissance et de cohérence spectrale mais aussi par la réponse petit-signal (figure 2.17).

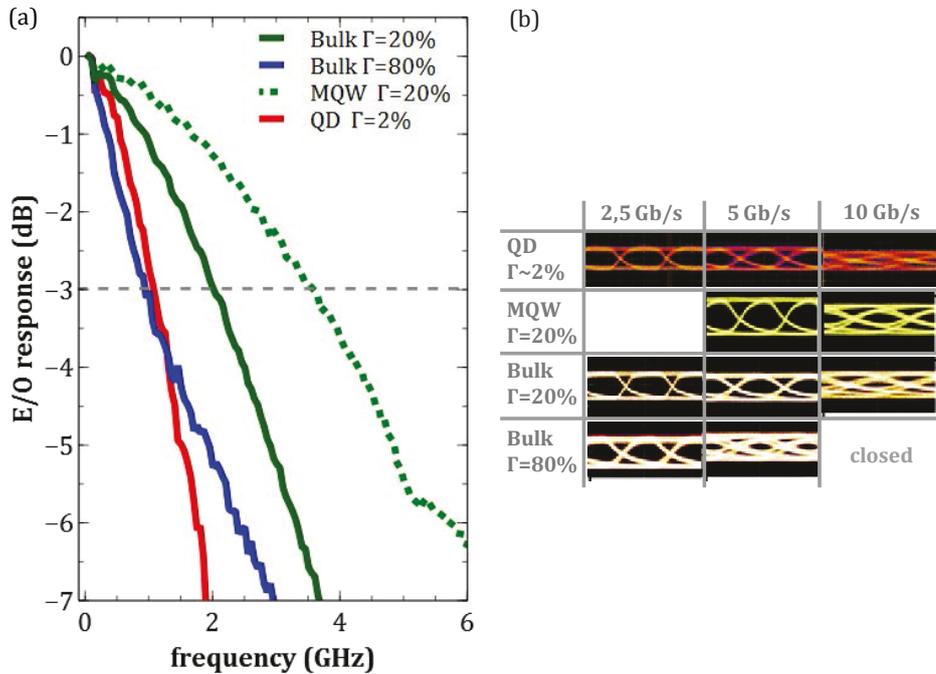


Figure 2.17- Bande passante électro-optique (a) petit signal et (b) grand signal pour différentes structures ($I=100$ mA, modulation d'ASE).

Dans le cas bien connu d'une cavité résonante, photons et porteurs tendent à rejoindre leur état stable à une fréquence particulière dite de relaxation. C'est en jouant sur ce paramètre que les concepteurs optimisent les bandes passantes. De fait, (R)SOA se comportent comme un filtre électro-optique passe bas. A ce sujet la littérature est relativement pauvre. Nous avons donc suivi un raisonnement analogue à celui des lasers en comparant les performances de RSOA aux structures variées. Comme attendu, la structure multi-puits quantiques affiche une bande passante plus grande que les structures à matériau massif. Les faibles confinements optiques sont généralement obtenus en choisissant une structure à boîtes quantiques. Elles présentent un gain différentiel plus grand, ce qui devrait améliorer la réponse électro-optique. Toutefois, dans les (R)SOA, pour de faibles confinements, il y a peu d'émission stimulée. Les porteurs se recombinent moins vite, leur durée de vie augmente et la bande passante est par conséquent limitée. Déjà comparés dans la thèse de Guilhem de Valicourt, le matériau *bulk* à 20 % de confinement présente une réponse plus rapide que celle du matériau 80% [86]. L'origine de cette différence reste encore à préciser. Une approche naïve basée sur l'effet de l'émission stimulée aurait donné une bande passante plus grande à 80 %. Une approche intuitive pourrait impliquer une modulation non homogène le long du (R)SOA [94, 95]. Or, la répartition des porteurs est elle-même non homogène (chapitre 3). Le centre du composant est dominé par l'émission spontanée tandis qu'en sortie l'émission stimulée domine. On pourrait donc faire l'hypothèse que la modulation est plus efficace au centre d'un RSOA de confinement 80 % et plus efficace à la facette d'entrée/sortie d'un RSOA de confinement 20 %.

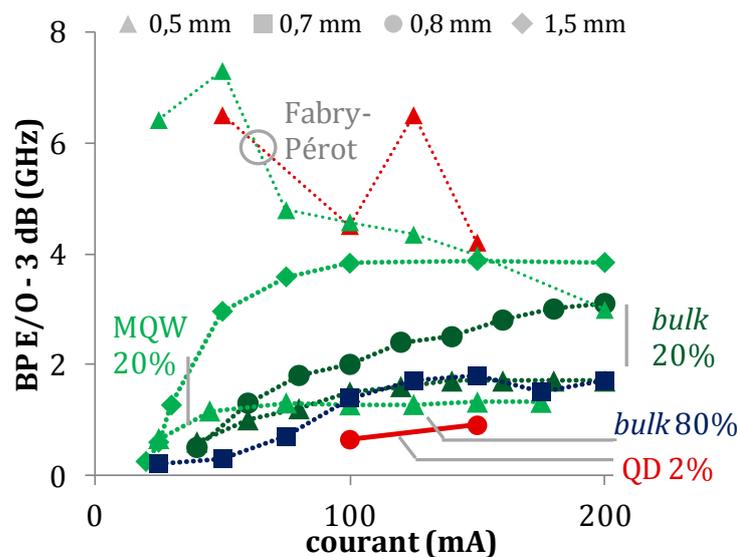


Figure 2.18- Bande passante à -3 dB en fonction du courant pour différentes structures.

L'impact de la longueur sur la bande passante de modulation a été observé tant expérimentalement [64, 94] que par des simulations [95, 96]. La figure 2.18 résume les bandes passantes électro-optiques à -3 dB pour différentes longueurs et différents confinements. La structure MQW 20 % se distingue des autres en offrant une bande passante de 4 GHz et en autorisant ainsi une modulation grand signal jusqu'à 10 Gbit/s.

Remarquons que nous utilisons des technologies BRS qui limitent la bande passante à cause de leur capacité parasite. Nos comparaisons supposent que ces limitations sont identiques en fonction des matériaux étudiés.

2.3. Conception de nouvelles sources

Nous avons aperçu la variété des choix technologiques dans la conception du composant ainsi que les exigences autour de la source à intégrer dans une cavité auto-alimentée. Evoquons à présent la conception des nouvelles générations de sources bas coût.

2.3.1. Etat de l'art

Si relativement peu de laboratoires travaillent sur le RSOA, les recherches autour du SOA sont plus nombreuses et il convient de les intégrer pour un état de l'art complet. Le tableau 2.3, loin d'être exhaustif, résume ce qui a été publié sur le sujet depuis les premiers amplificateurs des années 1990. Le tableau 2.4 résume quant à lui les études menées au III-V Lab ou dans les laboratoires dont il a hérité du savoir-faire. De fait, cette thèse s'inscrit dans la continuité de ces travaux et se positionne par rapport aux choix et aux résultats des groupes tels que l'université de Tokyo, KAIST ou encore CIP.

L'application du SOA la plus répandue étant l'amplification d'un signal, les exigences à sa conception sont légèrement différentes de celles d'un RSOA directement modulé. En particulier, le facteur de bruit et la puissance de saturation sont deux paramètres principaux des SOA, tandis que l'on privilégiera, dans notre application, la bande passante et le gain. A l'éclosion du SOA, la recherche d'une faible dépendance à la polarisation du gain (*Polarization Dependence Gain*, PDG) fit l'objet d'approches nombreuses et variées tant et si bien qu'il existe aujourd'hui peu de RSOA présentant une forte PDG. Pourtant, c'est une manière d'augmenter le gain fibre à fibre et ainsi d'augmenter les performances d'une cavité auto-alimentée. En revanche, les applications des SOA et des RSOA se rejoignent dans la nécessité de réduire autant que possible les fuites de porteurs. Une injection sans pertes diminue non seulement le courant appliqué et donc la consommation énergétique du composant mais conditionne également une bonne tenue en température. En effet, si des fuites existent, elles sont exacerbées par des températures élevées, dégradant de manière dramatique les performances du RSOA.

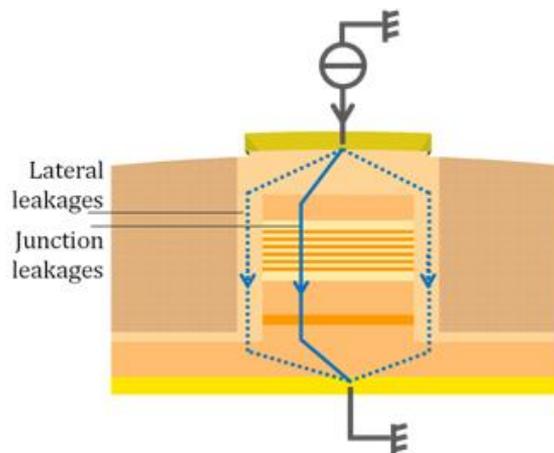


Figure 2.19- Principales fuites dans le RSOA.

Il existe plusieurs types de ce que l'on nomme communément fuites de porteurs (figure 2.19):

- des fuites latérales dues à l'homojonction PN dans le cas d'une croissance BRS ;
- des fuites à travers la jonction en raison d'un mauvais confinement électronique ;
- des fuites par recombinaisons successives sur des défauts cristallins.

Dans le premier cas, la reprise BRS a été modifiée pour introduire des couches bloquantes de part et d'autre du ruban (reprise PNBH) [38, 40, 43] puis remplacée par la reprise SIBH avec de l'InP semi-isolant [35, 44]. Dans les deux cas, une maîtrise parfaite du matériau est exigée. Dans le cas contraire, la présence de défauts endommage fortement le fonctionnement du composant. Le confinement électronique est renforcé par le choix de la structure en multi-puits quantiques (MQW) et parfois en boîtes quantiques (*Quantum Dot*, QD) [18] ainsi que par le choix du matériau. Ainsi l'Aluminium (Al), l'Azote (N) ou même de l'antimoine (Sb) ont été préférés au Phosphore dans le quaternaire InGaAsP initial [45, 46].

Au III-V Lab, le (R)SOA type est en InGaAsP massif, indépendant à la polarisation et tilté de 7°. Un des atouts du laboratoire est la possibilité de réaliser une large palette de confinements optiques allant de 1 à 80 % [65]. En 2011, au début du projet européen ERMES, la conception d'un RSOA appliqué aux cavités auto-alimentées s'est orientée vers un matériau InGaAsP massif, en bande C, faiblement dépendant à la polarisation et avec un confinement optique autour de 20 %. Remarquons que si tous les composants du tableau 2.4 sont en bande C, la bande O a pourtant été la première fenêtre d'émission étudiée, et ce, dès les années 1980 par Alcatel CIT (diodes et lasers) [66]. Enfin, par souci d'exhaustivité, notons aussi que des SOA en quaternaire AlGaInAs ont été développés dans le cadre de SOA-EAM [7].

REF.	YEAR	GROUP	TYPE	λ	MATERIAL	STRUC-TURE	STRAIN	RE-GROWTH	PDG	θ	WIDTH (µm)	THICK. (nm)	LENGTH (mm)	CUR. (mA)	GAIN (dB)	OPT. BW. (nm)	TEMP. MAX.	MOD.
25	1993	AT&T	SOA	C	InGaAs /InGaAsP	MQW(6)	mixed	SIBH	Low	?	2.5	187.5	0.625	150	15	100	-	-
26	1994	NTT	SOA	C	InGaAs	MQW(10)	tensile	BRS	Low	?	1.5	105	0.66	200	27	57	-	-
27	1996	Swiss Fed Inst.	SOA	O	InGaAsP	Bulk	-	Shallow R.	Low	10°/10°	3	250	0.5	250	26	35	50	-
28	1996	Swiss Fed Inst.	RSOA*	O	InGaAsP	Bulk	-	Shallow R.	Low	0°/10°	3	250	0.25	40	20	-	-	?
29	1995	Philips	SOA	O	InGaAsP	MQW(7)	mixed	SIBH	Low	10°/10°	?	?	0.825	400	33	60	53	-
30	1997	Philips	RSOA	O	InGaAsP	MQW(7)	mixed	SIBH	Low	10°/10°	?	?	0.4 (chip)	200	30	?	-	-
31	1994	BT Labs	SOA	C	quat. ?	MQW(16)	unstrained	SIBH	?	-	?	?	0.3 à 1.1	-	-	-	80	-
32	1994	BT Labs	SOA	C	InGaAsP	MQW(8)	comp.	SIBH	?	-	?	154	0.36 à 1.1	-	-	-	-	-
33	1996	BT Labs	SOA	C	InGaAs	MQW(11)	strained	SIBH	Low	10°/10°	?	?	2	250	25	53	-	-
34	1998	BT Labs	RSOA	C	?	MQW(8)	comp.	SIBH	High?	0°/10°	1.2	154	1	100	26	30	20°C	-
35	2003	CIP	RSOA	C/L	?	MQW	?	SIBH	?	0°/10°	?	?	?	80	27	27	80	2.5 Gbit/s
36	2006	Uni. Glasgow + Amphotomix	SOA	O	InGaAsP	Bulk	tensile	BRS	Low		1.2	200	0.6	230	28	42	-	-
37	2010	Uni. Glasgow + Amphotomix	RSOA	C/L	InGaAsP	Bulk	tensile	BRS	Low	0°/10°	1.2	200	0.35	50	20	60	60	1.25 Gbit/s
37	2010	Uni. Glasgow + Amphotomix	RSOA	S	InGaAsP	Bulk	tensile	BRS	Low	0°/10°	1.2	200	0.6	80	20	54	25	1.35 GHz
38	2004	Samsung	RSOA	C	InGaAsP	MQW(8)	?	PNBH	?	0°/10°	1.2	?	1	100	38	30	-	-
39	2008	KAIST	RSOA	C	?	MQW	?	PBH	Low	?	?	?	0.4	40	22	56	60	2.2 GHz
40	2003	Fujitsu	SOA	C	InGaAsP	Bulk	tensile	PNBH	Low	7°/7°	1	50	1.4	300	20	-	-	-
41	2005	Fujitsu	SOA	C	InGaAsP	MQW(4)	comp.	PNBH	?	7°/7°	3.5	?	1.8	1000	18	120	-	-
42	2005	Fujitsu	SOA	C	InGaAsP	MQW	tensile	PNBH	Low	7°/7°	3.5	45	0.9	500	20	80	25	-
43	2008	Fujitsu	SOA	C	GaN/InAs /GaN/InAs	MQW	tensile	PNBH	Low	7°/7°	2.5	65	0.8	300	13	90	25	-
44	2010	Fujitsu	SOA	O	AlGaN/InAs	MQW	tensile	SIBH	Low	7°/7°	2	?	0.7	150	20	40	45	-
45	2011	Fujitsu	SOA	O	AlGaN/InAs	MQW	tensile	SIBH	Low	7°/7°	1.2	?	0.9	200	28	40	75	-
46	2015	Uni. Tokyo	RSOA	C	AlGaN/InAs	MQW	?	?	?	?	?	?	0.6; 1; 1.8	100	12	?	50	2.5 Gbit/s
47	2016	Uni. Tokyo	RSOA*	C	AlGaN/InAs	MQW	?	?	?	0°/?	?	?	1.4	90/80	?	1.5	25	10 Gbit/s
48	2015	Uni. Athens	SOA	C	GaN/InAsSb	MQW(2)	?	BRS	?	7°	1.6	?	1	220	10.3	88	55	-

Table 2.3- Comparatif des choix technologiques et des performances basiques de (R)SOA.

REF.	LAB.	YEAR	(R)SOA?	BAND	MATERIAL	STRUCTURE	STRAIN	REGROWTH	PDG	ANGLE (ridge/taper)	LENGTH (mm)	OPT. CONF.	CURRENT (mA)	GAIN (dB)	OPT. BW. (nm)	MOD. BW. (Data rate)
49	Labo de Marcoussis	1990	SOA	C	InGaAsP	Bulk	-	PNBH	Low	?	?	70%	50	28	45	-
50	Alcatel Alsthom R.	1994	SOA	C	InGaAsP	Bulk	-	BRS	Low	-	?	60%	150	25	45	1,85 GHz
51	Alcatel Alsthom R.	1995	SOA	C	InGaAsP	Bulk	-	BRS	Low	7°/7°	0,8	50%	200	29	30	-
52	Alcatel Alsthom R.	1996	SOA	C	InGaAsP	Bulk	Tensile	BRS	Low	?	1	?	200	27	40	-
53	Alcatel Alsthom R.	1997	SOA	C	InGaAsP	Bulk	Tensile	BRS	Low	7°	1	40%	200	29	50	-
54	Opto+	1999	SOA*	C	InGaAsP	Bulk	Tensile	BRS	Low	?	0,6 et 0,8	25%	200	27	-	-
55	CNET Bagneux	1995	SOA	C	InGaAsP /InGaAs	MQW (16)	Mixed	?	Low	?	0,7	?	240	27	90	-
56	CNET Lannion	1995	SOA	C	InGaAsP /InGaAs	MQW	Mixed	BRS	Low	?	0,8	?	180	22	60	-
57	CNET Lan./Ba.	1996	SOA	C	InGaAsP /InGaAs	MQW (16)	Mixed	BRS	Low	6°/6°	0,94	50%	150	23	-	-
58	CNET Lan./Ba.	1997	RSOA	C	InGaAsP /InGaAs	MQW (16)	Mixed	BRS	Low	6°/6°	0,52	?	7	100	40	-
59	III-V Lab	2005	SOA	C	InGaAsP	Bulk	Tensile	PNBH	Low	7°/7°	1,5	5 et 13 %	-	10	-	-
60	III-V Lab	2007	RSOA*	C	InGaAsP	Bulk	Tensile	BRS	Low	7°/7°	?	80%	80/30	22	?	6
61	III-V Lab	2010	RSOA*	C	InGaAsP	Bulk	-	BRS	Low	7°/7°	0,5	20%	20/115	30	50	(2,5 Gbit/s)
61	III-V Lab	2010	RSOA	C	InGaAsP	Bulk	-	BRS	Low	7°/7°	0,5	20%	60	30	50	-2,2
62	III-V Lab	2010	RSOA	C	InGaAsP	Bulk	-	BRS	Low	7°/7°	0,5 et 0,7	20%	80	30	50	2,2
63	III-V Lab	2010	RSOA*	C	InGaAsP	Bulk	Tensile	BRS	Low	7°/7°	0,5	80%	80	25	50	(2,5 Gbit/s)
64	III-V Lab	2011	RSOA	C	InGaAsP	Bulk	-	BRS	Low	7°/7°	0,5 à 0,85	20%	200	30	50	1,7 à 3

Table 2.4- Historique des (R)SOA au III-V Lab.

2.3.2. Choix des structures

Avant de détailler les structures étudiées, rappelons les principaux critères recherchés :

- avoir un gain supérieur à 20 dB ;
- effacer suffisamment le signal incident ;
- assurer des transmissions supérieures à 40 km (idéalement 80 km) ;
- produire un composant rapide (10 Gbit/s) ;
- pouvoir fonctionner en régime non refroidi (i.e. 0°-80°C) ou semi non-refroidi (i.e. 0°-55°C) ;
- diminuer la consommation énergétique.

Parmi les RSOA de l'état de l'art, seuls ceux produits par CIP en 2003 [35] et plus récemment en septembre 2015 par l'université de Tokyo conjointement avec Oclaro [46] conjuguent modulation haut-débit (supérieur ou égal à 2,5 Gbit/s) et haute température (supérieure ou égal à 50°C). Peu de détails technologiques sont donnés, si ce n'est que l'un a recours à une reprise SIBH et l'autre au quaternaire AlGaInAs.

Les deux premiers points (gain et effacement) résultent d'un compromis sur le confinement optique. La valeur de 20% et une longueur de 1 mm ont déjà été identifiées comme des grandeurs permettant d'assurer les performances visées [67].

La distance de transmission dépend fortement de la dispersion chromatique. Pour la limiter, on pourrait réduire la finesse spectrale du signal mais cela engendre du bruit de partition modale qui provoque lui-même un plancher BER (paragraphe 1.3.4.1.). Nous avons choisi d'expérimenter des RSOA en bande O, où la dispersion chromatique est quasi-nulle [68]. A notre connaissance, il n'existe pas de tels composants malgré de très nombreux SOA en bande O, hormis Tiemeijer et al. [30] qui formèrent un RSOA à partir d'un SOA et d'un miroir en cavité externe.

Certains composants de la littérature ont une bonne tenue en température. Ils ne répondent cependant pas totalement aux exigences d'un système en cavité auto-alimentée qui demande un gain suffisant sur une trentaine de nanomètres. Cho et al. ainsi que Tanaka et al. [39, 45] se placent ainsi sur la partie décroissante du spectre de gain où les courbes se superposent entre 0 et 60 °C. La plage de longueur d'onde concernée avec un gain suffisant est limitée à quelques nanomètres. Borghesani et al. sont parvenus à assurer une plage de 35 nm avec un gain suffisant entre 10 et 70°C [35]. Dans notre cas, nous avons choisi d'explorer l'influence de l'Aluminium via le quaternaire AlGaInAs qui a montré de bons résultats aussi bien dans nos composants intégrés [7] que dans les lasers en général [69-71]. D'après ces mêmes résultats, on espère aussi améliorer la rapidité du composant. Par ailleurs, nos structures seront en multi-puits quantiques. Un dernier aspect est l'optimisation de la reprise. La brique SIBH étant toujours en développement au laboratoire, elle ne sera pas spécifiquement étudiée dans cette thèse mais seulement évaluée par la suite.

La conception n'adresse pas directement la problématique de réduction de consommation d'énergie qui devrait, dans un premier temps, résulter des améliorations précédentes.

Le tableau 2.5 liste les conceptions réalisées. Les lots 1 à 3 ont été réalisés pendant cette thèse, les autres composants sont antérieurs et placés dans le tableau à toutes fins utiles.

ORIGINE	REF.	LOT	STRUCTURE	MATÉRIAU	BANDE	REPRISE
Avant thèse	60927	-	Bulk tensile	GaInAs	C	BRS
Avant thèse	63483	-	MQW	InGaAsP	C	BRS
Avant thèse	63488-10	-	MQW	InGaAsP	C	BRS
Avant thèse	63486-10	-	MQW	InGaAsP	C	BRS
Avant thèse	63490-10	-	MQW	InGaAsP	C	BRS
2013	63486-20	0	MQW	InGaAsP	C	BRS
2013	63486-30	0	MQW	InGaAsP	C	BRS
2013	64138-10	1	MQW	InGaAsP	O	BRS
2014	35072X	2	MQW	AlGaInAs	O	BRS
2015	35071X	3	MQW	AlGaInAs	O	BRS
2015	34859X	3	MQW	AlGaInAs	C	BRS
2015	63510	3	MQW	InGaAsP	C	BRS
2015	64138-30	3	MQW	InGaAsP	O	BRS
Autres projets	x	-	MQW	InGaAsP	C	SIBH

Table 2.5- Listes des structures étudiées et des structures réalisées pour l'étude de RSOA directement modulés.

2.3.3. Diagramme de bandes

La figure 2.20 schématise deux types de structures: à gauche une structure QW avec de l'AlGaInAs et à droite une structure QW en InGaAsP. ΔE est la différence d'énergie entre les couches de l'hétérostructure ($\Delta E = E_{g,bar.} - E_g$ sur la figure) et ΔE_C la discontinuité de la bande de conduction. Dans le quaternaire traditionnel en Phosphore, le rapport $\Delta E_C / \Delta E$ est de 0,39 tandis qu'il est de 0,72 dans un quaternaire Aluminium [72]. Cela assure un meilleur confinement des électrons, sensibles aux phénomènes de diffusion de par leur faible masse effective [73]. Au contraire, les trous présentent un temps de transit plus long. Leur épaisseur doit donc être ajustée [41].

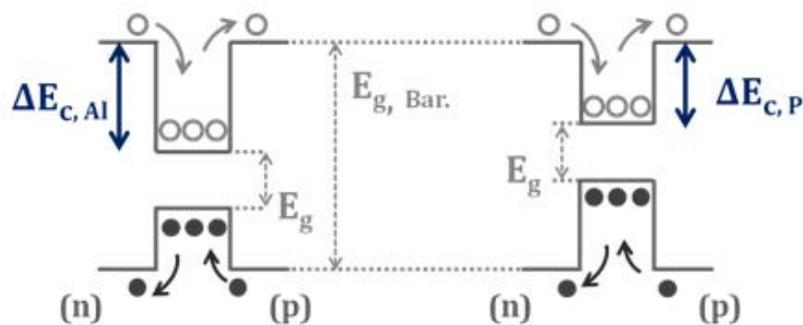


Figure 2.20- Bandgap offset de l'AlGaInAs (gauche) et de l'InGaAsP (droite). $\Delta E_{C,Al} / \Delta E \sim 0,7$; $\Delta E_{C,P} / \Delta E \sim 0,4$ avec $\Delta E = E_{g,bar.} - E_g$.

Plus précisément, nous avons évalué le confinement des porteurs et des trous à l'aide de logiciels développés en interne. Les programmes utilisés sont dédiés au matériau employé. Le tableau 2.6 résume les principales caractéristiques, le schéma 2.21 les illustre. On peut noter, comme espéré, le plus fort confinement des électrons dans les structures en aluminium. Pour des températures entre 15 et 80°C, l'énergie thermique (produit de la constante de Boltzmann k_b par la température T) est

comprise entre 25 et 30 meV. Les confinements ci-dessous étant supérieurs, nos structures semblent adaptées.

Le pic de photoluminescence correspond à la transition E_1H_1 (puits en compression) et est calculé en tenant compte du décalage avec le pic de gain causé par l'absorption du matériau.

	63483 phosphore bande C	63510 phosphore bande C	64138 phosphore bande O	34859X aluminium bande C	35072X aluminium bande O	35071X aluminium bande O
PHOTOLUMINESCENCE	1532 nm	1545 nm	1336 nm	1535 nm	1306 nm	1289 nm
MATERIAU	InGaAsP	InGaAsP	InGaAsP	AlGaInAs	AlGaInAs	AlGaInAs
HAUTEUR BARRIERE	1,17 μm	1,1 μm	1,1 μm	1,1 μm	1,1 μm	1 μm
CONTRAINTTE BARRIERE	Accordé	Accordé	Accordé	Tension	Tension	Tension
CONTRAINTTE QW	Compres- sion	Compres- sion	Compres- sion	Compres- sion	Compres- sion	Compres- sion
CONFINEMENT E_1	~ 90 meV	~ 105 meV	~ 60 meV	~ 190 meV	~ 96 meV	~ 162 meV
CONFINEMENT HH_1	~ 150 meV	~ 200 meV	~ 142 meV	~ 167 meV	~ 117 meV	~ 150 meV

Table 2.6- Confinement des électrons et des trous dans les structures étudiées.

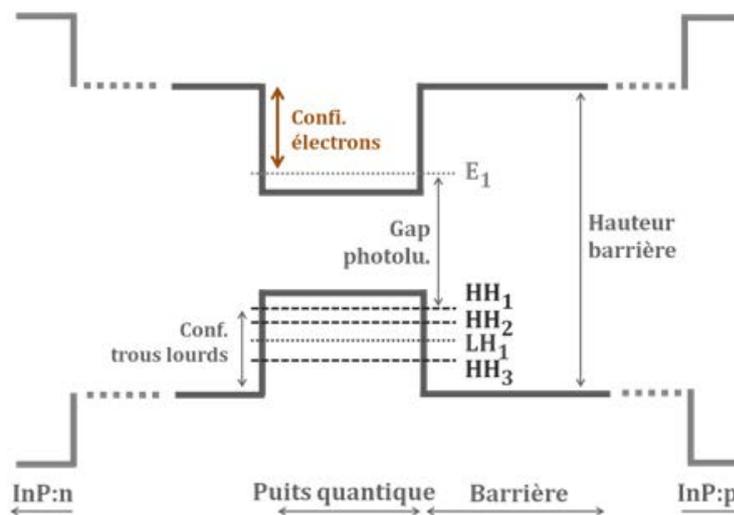


Figure 2.21- Diagramme de bandes de nos structures (sous champ nul).

2.3.4. Structures complètes

La structure complète est composée des couches énumérées dans le tableau 2.7. Bien que le but principal soit de confiner le mode dans les puits, d'autres contraintes s'appliquent. Les pertes par absorption dans l'InP dopé p sont par exemple bien plus importantes que dans l'InP dopé n. Pour un confinement d'une vingtaine de pour cent, elles sont de l'ordre de 14 cm^{-1} et 20 cm^{-1} pour un dopage à 10^{18} cm^{-3} respectivement à $1,3 \text{ }\mu\text{m}$ et $1,5 \text{ }\mu\text{m}$ contre 1 cm^{-1} pour un dopage n [74, 75]. C'est pourquoi on cherche plutôt à attirer le mode vers le substrat via des couches de confinement (*Separate Confinement Heterostructure*, SCH) asymétriques et un dopage légèrement plus faible en proximité de la couche active. L'épaisseur du *spacer*, couche d'InP séparant la seconde SCH de la semelle, doit être assez fine pour permettre le transfert du mode mais on doit disposer d'assez de marge pour arrêter la gravure sèche. Le nombre de puits résulte d'un compromis entre confinement suffisant (plus de puits) et taux de recombinaison rapide (moins de puits).

COUCHE	MATERIAU	EPAISSEUR (nm)	DOPAGE
InP Top	InP	50 ou 200	p ou nid
SCH	InGaAsP ou AlGaInAs	50 à 120	nid
MQW	InGaAsP ou AlGaInAs	~200	nid
SCH	InGaAsP ou AlGaInAs	50 à 150	nid
Spacer	InP	300	n
Semelle	InGaAsP	100 ou 150	n
Buffer	InP	500 à 1000	n
Substrat	InP	-	n

Table 2.7- Structure épitaxiale (nid : non intentionnellement dopé).

Les épaisseurs sont fixées de manière à avoir un confinement optique entre 15 et 20 % dans les puits et un confinement limité dans l'InP:p. Pour ce faire, les structures ont été simulées via le logiciel *Fimmwave* édité par la société *Photon Design*. Les méthodes de résolution sont basées notamment sur les méthodes de différences et d'éléments finis. La connaissance des indices optiques est primordiale pour ces calculs. S'ils sont bien connus pour le quaternaire InGaAsP en bande C [76, 77], nous disposons de moins de recul pour le quaternaire AlGaInAs et pour les longueurs d'ondes à $1,3 \text{ }\mu\text{m}$ [78-80]. Une campagne interne menée à l'aide de mesures ellipsométriques nous a cependant aidés à dégager des règles empiriques. Les indices sont indiqués dans le tableau 2.8.

	E_g (μm)	CONTRAINTE	DOPAGE (cm^{-3})	BANDE C	BANDE O
InP	0,9	-	nid	3,17	3,21
InP:n	0,9	-	1.10^{18}	3,16	3,2
InP:p	0,9	-	1.10^{18}	3,165	3,205
InGaAsP	1,32	+1%	nid	-	3,55
AlGaInAs	1,32	+1%	nid	-	3,6
InGaAsP	1,54	+1%	nid	3,54	-
AlGaInAs	1,54	+1%	nid	3,6	-
InGaAsP	1,1	-	nid	3,293	3,39
InGaAsP:n	1,1	-	1.10^{18}		3,35
InGaAsP	1,17	-	nid	3,33	-
InGaAsP:n	1,17		1.10^{18}	3,32	
AlGaInAs	1	-0,6%	nid	-	3,33
AlGaInAs	1,1	-0,6%	nid	3,373	3,4
AlGaInAs	1,17	-0,6%	nid	3,42	-

Table 2.8- Indice optique des quaternaires AlGaInAs et InGaAsP en fonction de la longueur d'onde, du dopage et du gap matériau (nid : non intentionnellement dopé).

2.3.5. Conception des guides d'onde

Très simple, le RSOA se divise en un guide d'onde et un adaptateur de mode. Ce thème des adaptateurs de mode est un sujet largement publié et maîtrisé en interne depuis une vingtaine d'années [8, 81]. Nous nous sommes donc contentés d'ajuster les dimensions en fonction de nos matériaux afin d'obtenir:

- une transmission maximale ($> 95\%$) entre le guide d'onde formé par la couche active et la semelle (figure 2.22 (a) à (c)) ;
- une dimension de champ lointain du même ordre de grandeur que le diamètre du mode dans la fibre ($\sim 10 \mu\text{m}$ [68]) (figure 2.22 (c)).

Au III-V lab, le ruban est traditionnellement incliné pour diminuer la réflectivité de la facette de sortie. Le signal lumineux sort alors avec un angle déduit de la relation de Snell-Descartes, angle qui sera compensé au montage pour que l'on puisse venir se coupler perpendiculairement à l'embase. Dans cette configuration, le signal sortant de la facette dite miroir (de plus grande réflectivité) est lui aussi incliné. De surcroît, le mode présente une divergence plus grande (45° à 50°) car confiné dans les multi-puits. Or le RSOA est de plus en plus utilisé avec des cavités externes (miroir, réseau de Bragg, anneaux...) avec lesquelles il est couplé par la facette traitée AR. Le signal résultant est alors émis via la facette "miroir". Il nous fallait donc améliorer le couplage à ce niveau. Pour répondre à ces nouvelles exigences et valoriser le composant, nous y avons donc placé un taper. Nous avons aussi

adopté un ruban droit et tilté la facette de sortie via un guide courbé. Le guide droit permet de faciliter la manipulation de la fibre en sortie et augmente la part du mode réfléchi dans le guide. La courbure se calcule soit à l'aide d'une courbe clothoïdale soit à l'aide d'un rayon circulaire. Nous avons choisi la seconde option par souci de simplicité. Elle exige néanmoins un compromis concernant le rayon de courbure. Grand, il réduit les pertes optiques mais allonge la longueur de la transition.

Des lasers Fabry-Pérot de mêmes dimensions que les RSOA ont été implémentés. Ils serviront à mettre en perspectives le comportement singulier des amplificateurs.

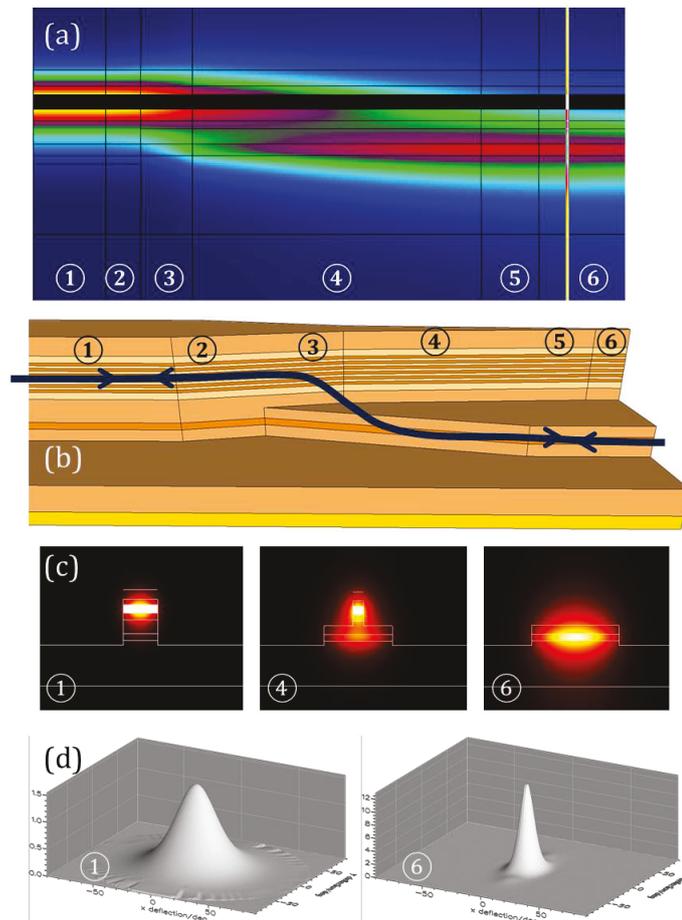


Figure 2.22- Transition du mode des multi-puits vers la semelle (a), (b). Champ proche (c) et champ lointain (d) correspondant à un mode confiné dans le ruban (1), dans la semelle (6) et dans la zone de transition (4).

2.4. Développements technologiques spécifiques

2.4.1. Aluminium

La substitution du phosphore par de l'aluminium modifie les réactions chimiques associées. Nous avons ainsi pu constater une vitesse de gravure plus élevée dans un bain d'acide fluorhydrique (HF). La figure 2.23 illustre la sur-gravure associée. Par la suite nous avons donc adapté les dosages et les temps.

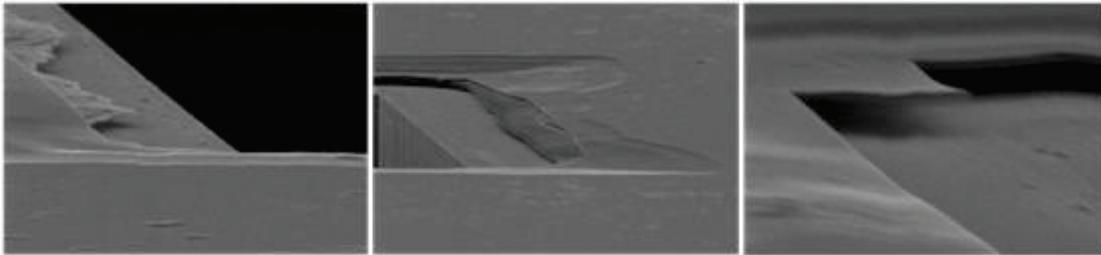


Figure 2.23- Sur gravure de l'aluminium avec de l'acide fluorhydrique.

La gravure plasma de l'AlGaInAs ne présente en revanche pas de distinction majeure. La vitesse de réaction permet un suivi interférométrique précis et le profil de gravure ne montre aucun défaut (figure 2.24).

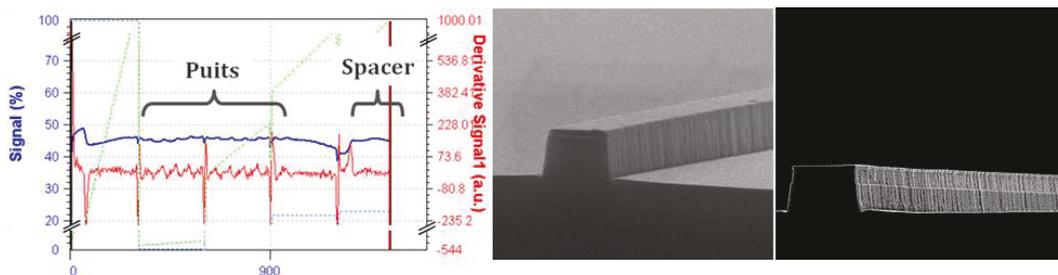


Figure 2.24- Gravure par plasma du ruban (suivi et profil).

Le troisième aspect critique est la reprise épitaxiale. L'oxydation de l'aluminium est susceptible de perturber les directions de recroissance et donc de créer des trous ou des dislocations. Une attention particulière a donc été portée à la préparation de la plaque *ex situ* juste avant l'introduction dans le bâti. La température supérieure à 610°C devrait contribuer à désoxyder les résidus restants. Le profil des rubans en matériau AlGaInAs (figure 2.25) est excellent.

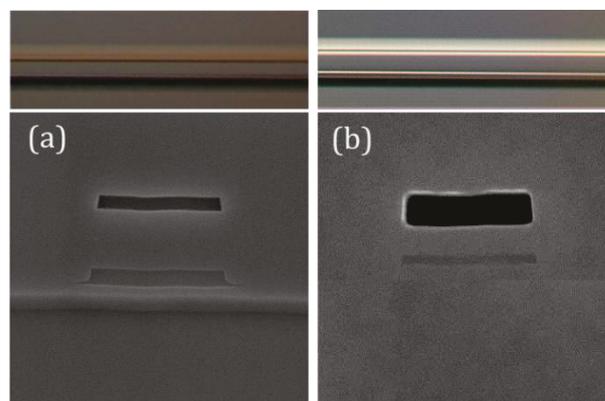


Figure 2.25- Profil des rubans en quaternaire InGaAsP (a) et AlGaInAs (b) après recroissance.

2.4.2. Rendement et robustesse

Dans le procédé standard, la semelle est définie par lithographie contact. Il s'agit d'une étape critique puisqu'un décalage entre les deux rubans détériore le transfert du mode et provoque des réflexions indésirables. Pourtant la dilatation naturelle de la plaque lors du processus implique des écarts par rapport aux dimensions nominales donc des décalages entre les rubans et un rendement par plaque plus faible. Une solution pour contourner ce problème est d'aligner le masque lithographique cellule par cellule, méthode possible avec l'*ebeam* et le stepper. La seconde possibilité demandant un développement technologique plus important, nous nous sommes portés sur l'*ebeam* avec des étapes similaires à celles du ruban actif. L'emploi d'une résine négative eut été plus approprié mais n'était pas disponible. Pour les futurs lots, cette méthode nous permettra d'intégrer des réseaux dans la semelle pour produire, par exemple, des RSOA à gain clampé de type DBR.

Quoique reprenant des étapes génériques, nous avons dû développer une sous-étape technologique. L'alignement cellule par cellule impose des marques carrées de 4 μm contre 20 μm pour un alignement pleine plaque. Pour maintenir un contraste suffisant, nous avons envisagé plusieurs options parmi lesquelles des formes alternatives de carrés (gravure des contours et non plus de l'intérieur), des carrés par dépôt de Molybdène Nickel ou encore des carrés gravés avec des conditions différentes. Dans aucun des cas envisagés, la reconnaissance des marques fut systématique. En conclusion, nous pensons que pour assurer un procédé stable, il sera indispensable d'utiliser des carrés plus grands et le cas échéant avoir recours à la lithographie stepper. Ce dernier cas est d'autant plus intéressant qu'il permettra de s'affranchir du lift-off (avec des résines négatives par exemple).

On trouvera en annexe le développement spécifique de réseaux gravés dans le ruban actif du SOA.

Conclusion du chapitre 2

De par leur simplicité, les cavités auto-alimentées exigent des composants performants et suffisamment génériques pour être bas-coût. Dans ce chapitre, nous avons aperçu l'éventail des possibilités qui s'offraient en termes de conception, de fabrication et de composants. Parmi les solutions basées sur les SOA, EAM ou DFB, nous avons pu constater au chapitre 1 que le RSOA offrait le plus de promesses. Nous avons donc déterminé les paramètres du RSOA qui répondent au mieux aux contraintes d'une cavité auto-alimentée, à avoir : un fort gain, l'effacement et la modulation des données à haut débit. Contraintes qui se traduisent parfois en contradiction. Ainsi l'effacement est favorisé par des structures massives à fort confinement optiques tandis que la modulation l'est par des structures à multi-puits quantiques et confinement modéré. Des comparaisons menées sur une variété déjà disponibles de composants, nous avons dégagé un compromis : le RSOA à multi-puits à 20 % de confinement optique.

L'état de l'art mené sur les RSOA, nous a permis de positionner notre approche, en continuité avec les recherches menées depuis les années 1990 par Alcatel Alsthom Research et le CNET et sensiblement différente de celle adoptée par les laboratoires japonais, héritée des technologies laser. Par rapport au RSOA précédemment évalué comme le meilleur compromis, nous avons exploré d'autres solutions. Nous nous sommes orientés d'une part vers un matériau de meilleur confinement électronique, l'aluminium, et d'autre part vers une bande d'émission de dispersion chromatique négligeable, la bande O. Par ces choix, nous espérons améliorer les performances "brutes" de modulation et de distance de transmission mais aussi de diminuer la consommation globale du composant en réduisant les fuites de courants et en opérant en régime non refroidi ou semi non refroidi. Ces évolutions vont de pair avec une adaptation du procédé technologique tant pour tenir compte des particularités de l'aluminium que pour optimiser ce même procédé afin de gagner en rendement et abaisser les coûts de production.

Dans le chapitre suivant, avant d'estimer l'impact des différentes pistes explorées, nous rappellerons les principaux principes physiques qui régissent le fonctionnement d'un RSOA.

Bibliographie chapitre 2

- [1] C. Kazmierski *et al.*, "High static performance GaInAs-GaInAsP SCH MQW 1.5 μm wavelength buried ridge stripe lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 27, no. 6, pp. 1794-1797, Jun 1991. doi: 10.1109/3.90006
- [2] A. Yariv *Quantum Electronics Third Edition* 1989 John Wiley & Sons
- [3] *Semiconductor Optical Amplifiers* N. K. Dutta & Q. Wang, World Scientific Publishing, 2006
- [4] www.photond.com
- [5] T. Yamamoto *et al.*, "Uncooled 40-Gbps direct modulation of 1.3- μm -wavelength AlGaInAs distributed reflector lasers with semi-insulating buried-heterostructure," *22nd IEEE International Semiconductor Laser Conference*, Kyoto, 2010, pp. 193-194. doi: 10.1109/ISLC.2010.5642646
- [6] S. Gouraud *et al.*, "High speed AlGaInAs multiple-quantum-well electroabsorption modulator buried and planarized with semi-insulating Fe-doped InP grown by chloride assisted LP-MOVPE," *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2005*, 2005, pp. 82-85. doi: 10.1109/ICIPRM.2005.1517425
- [7] K. Lawniczuk *et al.*, "Reflective amplified modulator operating at 40 Gbps up to 85°C as colorless transceiver for optical access networks," *Indium Phosphide and Related Materials (IPRM), 2012 International Conference on*, Santa Barbara, CA, 2012, pp. 116-119. doi: 10.1109/ICIPRM.2012.6403334
- [8] A. Lestra, V. Colson, "Composant optique à semi-conducteur comportant un adaptateur de mode", EP 1005120 A1, Alcatel CIT, 30 mai 2000
- [9] A. Accard, O. Drisse, B. Dagens, H. Sillard, "Optoelectronic component comprising a diffraction grating with a transverse structure", EP 1936412A1, 25 juin 2008
- [10] J.-J. Bernard and M. Renaud, "Semiconductor optical amplifiers", *OE Magazine*, SPIE, September 2001
- [11] C. Caillaud *et al.*, "Integrated SOA-PIN Detector for High-Speed Short Reach Applications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 8, pp. 1596-1601, April 15, 2015. doi: 10.1109/JLT.2015.2389533
- [12] H. Debregeas-Sillard, M. Goix, J. G. Provost, D. Carpentier, J. Landreau and R. Brenot, "16 nm tunable DBR-SOA compatible with 10 Gb/s packet switching," *Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on*, Glasgow, 2005, pp. 745-746 vol.3. doi: 10.1049/cp:20050701
- [13] M. Faugeron *et al.*, "High Power Three-Section Integrated Master Oscillator Power Amplifier at 1.5 μm ," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 13, pp. 1449-1452, July 1, 2015. doi: 10.1109/LPT.2015.2425534
- [14] A. Garreau *et al.*, "10Gbit/s Amplified Reflective Electroabsorption Modulator for Colourless Access Networks," *2006 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings*, 2006, pp. 168-170. doi: 10.1109/ICIPRM.2006.1634139
- [15] R. Bonk, "linear and nonlinear semiconductor optical amplifiers for next generation optical networks", PhD dissertation, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2013
- [16] L. Schares *et al.*, "Etched-facet semiconductor optical amplifiers for gain-integrated photonic switch fabrics," *Optical Communication (ECOC), 2015 European Conference on*, Valencia, 2015, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2015.7341614
- [17] Y. Suzaki, K. Magari, Y. Kondo, Y. Kawaguchi, Y. Kadota and K. Yoshino, "High-gain array of semiconductor optical amplifier integrated with bent spot-size converter (BEND SS-SOA)," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 11, pp. 1745-1750, Nov 2001. doi: 10.1109/50.964076
- [18] H. Wang *et al.*, "Temperature Independent Optical Amplification in Uncooled Quantum Dot Optical Amplifiers," *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on*, San Diego, CA, 2008, pp. 1-3. doi: 10.1109/OFC.2008.4528575
- [19] <http://www.innolume.com/products/SOA.htm>
- [20] <http://www.kamelian.com/>
- [21] http://www.inphenix.com/Semiconductor_Optical_Amplifiers.asp
- [22] <http://www.optilab.com/products/category/soa/>

- [23] <http://www.aeoncorporation.com/>
- [24] https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2105
- [25] M. A. Newkirk *et al.*, "1.5 μm multiquantum-well semiconductor optical amplifier with tensile and compressively strained wells for polarization-independent gain," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 406-408, April 1993. doi: 10.1109/68.212680
- [26] K. Magari, M. Okamoto, Y. Suzuki, K. Sato, Y. Noguchi and O. Mikami, "Polarization-insensitive optical amplifier with tensile-strained-barrier MQW structure," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 30, no. 3, pp. 695-702, Mar 1994. doi: 10.1109/3.286156
- [27] C. Holtmann, P. A. Besse, T. Brenner and H. Melchior, "Polarization independent bulk active region semiconductor optical amplifiers for 1.3 μm wavelengths," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 343-345, March 1996. doi: 10.1109/68.481111
- [28] C. Holtmann, R. Dall'Ara, P. - Besse, D. Sakellariou, W. Hunziker, and H. Melchior, "Reflective Semiconductor Optical Amplifier at 1.3 μm Wavelengths for Customer Connection in Optical Access Networks," in *Optical Amplifiers and Their Applications*, R. Jopson, K. Stubkjaer, and M. Suyama, eds., Vol. 5 of OSA Trends in Optics and Photonics Series (Optical Society of America, 1996), paper SD3.
- [29] L. F. Tiemeijer, P. J. A. Thijs, T. van Dongen, J. J. M. Binsma, E. J. Jansen, and S. Walczyk, "33 dB Fiber to Fiber Gain +13 dBm Fiber Saturation Power Polarization Independent 1310 nm MQW Laser Amplifiers," in *Optical Amplifiers and Their Applications*, Vol. 18 of 1995 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 1995), paper PD1.
- [30] L. F. Tiemeijer *et al.*, "High-gain 1310-nm reflective semiconductor optical amplifiers with low-gain uncertainty," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 37-39, Jan. 1997. doi: 10.1109/68.554473
- [31] Lealman-EL94n11 I. F. Lealman, L. J. Rivers, M. J. Harlow, S. D. Perrin and M. J. Robertson, "1.561- μm InGaAsP/InP tapered active layer multiquantum well laser with improved coupling to cleaved singlemode fibre," in *Electronics Letters*, vol. 30, no. 11, pp. 857-859, 26 May 1994. doi: 10.1049/el:19940570
- [32] I. F. Lealman, L. J. Rivers, M. J. Harlow and S. D. Perrin, "InGaAsP/InP tapered active layer multiquantum well laser with 1.8 dB coupling loss to cleaved singlemode fibre," in *Electronics Letters*, vol. 30, no. 20, pp. 1685-1687, 29 Sep 1994. doi: 10.1049/el:19941156
- [33] A. E. Kelly, I. F. Lealman, L. J. Rivers, S. D. Perrin and M. Silver, "Polarisation insensitive, 25 dB gain semiconductor laser amplifier without antireflection coatings," in *Electronics Letters*, vol. 32, no. 19, pp. 1835-1836, 12 Sep 1996. doi: 10.1049/el:19961220
- [34] I. F. Lealman, A. E. Kelly, L. J. Rivers, S. D. Perrin and R. Moore, "Improved gain block for long wavelength (1.55 μm) hybrid integrated devices," in *Electronics Letters*, vol. 34, no. 23, pp. 2247-2249, 12 Nov 1998. doi: 10.1049/el:19981557
- [35] Borghesani-OFC2003 A. Borghesani *et al.*, "High saturation power (>16.5 dBm) and low noise figure (<6 dB) semiconductor optical amplifier for C-band operation," *Optical Fiber Communications Conference, 2003. OFC 2003*, 2003, pp. 534-536 vol.2. doi: 10.1109/OFC.2003.1248392
- [36] A. E. Kelly *et al.*, "High-Performance Semiconductor Optical Amplifier Modules at 1300 nm," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 24, pp. 2674-2676, Dec.15, 2006. doi: 10.1109/LPT.2006.887883
- [37] A. E. Kelly *et al.*, "High performance polarisation independent reflective semiconductor optical amplifiers in the S, C, and L bands," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 6, pp. 943-948, Aug. 2010. doi: 10.1109/JSAC.2010.100818
- [38] H. C. Shin *et al.*, "Reflective SOAs optimized for 1.25 Gbit/s WDM-PONs," *Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004. The 17th Annual Meeting of the IEEE*, 2004, pp. 308-309 Vol.1. doi: 10.1109/LEOS.2004.1363234
- [39] K. Y. Cho, Y. Takushima and Y. C. Chung, "Enhanced Operating Range of WDM PON Implemented by Using Uncooled RSOAs," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 18, pp. 1536-1538, Sept.15, 2008. doi: 10.1109/LPT.2008.928835
- [40] K. Morito, M. Ekawa, T. Watanabe and Y. Kotaki, "High-output-power polarization-insensitive semiconductor optical amplifier," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 176-181, Jan 2003. doi: 10.1109/JLT.2003.808643

- [41] K. Morito, S. Tanaka, S. Tomabechi and A. Kuramata, "A broad-band MQW semiconductor optical amplifier with high saturation output power and low noise figure," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 5, pp. 974-976, May 2005. doi: 10.1109/LPT.2005.845733
- [42] S. Tanaka, S. Tomabechi, M. Ekawa and K. Morito, "A high saturation output power (+22 dBm) polarization insensitive semiconductor optical amplifier," *2005 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings*, Sydney, NSW, 2005, pp. 794-795. doi: 10.1109/LEOS.2005.1548247
- [43] S. Tanaka, A. Uetake, S. Yamazaki, M. Ekawa and K. Morito, "Polarization-Insensitive GaInNAs-GaInAs MQW-SOA With Low Noise Figure and Small Gain Tilt Over 90-nm Bandwidth (1510-1600 nm)," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 15, pp. 1311-1313, Aug.1, 2008. doi: 10.1109/LPT.2008.926916
- [44] S. Tanaka *et al.*, "Compact, very-low-electric-power-consumption (0.84 W) 1.3- μ m optical amplifier module using AlGaInAs MQW-SOA," *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Torino, 2010, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2010.5621120
- [45] S. Tanaka, A. Uetake, S. Okumura, M. Ekawa, G. Nakagawa and K. Morito, "Uncooled, polarization-insensitive AlGaInAs MQW-SOA module operable up to 75°C with constant current," *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Geneva, 2011, pp. 1-3.
- [46] W. Zhan, T. Tanemura, S. Yamauchi, M. Mukaikubo and Y. Nakano, "Uncooled (25-50 °C) operation of self-seeded RSOA for low-cost colorless WDM-PON transmitter," *Optical Communication (ECOC), 2015 European Conference on*, Valencia, 2015, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2015.7341972
- [47] P. Zhou, W. Zhan and T. Tanemura, "Two-Section RSOA with Enhanced Modulation Cancelling Effect for Self-Seeded Colorless WDM Transmitter," *Optical Communication (ECOC), 2016 European Conference on*, Düsseldorf, 2016
- [48] G. Giannoulis *et al.*, "Dilute Nitride SOAs for high-speed data processing in variable temperature conditions," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015*, Los Angeles, CA, 2015, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2015.W2A.20
- [49] B. Mersali *et al.*, "1.55 μ m high-gain polarisation-insensitive semiconductor travelling wave amplifier with low driving current," in *Electronics Letters*, vol. 26, no. 2, pp. 124-125, 18 Jan. 1990. doi: 10.1049/el:19900085
- [50] P. Doussiere *et al.*, "1.55 μ m polarisation independent semiconductor optical amplifier with 25 dB fiber to fiber gain," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 170-172, Feb. 1994. doi: 10.1109/68.275418
- [51] P. Doussiere, F. Pommerau, D. Leclerc, R. Ngo, M. Goix, T. Fillion, P. Bousselet, and G. Laube, "Polarization independent 1550 nm semiconductor optical amplifier packaged module with 29 dB fiber to fiber gain.," in *Optical Amplifiers and Their Applications*, Vol. 18 of 1995 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 1995), paper FA4.
- [52] J. Y. Emery *et al.*, "New, process tolerant, high performance 1.55 μ m polarization insensitive semiconductor optical amplifier based on low tensile bulk GaInAsP," *Optical Communication, 1996. ECOC '96. 22nd European Conference on*, Oslo, Norway, 1996, pp. 165-168 vol.3.
- [53] J. Y. Emery *et al.*, "High performance 1.55 μ m polarisation-insensitive semiconductor optical amplifier based on low-tensile-strained bulk GaInAsP," in *Electronics Letters*, vol. 33, no. 12, pp. 1083-1084, 5 Jun 1997.
- [54] J. Y. Emery, B. Lavigne, C. Porcheron, C. Janz, F. Dorgeuille, F. Pommereau, F. Gaborit, I. Guillemot-Neubauer, and M. Renaud, "Two-section Semiconductor Optical Amplifier power equaliser with 8dBm Output Saturation Power for 10Gbit/s Applications," in *Optical Amplifiers and their Applications*, S. Kinoshita, J. Livas, and G. van den Hoven, eds., Vol. 30 of Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America, 1999), paper FB3.
- [55] A. Ougazzaden, D. Sigogne, A. Mircea, E. V. K. Rao, A. Ramdane and L. Silvestre, "Atmospheric pressure MOVPE growth of high performance polarisation insensitive strain compensated MQW InGaAsP/InGaAs optical amplifier," in *Electronics Letters*, vol. 31, no. 15, pp. 1242-1244, 20 Jul 1995. doi: 10.1049/el:19950827
- [56] A. Godefroy *et al.*, "1.55- μ m polarization-insensitive optical amplifier with strain-balanced superlattice active layer," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, no. 5, pp. 473-475, May 1995. doi: 10.1109/68.384514
- [57] D. Sigogne *et al.*, "1.55 μ m polarisation insensitive InGaAsP strained MQW optical amplifier integrated with short spot-size converters," in *Electronics Letters*, vol. 32, no. 15, pp. 1403-1405, 18 Jul 1996. doi: 10.1049/el:19960904

- [58] N. Buldawoo, S. Mottet, F. Le Gall, D. Sigogne, D. Meichenin and S. Chelles, "A semiconductor laser amplifier-reflector for the future FTTH applications," *Integrated Optics and Optical Fibre Communications, 11th International Conference on, and 23rd European Conference on Optical Communications (Conf. Publ. No.: 448)*, Edinburgh, 1997, pp. 196-199 vol.2. doi: 10.1049/cp:19971450
- [59] F. Pommereau *et al.*, "Realisation of semiconductor optical amplifiers with homogeneous carrier density and low noise factor," *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2005*, 2005, pp. 102-105. doi: 10.1109/ICIPRM.2005.1517430
- [60] R. Brenot *et al.*, "High modulation bandwidth reflective SOA for optical access networks," *Optical Communication (ECOC), 2007 33rd European Conference and Exhibition of*, Berlin, Germany, 2007, pp. 1-2. doi: 10.1049/ic:20070372
- [61] G. de Valicourt *et al.*, "First 100 km uplink transmission at 2.5 Gbit/s for hybrid WDM/TDM PON based on optimized bi-electrode RSOA," *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Torino, 2010, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2010.5621160
- [62] G. de Valicourt *et al.*, "High Gain (30 dB) and High Saturation Power (11 dBm) RSOA Devices as Colorless ONU Sources in Long-Reach Hybrid WDM/TDM-PON Architecture," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 3, pp. 191-193, Feb.1, 2010. doi: 10.1109/LPT.2009.2038173
- [63] G. de Valicourt *et al.*, "Chirp Reduction in Directly Modulated Multi-Electrode RSOA Devices in Passive Optical Networks," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 19, pp. 1425-1427, Oct.1, 2010. doi: 10.1109/LPT.2010.2062496
- [64] G. de Valicourt, D. Make, C. Fortin, A. Enard, F. Van Dijk and R. Brenot, "10 Gbit/s modulation of Reflective SOA without any electronic processing," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Los Angeles, CA, 2011, pp. 1-3.
- [65] R. Brenot *et al.*, "Experimental study of the impact of optical confinement on saturation effects in SOA," *OFC/NFOEC Technical Digest. Optical Fiber Communication Conference, 2005.*, 2005, pp. 3 pp. Vol. 1-. doi: 10.1109/OFC.2005.192541
- [66] J.-P. Hauet, "Le rôle des Laboratoires de Marcoussis au sein du groupe CGE, Centre de la recherche sur la culture technique", 1988
- [67] G. de Valicourt *et al.*, "Radio-Over-Fiber Access Network Architecture Based on New Optimized RSOA Devices With Large Modulation Bandwidth and High Linearity," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 11, pp. 3248-3258, Nov. 2010. doi: 10.1109/TMTT.2010.2078910
- [68] Corning SMF-28, Ultra Optical Fiber, Datasheet, 2014. <http://www.corning.com/>
- [69] W. Kobayashi *et al.*, "50-Gb/s Direct Modulation of a 1.3- μm InGaAlAs-Based DFB Laser With a Ridge Waveguide Structure," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1500908-1500908, July-Aug. 2013. doi:10.1109/JSTQE.2013.2238509
- [70] K. Otsubo *et al.*, "1.3- μm AlGaInAs Multiple-Quantum-Well Semi-insulating Buried-Heterostructure Distributed-Feedback Lasers for High-Speed Direct Modulation," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, no. 3, pp. 687-693, May-june 2009. doi: 10.1109/JSTQE.2009.2015194
- [71] A. Uetake, K. Otsubo, M. Matsuda, S. Okumura, M. Ekawa and T. Yamamoto, "40-Gbps direct modulation of 1.55- μm AlGaInAs semi-insulating buried-heterostructure distributed reflector lasers up to 85°C," *LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. LEOS '09. IEEE*, Belek-Antalya, 2009, pp. 839-840. doi: 10.1109/LEOS.2009.5343421
- [72] Chung-En Zah *et al.*, "High-performance uncooled 1.3- μm Al_xGa_yIn_{1-x-y}As/InP strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 511-523, Feb 1994. doi: 10.1109/3.283799
- [73] G. P. Agrawal, N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, 2nd Edition, Kluwer academic publisher 1993
- [74] Variation of intervalence band absorption with hole concentration in p-type InP, Casey, H. C. and Carter, P. L., *Applied Physics Letters*, 44, 82-83 (1984), DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.94561>
- [75] A.A. Ballman, A.M. Glass, R.E. Nahory, H. Brown, Double doped low etch pit density InP with reduced optical absorption, *Journal of Crystal Growth*, Volume 62, Issue 1, 1983, Pages 198-202, ISSN 0022-0248, [http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248\(83\)90025-8](http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248(83)90025-8).

- [76] Material parameters of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ and related binaries, Adachi, Sadao, *Journal of Applied Physics*, 53, 8775-8792 (1982), DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.330480>
- [77] Refractive index of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ layers and InP in the transparent wavelength region Broberg, B. and Lindgren, S., *Journal of Applied Physics*, 55, 3376-3381 (1984), DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.333377>
- [78] C Grasse and G Boehm and M Mueller and T Gruendl and R Meyer and M-C Amann, "Empirical modeling of the refractive index for (AlGaIn)As lattice matched to InP", *Semiconductor Science and Technology*, vol. 25, no. 4, 2010
- [79] S. R. Selmic *et al.*, "Design and characterization of 1.3- μm AlGaInAs-InP multiple-quantum-well lasers," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 340-349, Mar/Apr 2001. doi: 10.1109/2944.954148
- [80] S. R. Jin *et al.*, "Modal refractive index of 1.3 μm InGaAsP, AlGaInAs and GaInNAs semiconductor lasers under high hydrostatic pressure," in *Electronics Letters*, vol. 38, no. 7, pp. 325-327, 28 Mar 2002. doi: 10.1049/el:20020217
- [81] H. Bissessur, C. Graver, O. Le Gouezigou, G. Michaud and F. Gaborit, "Ridge laser with spot-size converter in a single epitaxial step for high coupling efficiency to single-mode fibers," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 9, pp. 1235-1237, Sept. 1998. doi: 10.1109/68.705601
- [82] H. Kogelnik, E. Ippen, A. Dienes and C. Shank, "Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 373-379, Mar 1972. doi: 10.1109/JQE.1972.1076964
- [83] A. Yariv, T. Nussmeier and J. Kiefer, "Frequency response of intracavity laser coupling modulation," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 9, no. 6, pp. 594-597, Jun 1973. doi: 10.1109/JQE.1973.1077555
- [84] W. Streifer, D. Scifres and R. Burnham, "Coupling coefficients for distributed feedback single- and double-heterostructure diode lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 11, no. 11, pp. 867-873, Nov 1975. doi: 10.1109/JQE.1975.1068539
- [85] L. A. Coldren, S. W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits", John Wiley & Sons, 1995
- [86] G. de Valicourt *et al.*, "Radio-Over-Fiber Access Network Architecture Based on New Optimized RSOA Devices With Large Modulation Bandwidth and High Linearity," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 11, pp. 3248-3258, Nov. 2010. doi: 10.1109/TMTT.2010.2078910
- [87] N. Cheng, L. Zhou, X. Liu and F. J. Effenberger, "Reflective Crosstalk Cancellation in Self-Seeded WDM PON for Mobile Fronthaul/Backhaul," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 8, pp. 2056-2063, April 15, 2016. doi: 10.1109/JLT.2015.2505150
- [88] S. Y. Kim, S. B. Jun, Y. Takushima, E. S. Son, and Y. C. Chung, "Enhanced performance of RSOA-based WDM PON by using Manchester coding," *J. Opt. Netw.* 6, 624-630 (2007)
- [89] E. Conforti, C. M. Gallep, S. H. Ho, A. C. Bordonalli and Sung-Mo Kang, "Carrier reuse with gain compression and feed-forward semiconductor optical amplifiers," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 1, pp. 77-81, Jan 2002. doi: 10.1109/22.981250
- [90] H. Takesue and T. Sugie, "Wavelength channel data rewrite using saturated SOA modulator for WDM networks with centralized light sources," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 11, pp. 2546-2556, Nov. 2003. doi: 10.1109/JLT.2003.819532
- [91] Napoleão S. Ribeiro, André L. R. Cavalcante, Cristiano M. Gallep, and Evandro Conforti, "Optical amplitude modulation extinction by a deep saturated ultra-long semiconductor optical amplifier," *Opt. Express* 18, 27298-27305 (2010)
- [92] N. S. Ribeiro, C. M. Gallep and E. Conforti, "Limits on High Bit Rate Wavelength Reuse Using Ultralong Semiconductor Optical Amplifier," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 20, pp. 3229-3236, Oct. 15, 2013. doi: 10.1109/JLT.2013.2280118
- [93] M. L. Nielsen *et al.*, "40 Gbit/s standard-mode wavelength conversion in all-active MZI with very fast response," in *Electronics Letters*, vol. 39, no. 4, pp. 385-386, 20 Feb 2003. doi: 10.1049/el:20030267
- [94] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. Lykke Danielsen and K. E. Stubkjaer, "All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 942-954, Jun 1996. doi: 10.1109/50.511594

[95] A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić and D. M. Gvozdić, "Numerical Study of the Small-Signal Modulation Bandwidth of Reflective and Traveling-Wave SOAs," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 13, pp. 2758-2764, July 1, 2015. doi: 10.1109/JLT.2015.2412252

[64] G. de Valicourt, D. Make, C. Fortin, A. Enard, F. Van Dijk and R. Brenot, "10 Gbit/s modulation of Reflective SOA without any electronic processing," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Los Angeles, CA, 2011, pp. 1-3.

[96] J. Mork, A. Mecozzi and G. Eisenstein, "The modulation response of a semiconductor laser amplifier," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 3, pp. 851-860, May/June 1999. doi: 10.1109/2944.788459

[97] J. Jacquet, M. Faugeron, Y. Abner, M. Choffla, F. Van Dijk and R. Brenot, "Thermal dissipation in InP based optical lasers and amplifiers," *IPRM 2011 - 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, Berlin, 2011, pp. 1-4.

CHAPITRE 3

ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSIQUE DU RSOA

La modulation directe de la source et plus encore, l'intégration dans une cavité auto-alimentée imposent un comportement physique singulier. Fort gain, rapidité et efficacité sont autant de critères à conjuguer avec la simplicité du RSOA. L'étude des propriétés du composant en fonction des paramètres clefs que sont la structure, le confinement et la longueur a dégagé un compromis : le RSOA multi-puits quantiques à 20 % de confinement optique. Transmises à nos partenaires, les bonnes performances des premières générations ont révélé des attentes auxquelles les nouveaux RSOA doivent aujourd'hui répondre. Pourtant la compréhension de ce composant reste encore partielle. Sans résonance et sans cohérence temporelle, la théorie des lasers à semiconducteurs éprouvée depuis des dizaines d'années n'est que partiellement applicable. En particulier, la réponse électro-optique du RSOA reste encore un sujet d'étude dont les conclusions pourraient augmenter le débit nominal du composant.

Au cours de cette thèse, nous nous sommes attachés à distinguer les singularités du RSOA au regard du laser. Nous avons ainsi couplé caractérisations expérimentales et théorie afin de comprendre ce qui fait qu'un RSOA est "bon" ou "mauvais".

Dans ce chapitre, nous commencerons par donner une définition du RSOA à l'aide d'un modèle simplifié et détaillerons les phénomènes à prendre en compte. Puis nous nous arrêterons sur deux aspects primordiaux : la problématique des RSOA à fort gain, sensibles aux réflexions parasites et celle des fuites de porteurs qui augmentent la consommation du système. Dans cette recherche du composant idéal, nous évaluerons l'impact du matériau et de la bande d'émission pour en déduire les limites physiques du RSOA.

3.1. Physique du RSOA

3.1.1. Modèle

Les premières approches théoriques concernant le SOA sont apparues entre le milieu des années 1980 et le milieu des années 1990 [1, 2, 15-17] mais ce sont les travaux de M. J. Connelly [3] au début des années 2000 qui font référence. Bien que depuis, plusieurs variantes se soient développées [18-20], le RSOA n'a fait l'objet d'études spécifiques qu'une dizaine d'années plus tard [7, 10, 21].

Comme dans une approche laser, les grandeurs principales sont les densités de porteurs et de photons. Elles sont décrites par les équations d'état dont Coldren [22] donne une expression qualitative. La variation de la densité de porteurs, notée n (m^{-3}), au cours du temps correspond à la différence entre les porteurs effectivement injectés et les porteurs qui se sont recombinés (équation 3.1).

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_{gen} - R_{rec} \quad (\text{éq. 3.1})$$

G_{gen} ($\text{m}^{-3}.\text{s}^{-1}$) est le taux de porteurs injectés ($\text{m}^{-3}.\text{s}^{-1}$), R_{rec} ($\text{m}^{-3}.\text{s}^{-1}$) est le taux de recombinaison des électrons par unité de volume. On distingue les recombinaisons non radiatives des recombinaisons

radiatives, elles-mêmes catégorisées en recombinaisons stimulées et recombinaisons spontanées. Nous allons les détailler dans cette partie.

La variation de la densité de photons, notée s (m^{-3}), s'exprime comme la différence entre les photons émis et couplés au guide pendant un temps Δt avec les photons perdus par absorption et diffusion (équation 3.2).

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \Gamma R_{rad} - \frac{s}{\tau_s} \quad (\text{éq. 3.2})$$

Γ est le facteur de confinement optique, il représente la proportion du mode guidé dans la zone active par rapport au mode total qui peut s'étendre dans les couches de supérieures et inférieures. R_{rad} ($/m^3.s$) est le taux de recombinaisons radiatives, τ_s (s) est le temps de vie d'un photon.

Passée cette approche phénoménologique, l'expression de chacun des termes précédents implique des choix et des hypothèses.

Injection des porteurs

Une première hypothèse largement établie est une injection uniforme des porteurs le long du composant. Dans la pratique, cela dépend de la connexion entre le composant et l'embase. Dans notre cas, plusieurs fils les relie, ce qui rend l'hypothèse acceptable. La seconde hypothèse que nous faisons est plus forte. On considère en effet que tous les porteurs en sortie de la source de courant sont injectés dans la zone active. Nous négligeons donc les pertes à travers l'électrode et les chemins de décrits au chapitre précédent (figure 2.19). Nous avons pu constater expérimentalement que cette hypothèse était fautive, notamment à haute température. Une analyse détaillée des courants de fuite a été réalisée par Dutta et al. [23]. Cette supposition ne gêne cependant pas la compréhension globale du composant et décrit un cas idéal. G_{gen} s'exprime en fonction du courant I (A), du volume de la zone active V (m^3) et de la charge élémentaire d'un électron q (équation 3.3).

$$G_{gen} = \frac{I}{qV} \quad (\text{éq. 3.3})$$

Dans nos applications, le RSOA est directement modulé. On devra donc prendre en compte la variation temporelle du courant, alors noté $I(t)$.

Fuites de porteurs à travers l'hétérojonction

Les fuites de porteurs à travers l'hétérojonction engendrent d'importantes pertes à hautes températures et pour de faibles barrières. Déduites des équations de dérive diffusion [24], une expression approchée donne une dépendance en la densité de porteurs cubique pour le courant de diffusion et à la puissance 5 pour le courant de dérive [25] (équation 3.4). Olshansky [25] a observé qu'en fonction du dopant et du niveau de dopage, un phénomène dominait l'autre. Dans notre cas, nous ne considérerons que le courant de diffusion.

$$R_{leak} = \begin{cases} D_{leak} n^{3,5} & \text{diffusion} \\ D_{leak} n^{5,5} & \text{dérive} \end{cases} \quad (\text{éq. 3.4})$$

Recombinaisons non radiatives

Défauts et impuretés forment des pièges pour les trous et les électrons qui se recombinent alors de manière non radiative. Ils sont présents dans le matériau car inhérents à la croissance épitaxiale, et aux interfaces, notamment entre ruban et reprise. Théorisées par Shockley et Read ainsi que par Hall, ces recombinaisons dépendent linéairement de la densité de porteurs (équation 3.5). La constante A_{SHR} ($/s$)

est une approximation dont la valeur n'est pas connue avec exactitude. Exprimée de manière rigoureuse, elle tient compte des mobilités des trous et des électrons.

$$R_{SHR} = A_{SHR} n \quad (\text{éq. 3.5})$$

Le terme de recombinaisons Auger regroupe des transitions bande à bande impliquant, dans le cas général, la collision entre deux électrons ou deux trous, dont l'énergie libérée entraîne le transfert d'un des deux porteurs vers une bande (de conduction ou de valence) d'énergie plus élevée. Au total, quatre particules (trois électrons et un trou ou un électron et trois trous) sont concernées. Dutta et Nelson [26] ont très largement contribué à la compréhension de ces phénomènes. Ils ont, en outre, eu recours à la statistique de Fermi pour obtenir une expression du taux de chaque recombinaison. Mais l'expression la plus courante est exprimée empiriquement en supposant une dépendance cubique à la densité de porteurs ainsi que des densités de trous et d'électrons égales (zone active non dopée intentionnellement) (équation 3.6).

$$R_{Auger} = C_{Auger} n^3 \quad (\text{éq. 3.6})$$

Dutta et Nelson ont aussi décrit qualitativement l'importance de la température et du *bandgap* sur l'Auger. Ils évoquent une "énergie de seuil", quantité nécessaire minimale pour qu'un porteur puisse aller vers un niveau de plus grande énergie. Si on note E_T cette énergie, et avec plusieurs simplifications [22, 26], le temps de vie des porteurs associés à ces recombinaisons est proportionnel à $\exp(-(E_T - E_g)/kT)$ avec k la constante de Boltzmann, T la température. Ainsi, il apparaît de manière simple que les recombinaisons Auger bande à bande augmentent avec la température et diminuent avec le *bandgap*. Autrement dit, l'Auger bande à bande sera plus important pour des températures et des longueurs d'onde élevées. Il arrive parfois qu'un phonon assiste ces transitions. Il absorbe alors une partie de l'énergie libérée par la collision entre deux porteurs, ce qui relâche la contrainte imposée par la loi de conservation de l'énergie. Celle-ci impliquait une énergie de seuil qui n'a plus lieu d'être avec ce quatrième élément. La dépendance en température est moindre.

Par la suite, de nombreux papiers se sont attachés à caractériser expérimentalement ces recombinaisons. Nous les détaillerons au paragraphe 3.3.

Recombinaison spontanée

La modélisation des recombinaisons spontanées est sans doute l'élément le plus discriminant entre tous les modèles existants. Leur domaine de validité se restreint souvent aux quelques nanomètres adjacents à la longueur d'onde injectée, validité suffisante pour les applications citées. Or, le spectre d'ASE (Amplified Spontaneous Emission), convolution de l'émission spontanée par le gain matériau, contient de précieuses informations telles que la largeur optique, le *ripple*, l'écart entre les pseudo-niveaux de Fermi, une estimation du gain... Représenter fidèlement par un modèle ce que l'on mesure classiquement sur l'analyseur de spectre optique serait donc très utile.

Une première approche, simpliste, consiste à approcher le taux de recombinaisons spontanées par l'équation (3.7). Cette expression est suffisante pour décrire l'évolution du nombre de porteurs au cours du temps mais est trop restreinte pour l'évolution de la densité de photons dont le principal paramètre, la longueur d'onde (ou la fréquence), est absent. De nombreux papiers, théoriques et expérimentaux ont cherché à établir une analyse plus fine de l'émission spontanée dans les semiconducteurs, lasers comme amplificateurs [27-30]. Il existe deux descriptions indépendantes l'une de l'autre: l'analyse quantique, déterministe, et une analyse stochastique dite semiclassique [31, 32]. Cette dernière approche, utilisée dans certains modèles de RSOA [10, 12, 33, 35], revient à traiter

l'émission spontanée comme un bruit blanc gaussien. Une source dite de Langevin est ajoutée aux équations de propagation [22, 34]. L'approche quantique est plus fréquemment adoptée [3, 7, 20]. Elle relie l'ASE au gain matériau d'un amplificateur idéal (sans pertes et sans saturation). C. H. Henry a démontré que ces deux approches donnent des résultats similaires et peuvent s'unifier [34]. Malgré ces tendances, il n'existe pas de définition commune. Chaque modèle possède sa propre expression. On se contentera donc de noter par $r_{sp}(v_j, n)$ le taux de recombinaison spontanée pour une fréquence v_j donnée. r_{sp} dépend aussi du gain et donc de la densité de porteurs. Le calcul du taux total $r_{sp}(n)$ s'effectue en sommant les r_{sp} sur toutes les énergies de photons. Pour simplifier son calcul, il est possible de discrétiser cette somme en considérant les r_{sp} constants sur une bande Δv autour de v_j (équation 3.8). Ce taux se retrouve directement dans l'équation 3.2 au facteur β près. β , appelé coefficient d'émission spontanée, représente la fraction des photons émis spontanément qui se couplent effectivement au guide d'onde relativement à la quantité des photons émis spontanément dans toutes les directions. Il est lié à la longueur d'onde λ émise. Définie en 1977 par Suematsu [36] puis par Petermann en 1979 [37], son expression et les paramètres à inclure font l'objet de débats [3, 15, 38-40]. Nous nous satisferons donc ici de la définition qualitative. Dans l'équation 3.9 qui décrit le nombre de photons émis spontanément en un point de l'espace, le facteur 1/2 tient compte des deux sens de propagation.

$$R_{rad} = B_{rad} n^2 \quad (\text{éq. 3.7})$$

$$R_{sp}(n) = \frac{1}{\Delta v} \int r_{sp}(v, n) dv = \sum_{j=1 \dots N_{ASE} \text{ sections}} r_{sp}(v_j, n) \Delta v \quad (\text{éq. 3.8})$$

$$\frac{\partial s_{SE}^+(z)}{\partial z} = \frac{\beta}{2} R_{sp}(n) \quad (\text{éq. 3.9})$$

Recombinaison stimulée

L'émission stimulée est la recombinaison d'un électron avec un trou sous l'effet d'un photon incident. Un second photon, identique au photon incident, est émis. Le gain matériau décrit la capacité du milieu à amplifier le signal incident, c'est à dire sa capacité à fournir un grand nombre de photons identiques au photon initial. En particulier, la principale fonction recherchée dans un SOA utilisé pour l'amplification, ou un RSOA en configuration injectée, est de fournir du gain pour que la puissance de sortie puisse satisfaire le budget optique de la liaison. Soit s_{sign} la densité volumique de photons du signal incident. s_{sign} est directement relié au champ de l'onde progressive $E(z, t)$ qui se propage dans le milieu (équation 3.10). Dans certains cas [3], la racine carrée du module est normalisée pour être homogène au taux de photons.

$$s_{sign}^+(z, t) = \frac{|E_{sign}^+(z, t)|^2}{\hbar \omega A_{eff} v_g} \quad (\text{éq. 3.10})$$

\hbar est la constante de Planck réduite (J.s), ω la fréquence angulaire de l'onde du signal (Hz), A_{eff} l'aire effective du mode (m^2) et v_g la vitesse de groupe ($m.s^{-1}$).

La variation spatiale de la densité de photons du signal est décrite par l'expression 3.11. La variation de la densité de porteurs par émission stimulée en est l'opposé (équation 3.12). Si plusieurs longueurs d'ondes sont injectées ou que la source incidente est large bande (> 10 nm), l'équation 3.12 devrait, en toute rigueur, être discrétisée [3] en fonction de λ . En effet le gain matériau dépend de la longueur d'onde.

$$\pm \frac{\partial s_{sign}^{\pm}(z)}{\partial z} = g_{milieu}(n, \lambda) s_{sign}^{\pm}(z) \quad (\text{éq. 3.11})$$

$$\frac{\partial n_{stim}}{\partial t} = -v_g g_{mat}(n, \lambda) s_{tot}(z, t) \quad (\text{éq. 3.12})$$

g_{milieu} (m^{-1}) est le gain du milieu. Il est fonction du facteur de confinement optique Γ et des pertes internes α_{int} (m^{-1}) (équation 3.13). g_{mat} est le gain matériau (m^{-1}). Pour tenir compte de la compression du gain sous l'effet de fortes densités de photons, son expression peut être légèrement modifiée. Différentes formulations existent pour en tenir compte [19, 21, 41, 42]. Par souci de simplicité, nous choisissons celle introduisant le paramètre de saturation du gain ε (équation 3.14) [7, 10]. s_{tot} est la densité totale de photons définie à l'équation 3.15. Comme décrit à l'équation 3.16, les pertes internes se décomposent entre les pertes dans la zone active dues aux pertes par absorption dans la bande de valence et celles dans la zone passive provoquée par le dopage [22, 43]. Certains considèrent une variation des pertes dans la zone active linéaire par rapport à la longueur d'onde [20, 44]; d'autres une dépendance linéaire en la densité de porteurs [7, 10, 18]. Ces derniers se fondent tous sur Connelly [3] qui cite lui-même les travaux de Suematsu [45].

$$g_{milieu} = \Gamma g_{mat}(n, \lambda) - \alpha_{int} \quad (\text{éq. 3.13})$$

$$g_{mat,sat}(n, \lambda) = \frac{g_{mat}(n, \lambda)}{1 + \varepsilon s_{tot}(z, t)} \quad (\text{éq. 3.14})$$

$$s_{tot}(z) = s_{sign}^{\pm}(z) + s_{ase}^{\pm}(z) \quad (\text{éq. 3.15})$$

$$\alpha_{int} = \Gamma \alpha_{actif}(n) + (1 - \Gamma) \alpha_{cladding} \quad (\text{éq. 3.16})$$

De manière analogue, nous pouvons décrire l'évolution des photons émis spontanément, qui se couplent au guide d'onde puis sont amplifiés en se propageant dans le composant. On parle d'émission spontanée amplifiée (ASE) que l'on désigne par s_{ASE} . Par nature aléatoire, ces photons ont des longueurs d'ondes différentes et seront amplifiés avec un gain différent, d'où la somme dans l'expression (3.17) discrétisée selon la même logique que dans l'expression (3.8, R_{sp}).

$$\pm \frac{\partial s_{ASE}^{\pm}(z, \lambda_j)}{\partial z} = g_{milieu}(n, \lambda_j) s_{ASE}^{\pm}(z, \lambda_j) \quad (\text{éq. 3.17})$$

Le gain matériau est la quantité de photons gagnés relativement à la quantité initiale de photons. De manière générique il s'exprime donc comme la différence entre les photons émis par émission stimulée et ceux consommés par absorption. En poursuivant cette logique, le gain matériau se déduit de la statistique de Fermi-Dirac. Sa formule exacte dépend alors des masses effectives des électrons (m_e) dans la bande de conduction, de celles des trous lourds (m_{hh}) dans la bande de valence, de l'indice de la région active (n_{ref}), de l'énergie du *bandgap* (E_g) et de la fréquence optique (ν) [46]. A titre indicatif, la formule 3.18 donne la définition prise par Connelly [3]. Tous ces paramètres dépendent de la structure choisie (*bulk* ou MQW) et des contraintes introduites. Une modélisation fine du gain fera donc intervenir la théorie des bandes dans laquelle ces dépendances sont retranscrites [47, 48]. Plusieurs simplifications permettent une utilisation plus "maniable". La version la plus simple considère une variation linéaire du gain en fonction de la densité de porteurs. Elle ne tient pas compte de la longueur d'onde et n'est par conséquent valable que sur quelques nanomètres à proximité du pic de gain. Bien qu'ayant un domaine de validité restreint cette simplification est très largement utilisée

dans les modèles de RSOA [21, 33, 41]. D'autres ont proposé des modèles polynomiaux [19, 49, 50], lorentziens [15, 30, 35] ou encore logarithmiques [8, 12].

$$g_{mat}(v, n) = \frac{c^2}{4\sqrt{2} \pi^{\frac{3}{2}} n_{ref}^2 \tau v^2} \left(\frac{2 m_e m_{hh}}{\hbar (m_e + m_{hh})} \right)^{\frac{3}{2}} \times \sqrt{v - \frac{E_g(n)}{h}} (f_c(v) - f_v(v)) \quad (\text{éq. 3.18})$$

Equations d'état

Les équations d'états (équations 3.1 et 3.2) dans un semiconducteur sont relativement bien connues. Résumons-les ici à la lumière des précisions apportées dans les paragraphes précédents et des particularités des RSOA.

Dans la plupart des caractérisations que nous verrons dans les paragraphes suivants, nous n'injectons pas de signal. Le temps de vie des porteurs est alors dominé par les recombinaisons stimulées de type ASE ainsi que les phénomènes non radiatifs de l'Auger et des fuites de porteurs. L'émission spontanée amplifiée gouverne le comportement du RSOA. Image du produit de l'émission spontanée par le gain du milieu, l'évolution spatiale de l'ASE est complexe à décrire sur une large bande optique.

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{I}{qV} - (A_{SHR} n + B_{rad} n^2 + C_{Aug} n^3 + D_{leak} n^{5.5}) \\ - v_g g_{mat}(\lambda_{signal}, n) (s_{signal}^+(z) + s_{signal}^-(z)) \\ - v_g \sum_{j=1 \dots N_{ASE} \text{ section}} g_{mat}(\lambda_j, n) (s_{ASE,j}^+(z) + s_{ASE,j}^-(z)) \quad (\text{éq. 3.19}) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial s_{signal}^+(z)}{\partial z} = g_{milieu}(\lambda_{signal}, n) s_{signal}^+(z) \quad (\text{éq. 3.20})$$

$$\frac{\partial s_{ASE}^+(z)}{\partial z} = \sum_{j=1 \dots N_{ASE} \text{ section}} \left(g_{milieu}(\lambda_j, n) s_{ASE,j}^+(z) \right) + \frac{\beta}{2} R_{sp}(n) \quad (\text{éq. 3.21})$$

$$s_{ASE,j}^+(z) = s_{ASE}^+(z, \lambda_j)$$

$$s_{signal}^+(z) = s_{signal}^+(z, \lambda_{signal})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t}$$

3.1.2. Simulations

Le paragraphe précédent évoquait les choix à prendre en compte dans notre modélisation. En effet, les caractérisations expérimentales ne suffisent pas, à elles seules, à expliquer certains phénomènes observés. Différent du SOA mais pas tout à fait laser, les propriétés intrinsèques du RSOA ne sont toujours pas clairement définies. Ces considérations impactent directement la conception des composants puisqu'il n'existe pas de règles d'ingénierie banalisées. D'où la nécessité d'un modèle prédictif simple et exhaustif.

La différence majeure entre le modèle d'un RSOA d'un modèle de SOA [16, 17, 51] est la prise en compte du signal contre-propagatif. Cela complexifie considérablement la résolution des équations couplées. Certains ont proposé une solution analytique simplifiée [2] tandis que d'autres ont introduit une solution numérique en découpant le composant en petites sections [1]. Parmi la typologie des modèles (table 3.1), une distinction doit être portée sur le type de régime. Statique, le courant et l'éventuel signal lumineux injectés sont continus, les variations temporelles sont nulles. Le régime dynamique distingue la modulation opto-optique (O/O) où un signal lumineux modulé est injecté de la modulation électro-optique (E/O) où le courant est modulé. Enfin, pour ce type de modulation, on sous-catégorise la modulation petit signal (qui donnera un résultat en GHz) et la modulation grand signal (résultat en Gbit/s). Ces considérations sont essentielles puisqu'elles conditionnent la méthode de résolution. L'algorithme introduit en 2001 par M. J. Connelly [3, 4] a permis la démocratisation des modèles. Depuis, l'optimisation du temps de calcul est devenu un nouvel objectif avec l'apparition de modèles semi-analytiques [8] ou encore des modèles dits "réduits" car ne comportant plus qu'une équation différentielle [14]. Quoiqu'ayant contribué à ces modèles, Antonelli les a récemment rejetés en 2016 car trop simplistes [12]. D'ailleurs Totovic et al. proposa en 2013 une méthode plus précise de celle de Connelly en conditionnant la convergence de l'algorithme non plus simplement sur la densité de porteurs mais aussi sur la densité de photons [7]. Dans le commerce, *VPIphotonics* intègre un modèle de SOA. Si les définitions physiques sont poussées, leur modèle n'intègre pas les variations spatiales internes au composant, ce qui limite son domaine d'application à des longueurs courtes (<500 μm).

Malgré cette diversité, peu de modèles répondent encore à nos besoins, notamment concernant la modulation E/O. De plus, beaucoup emploient des approximations sur l'expression du gain, ce qui n'est pas approprié à nos RSOA MQW.

Sans fournir un travail aussi approfondi que les études de la littérature, nous avons écrit un algorithme fonctionnel basé sur les travaux de Connelly [3, 4], simplifié et légèrement modifié. L'annexe 1 en donne une description.

REF.	ANNEE	REGIME	RESOLUTION	RSOA	
1	Duurhus	1992	dynamique O/O	numérique	générique
2	Brosson	1994	statique	analytique	générique
3	Connelly	2001	statique	numérique	bulk
4	Connelly	2007	statique	numérique	bulk
5	Connelly	2014	dynamique E/O grand signal	numérique	générique
6	Connelly	2016	statique	numérique	MQW
7	Totovic	2013	statique	numérique ("self consistent")	bulk et MQW
8	Totovic	2014	statique	semi-analytique	bulk et MQW
9	Totovic	2015	dynamique E/O	analytique (Lobatto IIIa formula)	bulk
10	Vujicic	2013	dynamique	numérique (Euler)	bulk
11	Antonelli	2013	dynamique O/O	analytique	générique
12	Antonelli	2016	dynamique O/O	réduit/ modes couplés	MQW
13	Liu	2010	dynamique petit (E/O) et grand signal	analytique (Runge-Kutta)	bulk
14	Duil	2015	dynamique O/O	réduit	générique

Table 3.1. Modèles de RSOA.

3.1.3. Vers une définition du RSOA

Défini pour l'un comme étant un laser sans cavité et pour l'autre comme un SOA réfléchissant ou même comme un SOA Fabry-Pérot, SOA et RSOA entretiennent des ressemblances tangibles avec le laser. Même leur courbe $P(I)$ arbore une discontinuité analogue à celle, pourtant caractéristique, d'un laser. Dans les cas extrêmes, le contraste est ténu entre les spectres optiques d'un Fabry-Pérot avec peu de gain et celui du RSOA avec beaucoup de *ripple*. Comment donc définir un RSOA?

Cette question s'inscrit dans un contexte plus général avec le développement de sources atypiques telles que les lasers sans seuil [52] ou les émetteurs à photon unique [53] dont on s'interroge sur leur nature laser [54]. Poser cette question, c'est aussi s'interroger sur la définition propre du laser [55, 56, 57]. Recopions, à titre indicatif, la définition que Coldren a récemment donnée:

“The classical characteristics for identifying lasing behavior are 1) a significant kink in the output light characteristic; 2) a narrowing of the output light spectrum; 3) perhaps some narrowing in the directivity of the emission; and 4) possibly some reduction in spontaneous emission in other directions.” [57]

3.1.3.1. Seuil du RSOA

La figure 3.1 représente les courbes $P(I)$ d'un Fabry-Pérot et de RSOA issus de la même plaque, donc aux propriétés matériau identiques. Toutes les courbes affichent une discontinuité marquée bien que décalée de quelques milliampères l'une par rapport à l'autre. Les spectres correspondants en figure 3.2 confirment le comportement laser du Fabry-Pérot et amplificateur du RSOA.

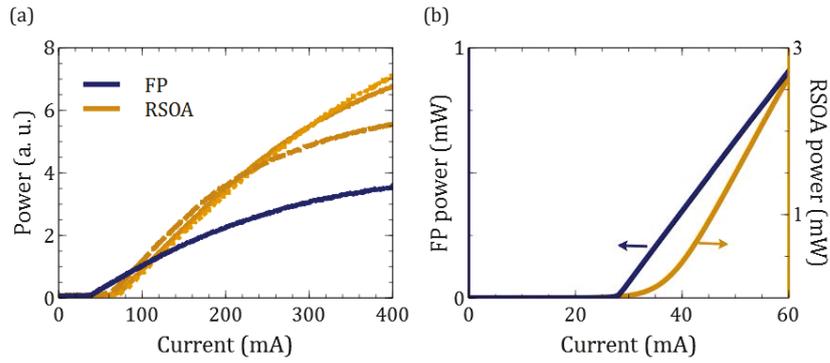


Figure 3.1- Puissance en fonction du courant. (a) Mesures en courant pulsé et (b) continu à 20°C. (Confinement optique: 20%. FP: 500 μm ; RSOA trait tirets: 700 μm ; plein: 1mm; pointillés: 1,3 mm).

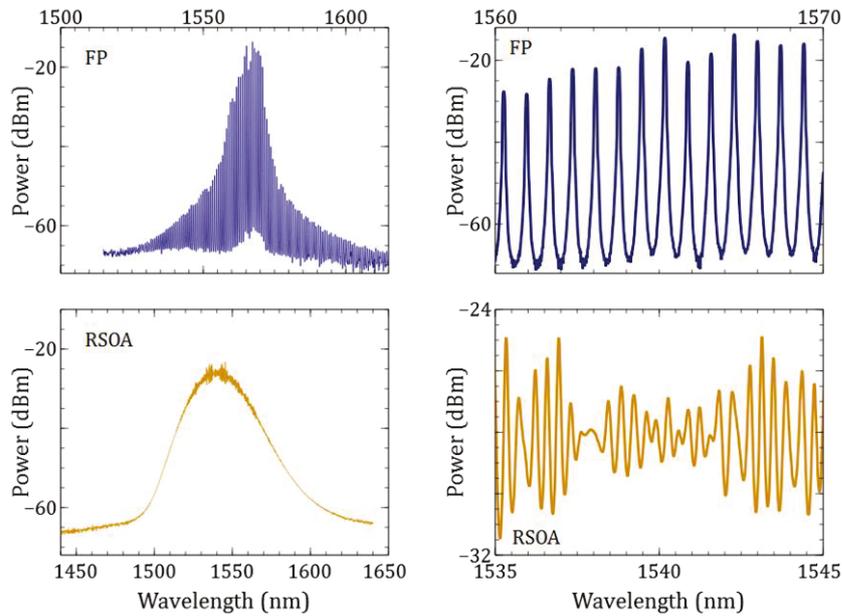


Figure 3.2- Spectres d'un Fabry-Pérot (500 μm) et d'un RSOA (1 mm) à 100 mA et 20°C.

Pour dissocier RSOA et laser nous suggérons une approche plus fine, basée sur la rupture de pente d'une courbe P(I). Sur la figure 3.1 (b), on constate deux transitions différentes. L'une est abrupte tandis que celle du RSOA est plus "douce". Observations qui se retranscrivent sur les dérivées de ces fonctions. En figure 3.3, la dérivée seconde de la courbe P(I) du RSOA est quasi-nulle tandis que celle du Fabry-Pérot exhibe une discontinuité, y compris sur la dérivée d'ordre 3. Ce comportement est aussi prédit qualitativement en figure 3.4 par la modélisation (voir annexe A).

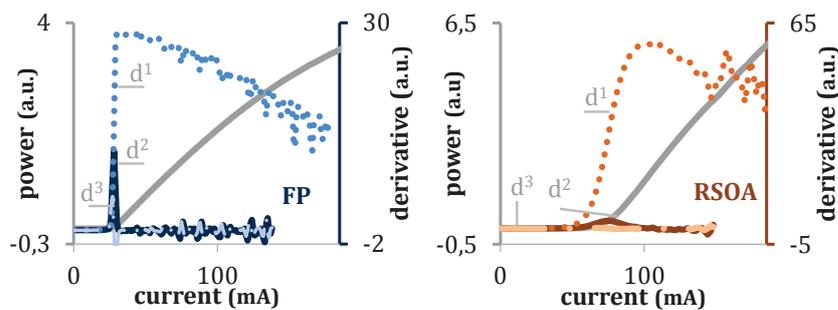


Figure 3.3- P(I) et dérivées en fonction du courant d'un Fabry-Pérot et d'un RSOA issus du même matériau (T=20°C; $\Gamma = 20\%$; $L_{FP} = 500 \mu\text{m}$; $L_{RSOA} = 1 \text{ mm}$).

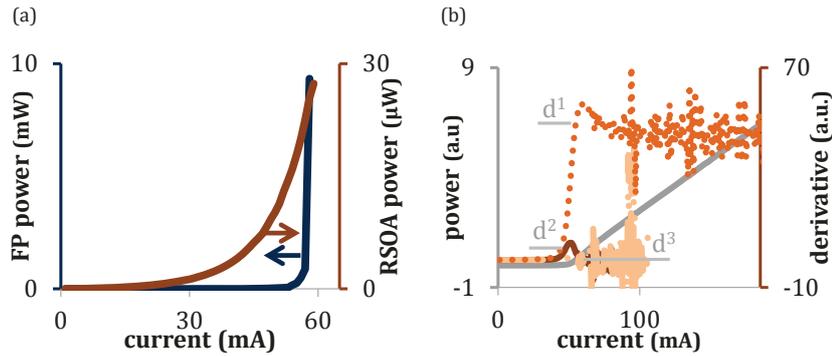


Figure 3.4- Simulations de $P(I)$ d'un RSOA et d'un Fabry-Pérot (a) et dérivées du RSOA (b) ($\Gamma=20\%$, $L\sim 1$ mm).

Le seuil laser se définit communément comme l'intensité du courant pour lequel le gain compense les pertes, principalement les pertes miroir. Passé ce seuil, le régime est fait d'émission stimulée où les photons sont cohérents les uns avec les autres. Dans un SOA comme dans un RSOA il n'y a pas de cavité donc pas de condition de phase et moins de pertes miroir. Lorsqu'on injecte plus de porteurs, on continue à remplir les niveaux d'énergie. C'est ce que l'on peut observer via des mesures d'émission spontanée (voir annexe B) en figure 3.5 (a). Dans le Fabry-Pérot, passé le seuil laser, on ne remplit plus aucun niveau. Remarquons d'ailleurs que ce niveau correspond au premier niveau du RSOA (courbe cyan) et que ce raisonnement est valable même avec un RSOA au *ripple* prononcé (figure 3.5 (c)).

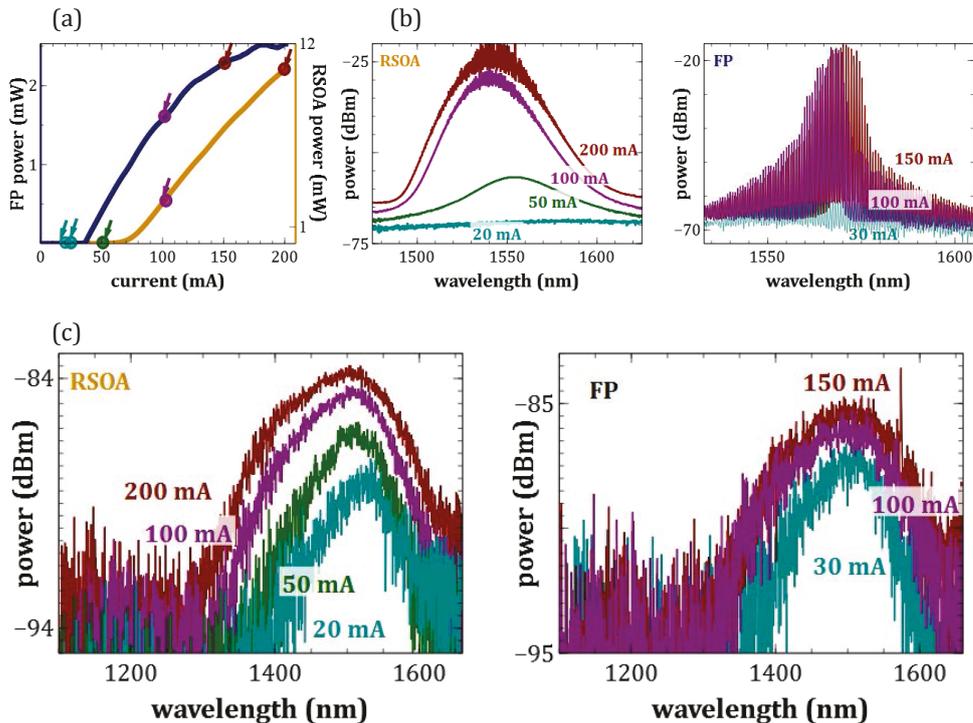


Figure 3.5- (a) Puissance en fonction du courant d'un SOA et d'un Fabry-Pérot. Spectres (b) d'ASE et (c) d'émission spontanée correspondants sous le seuil, après le seuil et sous forte injection. Spectres d'émission spontanée mesurés côté miroir pour le RSOA.

Le "seuil" du RSOA est plutôt lié au seuil de transparence dans un milieu, seuil pour lequel le gain matériau compense les pertes de propagation. Ce seuil dépend de la longueur d'onde et de la densité de porteurs injectés. Dans un RSOA, il existe donc un courant de transparence pour chaque longueur d'onde de l'ASE. A titre indicatif, nous avons repris le gain matériau exprimé dans le modèle de

Connelly (éq. 3.18) pour simuler en figure 3.6 le gain matériau du RSOA de la figure 3.5 dont le seuil était autour de 40 mA. Nous évaluons un courant de transparence autour de 25 mA à 1550 nm. Ce décalage pourrait être dû aux nombreuses simplifications : pertes miroir, pertes dans le taper, évaluées par des mesures antérieures à 1/3 des porteurs injectés, et pertes de propagation.

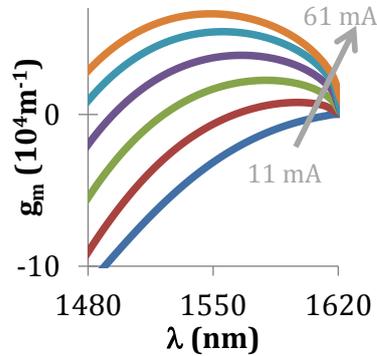


Figure 3.6- Simulations du gain matériau pour un RSOA *bulk* standard ($\Gamma=20\%$, $L=1\text{ mm}$).

Dans la pratique, nous pouvons interpréter ce seuil comme le passage d'un régime d'émission spontanée à un régime d'émission spontanée amplifiée, d'ASE, qui n'est autre que de l'émission stimulée. Il s'agit toutefois d'un régime particulier.

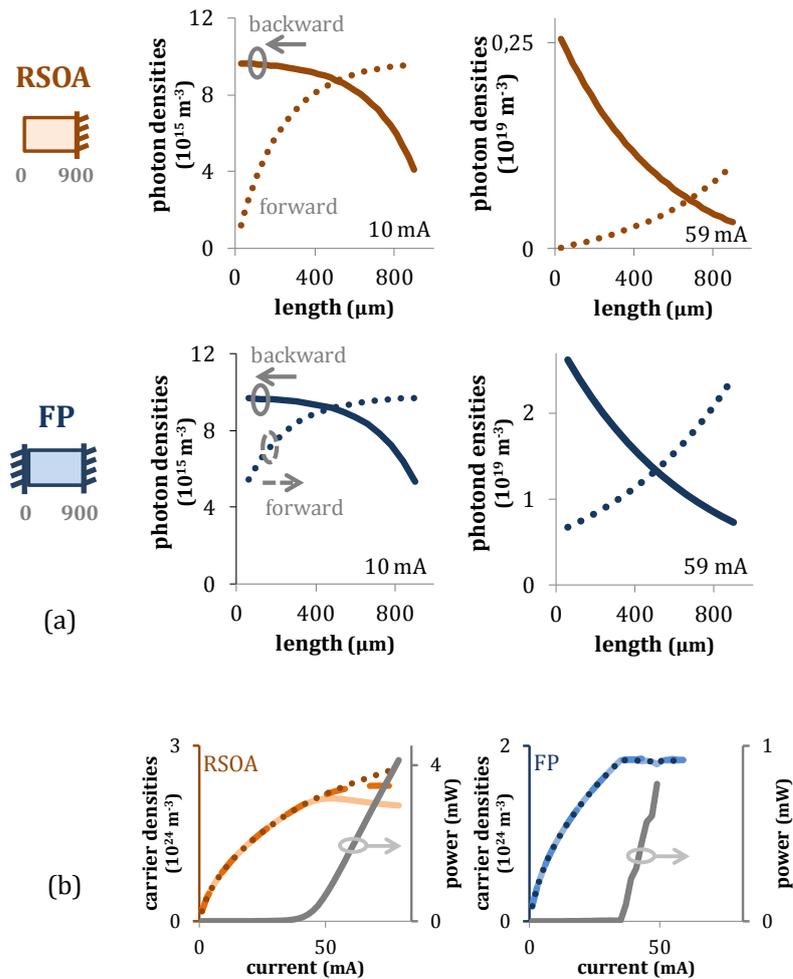


Figure 3.7- Simulations de (a) la densité de photons en propagation et en contre-propagation dans un RSOA et dans un Fabry-Pérot à faible courant et au-delà du seuil; (b) des densités de porteurs en facette d'entrée/sortie (points), au milieu du composant (tirets) et au miroir (trait plein). ($L_{\text{RSOA}}=L_{\text{FP}}=900\text{ }\mu\text{m}$)

Dans le cas du laser classique (miroirs de même réflectivité), la densité de photons est uniforme le long du composant et la densité de porteurs se clampe au-delà du seuil (figure 3.7 (b)). Chaque porteur supplémentaire se recombine et contribue au mode principal. L'asymétrie originelle du RSOA se répercute sur la densité de photons, plus importante à la facette de réflectivité minimale. En effet, le signal s'est propagé deux fois (un aller et un retour) au travers du milieu à gain contre une seule fois au niveau de la facette dite miroir. Puisqu'il y a plus de photons, la probabilité pour qu'un porteur injecté se recombine de manière stimulée est plus grande. Tant les simulations que des mesures expérimentales (figure 3.8), nous indiquent un comportement semblable à celui d'un Fabry-Pérot. En revanche, à la facette dite miroir, il y a moins de photons incidents et moins de recombinaisons stimulées. La densité de porteurs croît avec le courant, suggérant un temps de vie plus long. Ce phénomène de *Spatial Hole Burning* (SHB) est caractéristique des RSOA et des SOA. Il est aussi présent dans certains lasers.

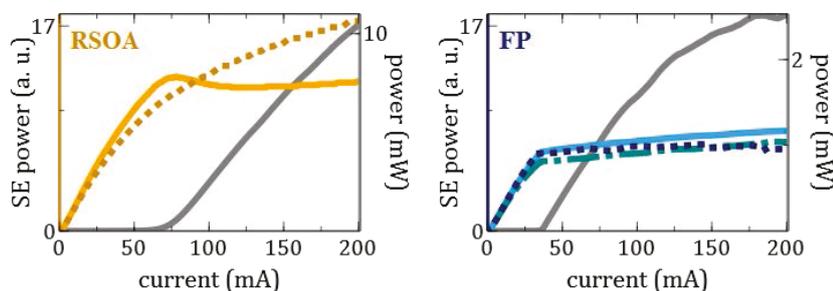


Figure 3.8- Mesures de l'émission spontanée (proportionnelle au carré de la densité de porteurs) pour un RSOA ($L=1$ mm, trait plein : facette E/S, trait pointillé : facette miroir) et un Fabry-Pérot (FP) ($L=500$ μm ., traits plein et pointillé : facettes, trait tiré : milieu).

En résumé de ce paragraphe, la courbe $P(I)$ d'un RSOA à fort gain est similaire à la courbe caractéristique d'un laser, nous poussant à rechercher une définition plus précise de leur seuil. En effet, celui du RSOA est continu alors que celui du laser ne l'est pas. Cette définition à la teinte mathématique recouvre une signification physique. Dans le premier cas, le seuil dépend du seuil de transparence, condition nécessaire à l'amplification tandis que dans le second, une fois cette première condition passée, il faut que le gain net dépasse les pertes. Outre cette définition, le seuil signifie le passage d'un régime d'émission spontanée à un régime d'émission stimulée qu'il faudra néanmoins modérer par le SHB caractéristique d'un RSOA.

3.1.3.2. Influence du confinement et de la longueur

Un paramètre important dans la transition définie au paragraphe précédent, est le confinement optique. Il détermine la quantité du mode couplé dans la zone active. Plus ce facteur est grand, plus les photons "utiles" seront concentrés dans la zone amplificatrice, ce qui accentue la transition du régime spontané vers le régime stimulé. C'est ce que l'on constate sur les courbes $P(I)$ de la figure 3.9 (a). Cette courbe, en échelle logarithmique, est traditionnellement appelée dans le domaine des lasers, *courbe en S*. Pour un confinement de quelques pourcents, la transition est à peine perceptible et se devine pour un confinement de 10%. Au-delà de 20 %, on remarque les deux asymptotes à faibles et forts courants. Quelque soit le confinement optique, la courbe en S des lasers est identique (figure 3.9 (b)). Pour $\Gamma=80\%$, les courbes du RSOA et du Fabry-Pérot se superposent quasiment. Seule la partie haute du S les distingue. Cela fait écho au caractère continu /discontinu de la courbe $P(I)$ en linéaire.

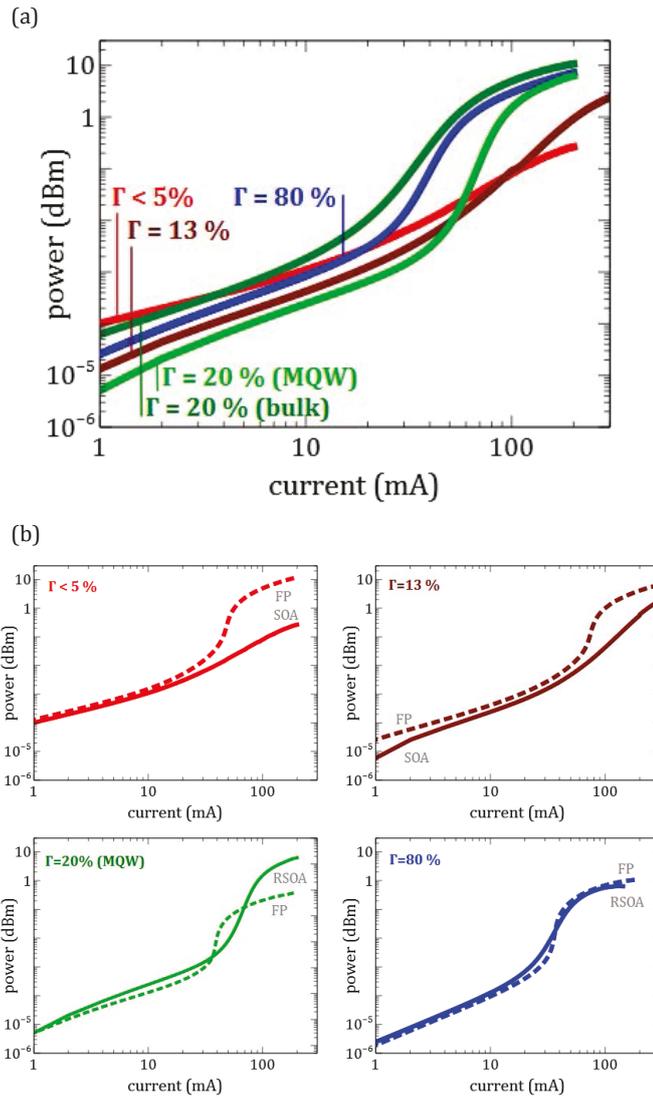


Figure 3.9- (a) Mesures de P(I) en échelle logarithmique pour différents facteurs de confinement (5 à 80%) et (b) comparaison avec les lasers Fabry-Pérot issus des mêmes matériaux.

La forme des courbes en S des RSOA semble corrélée avec l'importance du SHB. Le SHB est une conséquence de l'émission stimulée. Si elle domine les autres phénomènes de recombinaison, elle consommera chaque porteur injecté supplémentaire. Pour un confinement de 5 %, la transition est peu marquée et il n'y a pas de SHB. On peut donc supposer être resté en régime spontané. Comme le P(I) peut le laisser penser, il y a peu d'émission stimulée à 13% alors qu'à 80% celle-ci est indéniable.

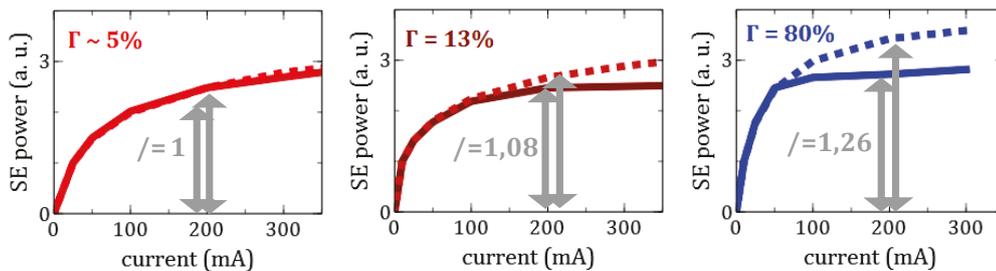


Figure 3.10- *Spatial Hole Burning* pour des confinements de 5 à 80 %. Traits pleins: facette d'entrée/sortie; traits pointillés: centre. Le chiffre écrit dans chaque graphique est le rapport entre la puissance d'émission spontanée au centre sur celle en facette à 200 mA. Elle traduit la force de SHB.

Un paramètre secondaire dans le régime d'émission stimulée est la longueur du composant. Elle n'influe pas sur la transition elle-même qui relève de facteurs matériaux mais sur l'intensité de l'émission stimulée une fois le seuil passé (figure 3.11).

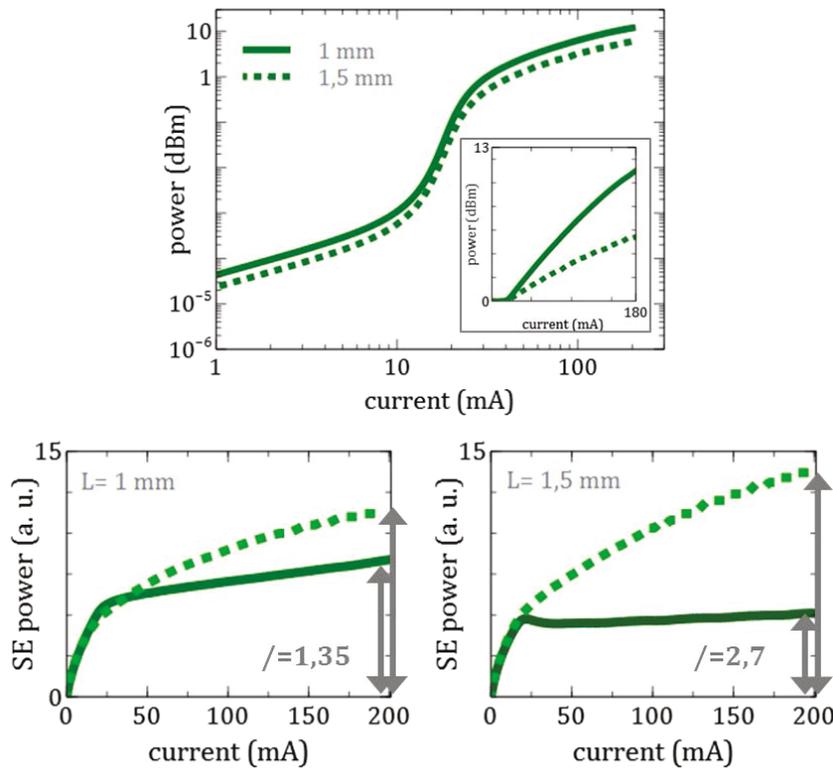


Figure 3.11- Influence de la longueur sur la transition d'un RSOA de confinement 20 %. Le chiffre écrit dans chaque graphique du bas est le rapport entre la puissance d'émission spontanée au centre sur celle en facette à 200 mA.

SHB et courbes en S sont liés mais pas seulement puisque deux forces de SHB significativement différentes donnent la même courbe.

3.1.4. Rôle du facteur d'émission spontanée

Nous avons ébauché les contours de ce qu'était un RSOA relativement au laser. Comme évoqué en introduction du paragraphe 3.1.3, ces réflexions spécifiques à notre composant s'inscrivent pourtant dans un contexte plus large porté par les micro- et nanocavités. Le facteur d'émission spontanée β est fondamental dans ce type d'application car il permet de réduire considérablement le seuil [58, 59]. On parle, par abus de langage, de laser sans seuil dans le cas idéal $\beta=1$. Incontournable dans les microcavités, l'influence du facteur d'émission spontanée sur le RSOA est rarement évoquée. Nous avons donc cherché à approcher ce facteur.

β dans la littérature

Le facteur d'émission spontanée β quantifie la proportion des photons émis spontanément qui se couplent au mode par rapport à la totalité des photons émis. L'équation 3.21 donne l'expression générique et reprend la notation du paragraphe précédent. Suematsu [36] et Petermann [37] ont été parmi les premiers à contribuer à une définition plus spécifique. Mathématiquement, leur expression dépend de l'indice de réfraction et du volume de la région active (n_e, V) ainsi que de la largeur spectrale à mi-hauteur de l'émission spontanée ($\Delta\lambda$) (équation 3.22). Suematsu ajouta le facteur de

confinement de la puissance tandis que Petermann conceptualisa le facteur K (*enhancement factor*) pour distinguer les structures à guidage par le gain des structures à guidage par l'indice. Jusqu'alors expression mathématique, C.H. Henry en donna plus tard une signification physique reliant la théorie de Petermann à la théorie quantique du bruit [34].

$$\beta = \frac{\text{taux de recombinaison d'émission spontanée dans un mode}}{\text{taux total de recombinaison d'émission spontanée}}$$

$$\beta = \frac{r_{sp}(\nu_j, n)\Delta\nu}{R_{sp}(n)} \quad (\text{éq. 3.21})$$

$$\beta = \frac{\lambda^4 K}{4\pi^2 n^3 V_{eff} \Delta\lambda} \quad (\text{éq. 3.22a})$$

$$\beta = \frac{\lambda^4 \zeta}{2\pi^2 n^3 V_{eff} \Delta\lambda} \quad (\text{éq. 3.22b})$$

Depuis, la définition initiale a été fréquemment utilisée [60, 61] tout en restant controversée [34, 62-65]. Le facteur K est un point de focalisation mais d'autres paramètres font aussi débat tels que l'influence de la densité de porteurs et de la température [38, 66, 67]. Certains ont apporté d'autres définitions [15, 40, 68]; nous retiendrons celle de Cassidy [39]. Outre son caractère intuitif, elle évite les discussions éventuelles.

$$\beta = \beta_g \beta_s \quad (\text{éq. 3.23})$$

$$\beta_g = \frac{\theta_{\parallel} \theta_{\perp}}{2n^2} \quad (\text{éq. 3.24})$$

Cassidy décompose ainsi le facteur d'émission spontanée en deux termes. Le premier, β_g , est géométrique. Parmi toutes les directions dans lesquelles sont émis les photons, seules celles comprises dans un angle critique permettent aux photons de se coupler au mode principal. Le champ proche, par lequel le facteur K pourra se déduire, et le champ lointain sont l'image de cet angle. Mathématiquement, Cassidy obtient une expression simple, fonction des divergences à mi-hauteur selon les directions orthogonale et parallèle (éq. 3.24). A ce facteur géométrique, s'ajoute un facteur spectral noté β_s . Il traduit la condition sur la longueur d'onde et la polarisation des photons émis spontanément.

Plutôt que d'effectuer un calcul théorique sur lequel les avis divergent, certains se sont essayés à mesurer expérimentalement β [36, 69], d'autres font correspondre simulations et mesures [58, 70]. La méthode la plus employée demeure l'approximation de l'écart de la courbe P(I) tracée en échelle logarithmique [71].

Estimation de β dans le (R)SOA

En pratique, quand les modèles de (R)SOA tiennent compte de β , les auteurs prennent une valeur arbitraire constante autour de 10^{-5} [1, 9].

Nous avons cherché à évaluer l'ordre de grandeur de β dans nos RSOA. Une valeur exacte ne nous semblait pas nécessaire pour nos besoins actuels et aurait nécessité une mise en place fastidieuse telle que la mesure directe ou l'expression analytique complète. Dans un premier temps, nous avons adopté la méthode faisant correspondre simulations et mesures (figure 3.12). Néanmoins, un nombre trop important de paramètres inconnus influent sur la forme de la courbe. Pour affirmer la cohérence de nos résultats nous avons eu recours à la méthode des asymptotes : le facteur d'émission spontanée

correspond à la différence de marche entre les asymptotes à faibles et forts courants (tableau 3.2). Enfin le graphique 3.12 (b) illustre le lien entre divergence et facteur d'émission spontanée. Selon les composants, la divergence à mi-hauteur varie de $40^\circ \times 40^\circ$ à $\sim 60^\circ \times 60^\circ$. Cet écart conséquent se répercute peu sur β qui reste de l'ordre de 10^{-2} selon les modèles utilisés.

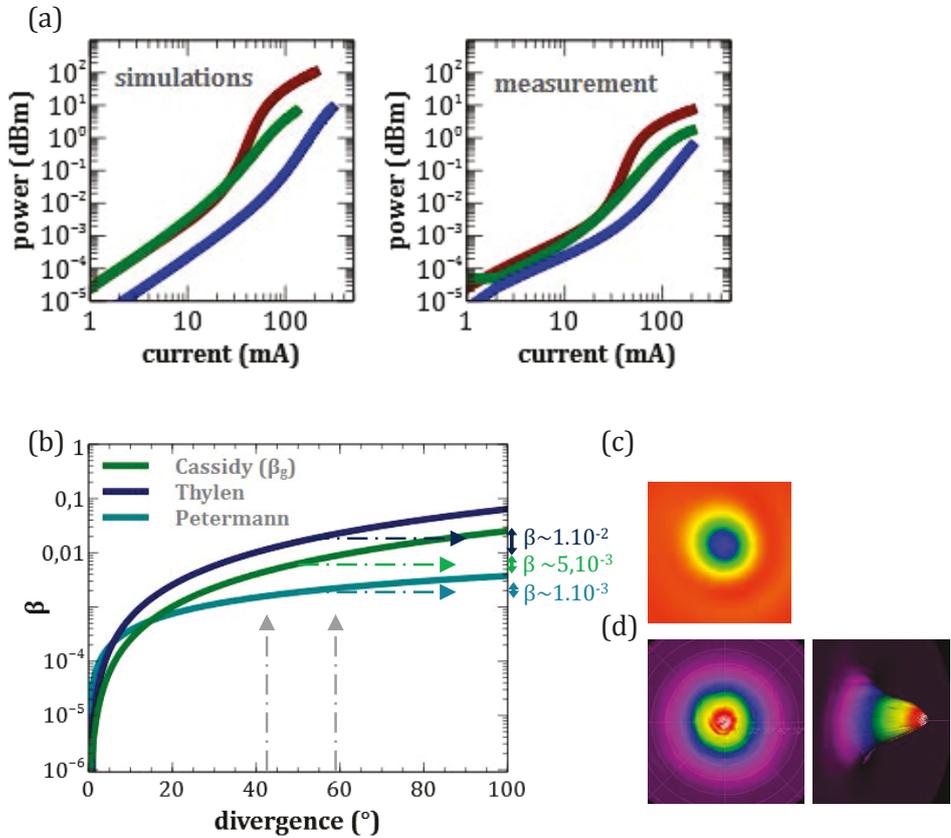


Figure 3.12- (a) Comparaison entre simulation et mesures pour extraire le facteur d'émission spontanée; (b) relation entre champ lointain et divergence à partir de [37, 39, 51] et image du champ proche (c) et du champ lointain (d) pour une coupe dans le ruban.

Γ	5 %	13 %	20 %	80 %
β	10^{-1}	8.10^{-1}	3.10^{-2}	10^{-2}

Table 3.2- Facteur d'émission spontanée de composants au confinement optique varié. β est obtenu en mesurant l'écart entre les asymptotes des courbes de la figure 3.9.

Pour des RSOA à 20% de confinement, nous pourrions retenir $\beta=10^{-2}$ comme valeur, ce qui est bien plus élevé que les valeurs classiquement prises. Pour $\Gamma=80\%$ la valeur semble vraisemblable mais pour les confinements de 5 et 13%, le mode est plus gros donc β plus faible que les valeurs obtenues via les différents modèles. On explique ces nuances dans la validité des méthodes par le régime dominant. Pour $\Gamma=80\%$, la physique des lasers peut s'appliquer en raison de l'émission stimulée importante tandis que pour les confinements plus faibles l'émission spontanée domine et une logique laser n'est plus valable : d'autres modèles sont à penser.

Discussion sur l'ingénierie de β dans le (R)SOA

Cette première approche du facteur d'émission spontanée dans nos RSOA nous permet de conclure qu'il est couramment sous-estimé. Plus concrètement, on peut s'interroger sur l'influence de β pour nos applications et plus précisément de sa valeur "idéale". Dans les cas d'amplification (sous forme de SOA ou de RSOA), le facteur de bruit (*Noise Figure*, NF) apporté par cet élément de la ligne

de transmission doit être minimal. Le battement de l'ASE avec elle-même contribue au NF [72]. Diminuer l'ASE en réduisant l'émission spontanée qui se couple au guide est donc un moyen d'optimiser les performances. Faire tendre β vers zéro a aussi pour avantage d'augmenter la taille du mode en sortie et de réduire les pertes de couplage dans les cas où il n'y a pas de *taper*. Si cette dernière assertion est également vraie pour les applications à modulation directe, on recherchera a priori un compromis avec des valeurs plus élevées. Prenons le cas d'un RSOA directement modulé sans signal injecté. Le budget optique d'une transmission dépend de la puissance de sortie du composant, ici déterminée uniquement par la puissance d'ASE. De plus, nous le verrons par la suite, le temps de vie des porteurs est un facteur limitant dans le RSOA. Augmenter l'émission stimulée via l'ASE pourrait donc accroître la bande passante du composant. Dans ce cas, un β proche de 1 autoriserait probablement de meilleures performances.

Dans les cavités auto-alimentées, le RSOA connaît deux régimes. Durant le régime transitoire, le signal contre-propagatif est négligeable. Nous sommes dans une configuration de type "non injectée" et cherchons à avoir la puissance de sortie suffisante pour atteindre le miroir situé des dizaines de kilomètres plus loin. Une fois le régime permanent atteint, le RSOA reçoit un signal incident à amplifier et moduler. L'ASE fait alors concurrence à ce signal "utile" puisqu'elle diminue le gain disponible. D'où la nécessité d'avoir ici un β modéré. Un compromis fonction des contraintes de temps d'allumage, de la distance et du budget optique de la transmission est donc à trouver.

Dans ce premier paragraphe, nous venons d'esquisser les contours du RSOA, ses particularités et les paramètres qui influent sur son comportement. A la lumière de ces notions et gardant en mémoire les exigences décrites au deuxième chapitre, étudions les problématiques posées par l'intégration du RSOA intégré dans une cavité auto-alimentée.

3.2. Réflexions parasites dans les RSOA à fort gain

Les cavités auto-alimentées exigent un fort gain, ce que nous avons su maîtriser. Toutefois, le corollaire de cette technique implique aussi la maîtrise de la sensibilité du composant aux réflexions parasites.

3.2.1. Réflexions parasites et RSOA

Le *ripple* ou réflexion parasite est une perturbation du spectre optique comme illustré en figure 3.13 où le cas idéal est représenté par des pointillés (spectre lisse). Sa valeur correspond à l'amplitude maximale entre deux extrema successifs de puissance. Généralement de l'ordre de quelques décibels, il arrive néanmoins que les perturbations excèdent 10 dB. Ces modes parasites concurrencent alors le signal incident, amènent du bruit et diminuent les performances globales du composant. Ils réduisent aussi la bande optique (et donc la bande d'amplification) et engendrent des problèmes de stabilité temporelle. A la différence d'un SOA, le signal effectue l'aller-retour dans le milieu amplificateur. Si des perturbations sont présentes, il les voit donc deux fois ce qui explique empiriquement pourquoi le *ripple* y est plus marqué.

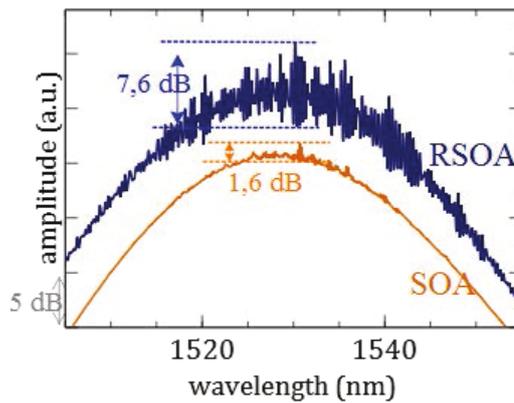


Figure 3.13- Définition du *ripple* sur des spectres de RSOA et de SOA.

D'un point de vue théorique, l'expression du *ripple* se déduit de la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu à gain en ajoutant les deux couches que sont les facettes. Notons G_s le gain simple passage, R_{miroir} la réflectivité du miroir du RSOA, R_{min} la réflectivité d'une facette d'un SOA et R_{var} une réflectivité variable, dans un premier temps égale à R_{min} . Les gains du SOA et du RSOA s'expriment alors en fonction des formules (3.25) et (3.26).

$$G_{SOA} = \frac{(1 - R_{\text{var}})(1 - R_{\text{min}})G_s}{(1 - \sqrt{R_{\text{var}}R_{\text{min}}})G_s + 4\sqrt{R_{\text{var}}R_{\text{min}}}G_s \sin^2 \phi} \quad (\text{éq. 3.25})$$

$$G_{RSOA} = \frac{R_{\text{miroir}}(1 - R_{\text{var}})^2 G_s^2}{(1 - \sqrt{R_{\text{var}}R_{\text{miroir}}})G_s + 4\sqrt{R_{\text{var}}R_{\text{miroir}}}G_s \sin^2 \phi} \quad (\text{éq. 3.26})$$

$$\text{Ripple} = \frac{G_{(R)SOA \text{ max}}}{G_{(R)SOA \text{ min}}} = \left(\frac{1 + \sqrt{R_{\text{var}}R_{(\text{miroir})\text{min}}}}{1 - \sqrt{R_{\text{var}}R_{(\text{miroir})\text{min}}}} \right)^2 G_s^2 \quad (\text{éq. 3.27a})$$

$$\text{Ripple}_{dB} \sim 17 \left[\sqrt{R_1 R_2} G_s \right]_{dB} \quad (\text{éq. 3.27b})$$

où Φ est un déphasage fonction du vecteur d'onde. L'expression du gain du RSOA ne se distingue de celle du SOA qu'à un facteur près, produit de la réflexion sur le miroir, d'un second passage dans le milieu à gain ainsi que d'un second passage à travers la première facette. Les extrema de ces deux gains sont conditionnés par le sinus; ils sont maxima pour un sinus égal à 0 et minima pour un sinus égal à 1. Ainsi l'expression du *ripple* dans les RSOA est identique à celle dans le SOA (équation 3.27); la seule nuance étant la réflectivité de la facette miroir. Son impact est majeur puisque, toutes choses égales par ailleurs, le *ripple* dans un SOA est quasi-nul pour des réflectivités de l'ordre de 10^{-6} tandis qu'il atteint 10 dB dans un RSOA pour la même réflectivité (figure 3.14). Ce seuil pourrait être plus faible pour un miroir plus réfléchissant (usuellement $R_{\text{miroir}} \sim 30\%$) ou un gain plus important. Or, ce fort gain est indispensable pour les RSOA appliqués aux cavités auto-alimentées et rend ces composants très sensibles aux réflexions, aussi minimes soient-elles. Leur source est aussi bien interne qu'externe.

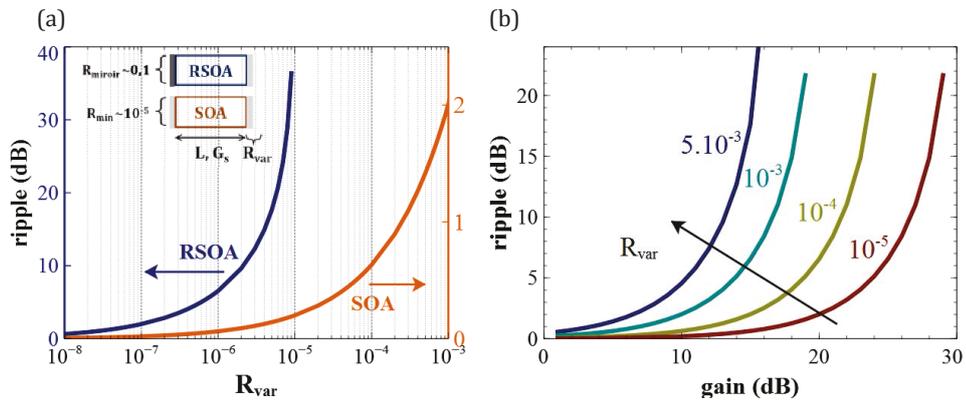


Figure 3.14- Calcul théorique du *ripple* en fonction de la réflectivité de la facette d'entrée pour (a) un RSOA ($R_{\text{miroir, RSOA}} \sim 10\%$) et un SOA ($R_{\text{miroir, SOA}} \sim 10^{-5}$) de même longueur (L) et de même gain ($G_s = 30\text{dB}$) et pour (b) différentes valeurs de gain dans un RSOA ($R_{\text{miroir, RSOA}} \sim 10\%$).

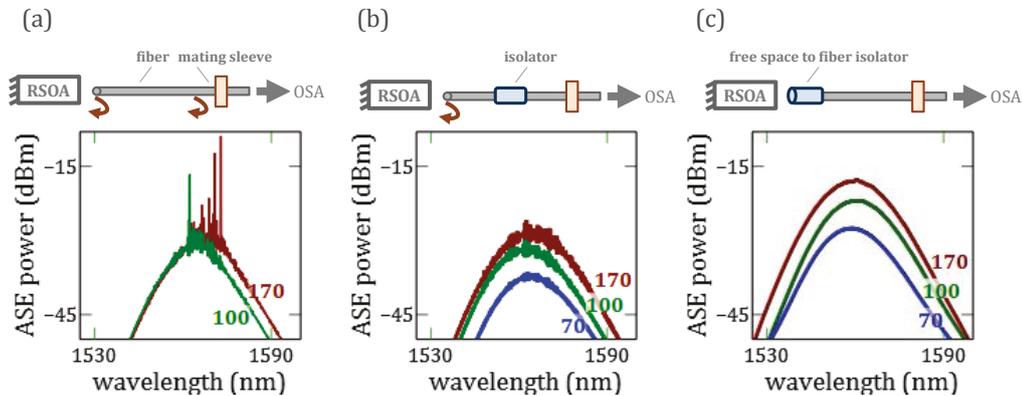


Figure 3.15- Influence d'un isolateur entre RSOA et OSA sur le *ripple*.

Lors des mesures, il est aisé de jauger cette sensibilité. La figure 3.15(a) illustre une configuration standard composée de la fibre de couplage, d'une transition optique et d'une seconde fibre vers l'analyseur de spectre optique (*Optical Spectrum Analyzer, OSA*). Le spectre du RSOA est nettement perturbé avec des raies de 20 dB. Dans le schéma 3.15(b), nous avons introduit un isolateur qui bloque les réflexions de la transition vers le composant. Le spectre présente un niveau acceptable de *ripple*. Enfin en remplaçant la fibre lentillée pour un coupleur isolateur, le spectre est totalement lisse. De plus, en comparaison avec les deux configurations précédentes, le spectre s'est élargi et la puissance d'ASE a augmenté. La réflectivité d'une fibre de type APC (*Angled Physical Contact*) ou d'une fibre micro lentillée traitée antireflets est de -60 dB. Pourtant ces observations indiquent que ce niveau n'est

pas suffisant compte-tenu de nos RSOA à fort gain. La solution d'introduire un isolateur n'est cependant pas viable dans une cavité auto-alimentée dont le principe repose sur le signal contre-propagatif.

Aussi, il arrive qu'un isolateur ne soit pas suffisant pour réduire l'amplitude des raies parasites. Il s'agit alors de réflexions internes. Le traitement antireflets est un procédé largement maîtrisé et robuste aux aléas, nous pourrions donc considérer $R_{AR,RSOA}$ compris entre 10^{-5} et 10^{-6} . En revanche des imperfections de tout type peuvent se positionner au niveau du ruban, ce qui provoque un contraste d'indice et donc des réflexions. Par exemple, l'interface du milieu actif ($n_{act} \sim 3,55$) avec l'InP qui entoure le ruban ($n_{clad} \sim 3,16$) possède une réflectivité de 0,3 %, bien supérieure à $R_{AR,RSOA}$. Ce type de cavité est transparent dans un SOA ou dans un RSOA à gain modéré mais devient néfaste pour nos RSOA, et ce, d'autant plus que la cavité formée est grande (imperfections proches de l'entrée/sortie). Identifier la nature et les causes des réflexions parasites est donc devenu une nécessité. Aucune distribution caractéristique n'a été révélée en associant chaque oscillation à la longueur de cavité correspondante : les longueurs de cavité présentent un caractère aléatoire (figure 3.16). De plus les longueurs internes au RSOA sont telles que la précision d'une analyse a posteriori est insuffisante. Cependant on remarquera des pics plus forts à des distances pouvant correspondre aux discontinuités du taper.

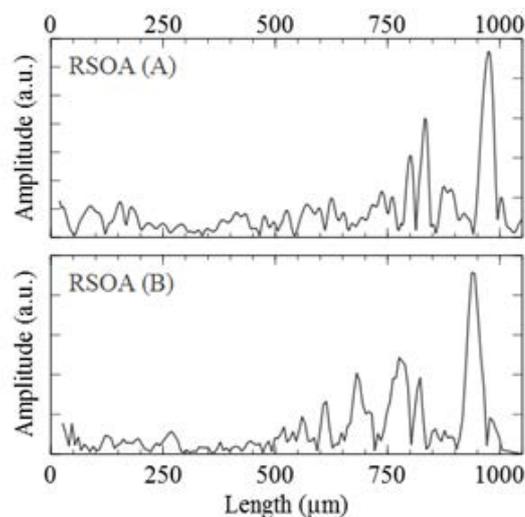


Figure 3.16- Transformée de Fourier de spectres de deux RSOA différents.

3.2.2. Influence de l'adaptateur de mode

Une des sources supposées d'imperfections est l'adaptateur de mode composé de discontinuités et d'interfaces.

La figure 3.17 identifie les principaux points, à savoir :

- la rupture de pente du taper actif ;
- la jonction taper actif/taper passif ;
- l'arrêt du taper actif par rapport au taper passif ;
- la largeur de la pointe du taper actif.

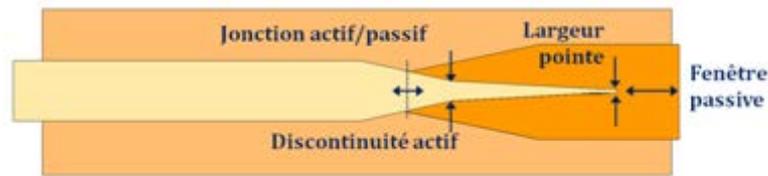


Figure 3.17- Sources possibles de réflexions dans un convertisseur de mode.

Nous avons introduit des variations dans la jonction entre actif et passif ainsi que dans la largeur de la pointe au point de discontinuité. Les simulations effectuées via *Fimmwave* donnent toutes des réflectivités inférieures à 10^{-8} ce qui ne perturberait pas la propagation de l'onde. De même les composants tests ne présentent pas de malus ou de bonus significatifs suite à ces modifications. La distribution du *ripple* reste aléatoire.

Les *tapers* ont été développés historiquement avec une fenêtre passive, la zone active ayant été complètement gravée. La possibilité d'une cavité entre la facette du taper et la facette de sortie a poussé l'apparition d'un second design dans les générations de composants précédant cette thèse. La pointe du ruban actif y est prolongée jusqu'à la facette de sortie. Si cela supprime la fenêtre passive, cette configuration introduit éventuellement des défauts de clivage ou de vieillissement puisque le ruban actif se retrouve en contact avec l'air. Les caractérisations menées sur les lots précédents n'ont pas permis de conclure quant à la configuration amenant le moins de *ripple*. Nous avons donc conçu les deux types de *tapers* qui présentent des valeurs similaires, aléatoires selon les lots.

Le dernier axe d'amélioration est la largeur de la pointe, antérieurement de l'ordre de 200 nm suite à certaines évolutions technologiques. En effet, si le transfert du mode vers la semelle n'est pas total, la partie restante peut se réfléchir à l'interface zone active/ InP. Abaisser la largeur de la pointe favorise le transfert du mode et donc abaisse la quantité de signal qui pourrait potentiellement se réfléchir à l'interface. Nos simulations indiquent un confinement dans la pointe inférieur à 0,4 % pour des largeurs de 120 nm ou moins contre 4 % pour une pointe de 400 nm. Réaliser des pointes à 150 nm implique néanmoins un développement technologique important, débuté dans les lots 0 (table 2.5) et poursuivi par la suite. Ce développement est motivé par l'introduction de la lithographie électronique ou *ebeam* autorisant des dimensions de quelques nanomètres. Les temps d'écriture étant conséquents (plusieurs heures), la surface insolée doit être la plus faible possible. Dans notre cas il s'agit des zones rubans/taper. De plus, l'*ebeam* utilise de la résine positive PMMA, ce qui, toutes contraintes réunies, impose un contre-masque protégeant le ruban. Ce masque est composé d'une première couche de silice (SiO_2) puis d'une couche de Titane (Ti), il sera ensuite gravé par RIE. Les épaisseurs, la puissance et la pression de gravure ont été ajustées pour que les flancs du ruban soient droits et les cotes respectées. La figure 3.18 illustre des profils irréguliers et un cas extrême où ces irrégularités provoquent l'affaissement de la pointe (3.18 (c)). La figure 3.19 regroupe les différentes largeurs mesurées au MEB et les compare avec les valeurs codées. Les largeurs sont mesurées en haut du ruban. On remarque une sur-gravure récurrente, en partie compensée par un profil en triangle et donc une largeur plus importante au niveau des puits.

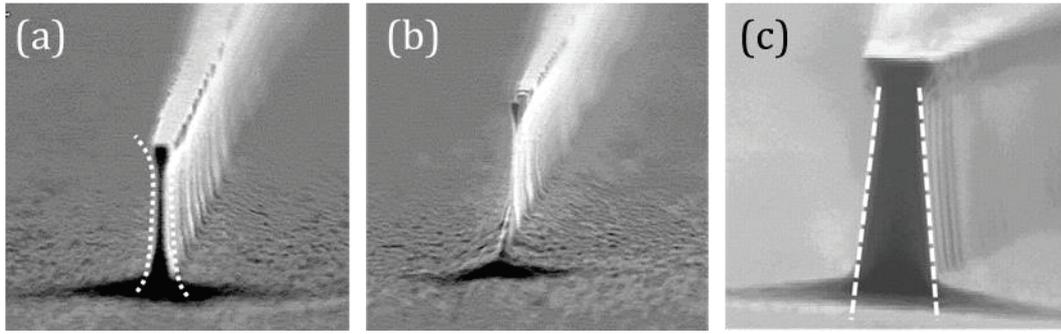


Figure 3.18- Profils irréguliers des *tapers*.

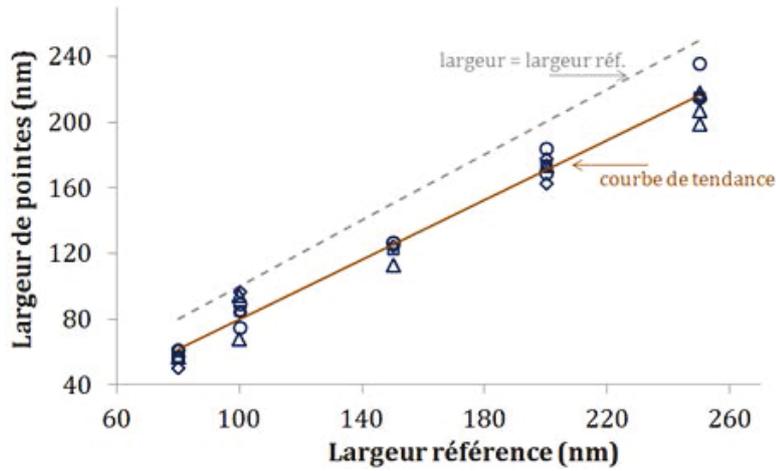


Figure 3.19- Comparaison entre largeur codée et largeur effective des pointes. Les points correspondent à des doses *ebeam* différentes.

La comparaison des spectres de RSOA avec des pointes de largeur variant de 80 à 150 nm suggère effectivement une diminution des réflexions avec des pointes plus fines (figure 3.20). Pour des barrettes non traitées anti-réflexions, le *ripple* est de 16 dB pour des pointes de 150 nm contre 7 dB pour des pointes inférieures à 120 nm. Pour les largeurs de 80 nm, le *ripple* est comparable à celui des largeurs de 100 nm, parfois il est légèrement supérieur, probablement en raison de la difficulté technologique à les réaliser. On prendra donc pour référence une pointe de 100 nm.

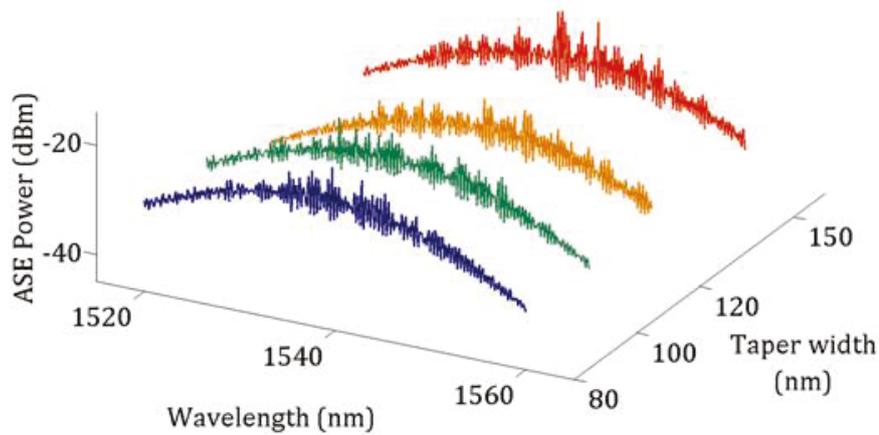


Figure 3.20- *Ripple* en fonction de la largeur de la pointe (composants non traités AR).

3.2.3. Influence des défauts dans le ruban

Malgré le résultat du paragraphe précédent, le spectre des RSOA reste perturbé. Nous avons ainsi mesuré le *ripple* avant et après traitement antireflets. Des composants affichent après fabrication un *ripple* faible de 3 dB environ tandis que d'autres présentent des réflexions de plus de 10 dB. Parfois, le traitement antireflets n'a que peu d'influence sur l'intensité des réflexions. La figure 3.21 en est un exemple. Cela laisse suggérer que ce ne sont pas les facettes qui participent aux réflexions mais des défauts le long du ruban. A priori, le procédé de fabrication tel qu'il était en place au début de cette thèse serait incriminé.

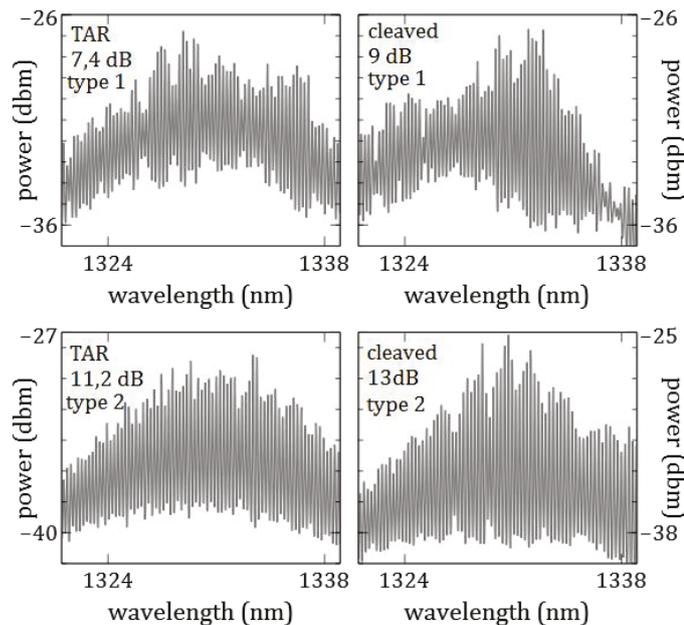


Figure 3.21- Comparaison du *ripple* avant et après traitement antireflets pour deux types de convertisseur de mode.

Une caractérisation optique (microscope optique et microscope à balayage électronique MEB) a été menée avant et après gravure du ruban (figure 2.5 (F) et (G)). Elle a mis en évidence des irrégularités dans le ruban, parfois trous, parfois excroissances (figure 3.22 (a)). L'image 3.22 (b) est celle d'un ruban après gravure du masque en silice. Des tâches noires y sont distribuées le long du guide, ce sont elles qui seront transférées du masque vers le ruban lors de la gravure, comme schématisé en figure 3.22 (c). La répartition de ces défauts est aléatoire d'une plaque à l'autre et d'une cellule de la plaque à l'autre. Leur fréquence sur les rubans et leur forme sont variées. Or un trou provoque un contraste d'indice et donc une réflexion. De sommaires simulations indiquent qualitativement la perte associée. La transmission passe de 100 % pour un ruban parfait à 66 % pour un trou de 0,5 μm dans un ruban de 1 μm environ. Ce chiffre diminue avec la taille et le nombre de ces interruptions (figure 3.23). Leur surface pourrait être rugueuse ce qui perturberait un peu plus le signal. Ce constat est cohérent avec l'évaluation précédente du *ripple* considéré comme un phénomène aléatoire et varié.

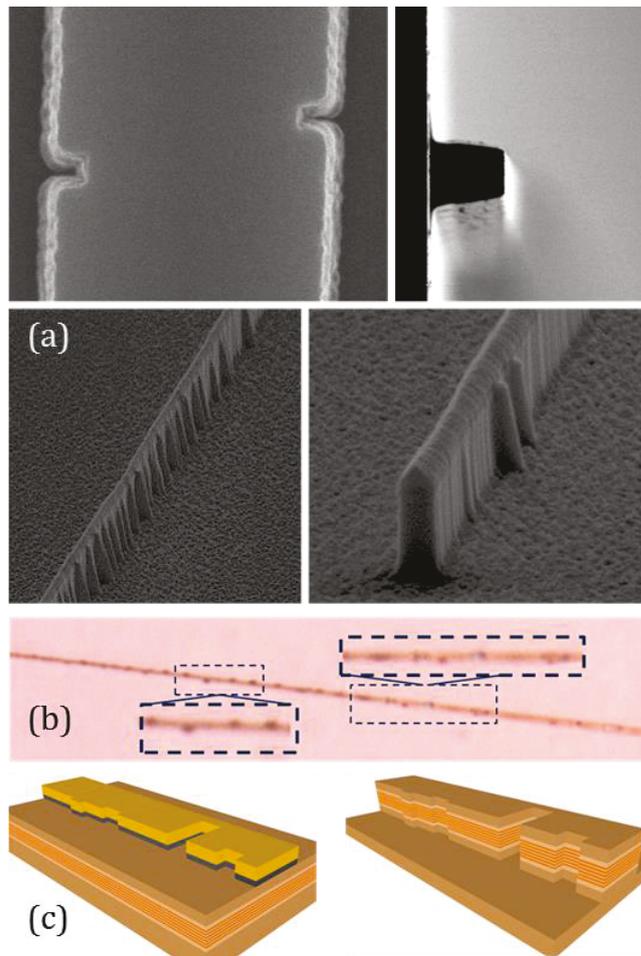


Figure 3.22- Défauts observés au MEB après gravure du ruban (a) et au microscope optique après gravure du diélectrique (b), (c) schématise le transfert de défauts sur le ruban.

Δ LARGEUR (μm)	-0,5	-0,4	-0,3	0,1	+0,1
TRANSMISSION	0,66	0,76	0,86	0,99	0,987

Table 3.3- Transmission de mode en fonction de la dimension du défaut.

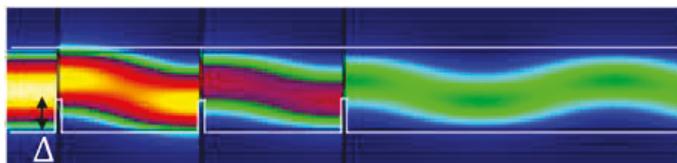


Figure 3.23- Transmission après 4 trous de $0,6 \mu\text{m}$ (simulations).

Les différentes étapes technologiques ont été remontées afin de comprendre l'origine des déformations. Le tableau 3.4 détaille les sous étapes ainsi que les paramètres associés.

L'écriture *ebeam* fut identifiée comme l'étape source avec la présence d'impuretés dans la résine. Nous avons donc modifié les sous-étapes associées en conséquence dans le but d'éliminer les sources potentielles de poussière.

ETAPES	SOUS-ETAPES	PARAMETRES
Gravure ruban	Nettoyage Gravure Préparation surface	- - Produit, temps
Gravure masque SiO ₂	Nettoyage Gravure Préparation surface	- Equipement -
Lift du masque Ti	Nettoyage Lift	- -
Dépôt Ti		Equipement
Lithographie électronique	Rinçage Développement Ecriture Enduction Préparation surface	Produit, temps Temps Dose écriture Résine, solvant, vitesse d'accélération, recuit -
Dépôt SiO ₂	Dépôt Préparation surface	Equipement Produit, temps

Table 3.4- Étapes impliquées comme source de défauts.

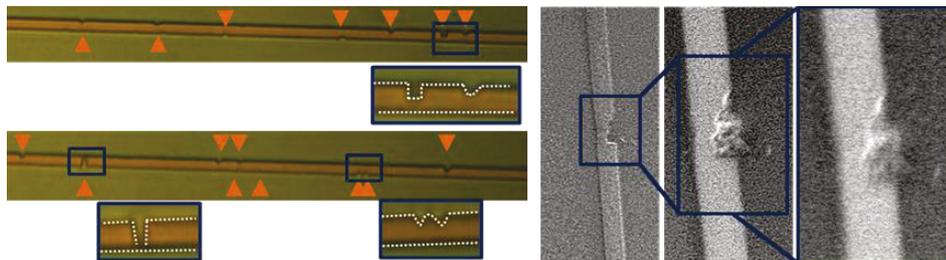


Figure 3.24- Impuretés incrustées dans la PMMA.

Toutes actions combinées, nous avons réussi à diminuer le *ripple* dans les RSOA. Les mesures qui ont été prises pour résoudre ces problèmes ont conduit à la mise en place de procédés de surveillance des éventuelles dérives.

Une seconde problématique liée aux cavités auto-alimentées et plus largement aux nouveaux réseaux d'accès, concerne l'efficacité énergétique qui permet de réduire l'impact environnemental et d'abaisser les coûts.

3.3. Fuites de porteurs

Evoqués au chapitre 2 et dans le paragraphe 3.1, le terme fuites de porteurs est un terme générique qui recouvre des significations physiques différentes. Une première cause de pertes est la dérive et la diffusion des porteurs à l'injection. Le confinement des niveaux d'électrons et de trous influence en partie ces phénomènes, c'est ce que nous approfondirons au paragraphe suivant via l'étude de diagrammes de bandes variés. Les jonctions parallèles sont une seconde cause de pertes qui concurrencent l'hétérojonction principale (① dans la figure 3.25).

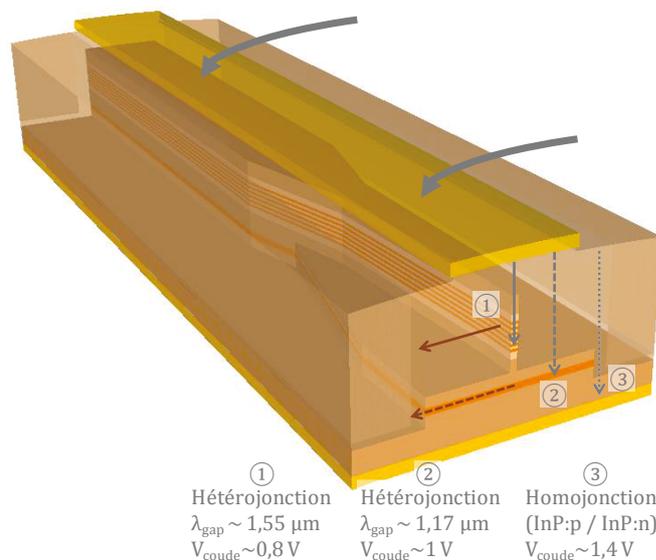


Figure 3.25- Chemins de recombinaisons possibles le long d'un composant enterré (BRS).

L'implantation ne se réalisant pas côte sur côte, il subsiste une zone de quelques microns d'homojonction entre l'InP dopé p et l'InP dopé n (② fig. 3.25). La présence d'un convertisseur de mode impose celle d'une semelle, le plus souvent en quaternaire phosphore de *gap* 1,17 μm . La tension de coude associée à cette diode (③ fig. 3.25) est supérieure à celle de l'hétérojonction principale ($\sim 1 \text{ V}$ contre $\sim 0,8 \text{ V}$). L'électron se recombinera donc plus favorablement dans l'hétérojonction de *gap* 1,55 μm dans le ruban. Toutefois, dans la zone *taper*, cette hétérojonction est unique sur une largeur de plusieurs microns, ce qui en fait une zone de recombinaisons potentielle. Pour confirmer cette hypothèse, nous avons mesuré l'émission spontanée de deux RSOA identiques dont la seule nuance est la présence ((b) dans la figure 3.26) ou l'absence ((a) fig. 3.26) de semelle.

Au centre du ruban, les RSOA possèdent des spectres d'émission avec un maximum vers 1,4 μm . On retrouve ce même maximum à la pointe du convertisseur dans le cas sans semelle. En revanche, dans le cas avec semelle, ce pic devient négligeable par rapport au maximum à 1,17 μm dont l'intensité augmente avec le courant injecté. Une partie des porteurs se recombine donc dans cette zone plutôt que dans la zone active principale (① fig. 3.25).

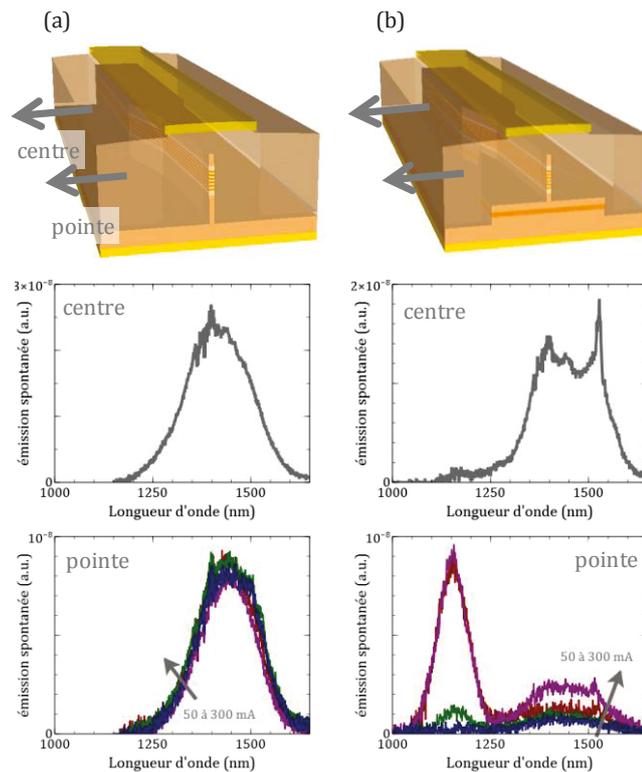


Figure 3.26- Spectres d'émission spontanée mesurés au centre du ruban et au niveau du convertisseur de mode sur des RSOA (a) sans et (b) avec une semelle de *gap* 1,17 μm . Le pic à 1,5 μm dans les spectres (b) correspond à des réseaux (gain clampé).

La technique dite *butt-joint* évite ce comportement. Elle consiste à remplacer la zone active du taper par un quaternaire *bulk* dans lequel aucun porteur ne sera injecté (sans électrode). On peut ajouter à cela une reprise semi-isolante dite SIBH (*Semi Insulating Buried Heterostructure*) qui nous épargne de l'implantation et recouvre toute la zone à isoler (figure 3.27). Dans un cas idéal, tous les porteurs passeraient donc par la zone active du ruban. Dans la pratique, le *butt-joint* (BJ) s'exécute en gravant la zone à remplacer puis en effectuant une reprise pour faire croître le matériau de la partie passive. La différence d'indice et la surface gravée contribuent à la réflectivité de l'interface. Or nous avons pu constater au paragraphe précédent la sensibilité extrême du RSOA. C'est pourquoi le spectre des RSOA BJ est aussi perturbé (figure 3.28) et rend cette technique trop délicate pour ce composant. De même, si le matériau semi-isolant de la reprise SIBH comporte des défauts alors les fuites seront considérablement amplifiées et en particulier avec la température. Cette technique nécessite une maîtrise parfaite des paramètres.

Malgré ces écueils, les composants fabriqués via ces techniques ne semblent pas comporter de défauts, comme le laisse suggérer les tensions en fonction du courant de la figure 3.27.

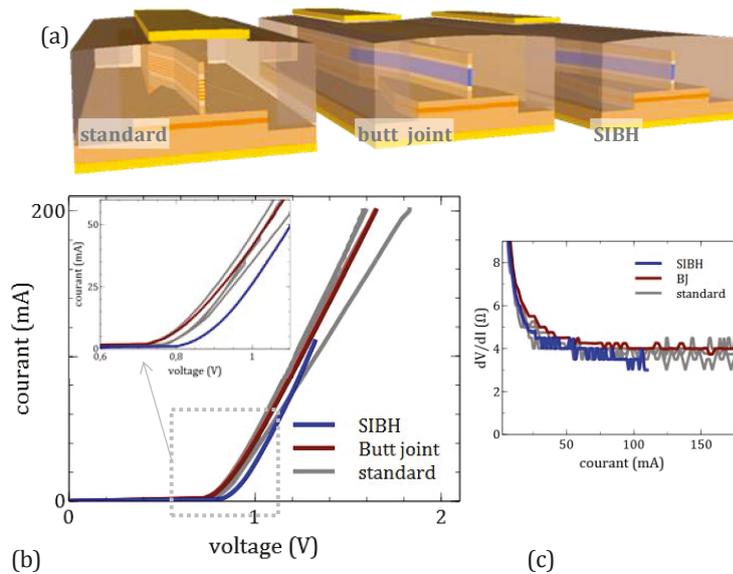


Figure 3.27- Intégration de zones passives par *butt-joint* et reprise avec un semi-isolant (SIBH) (a). Comparaison des I(V) associés (b) et évaluation de la résistance série (c).

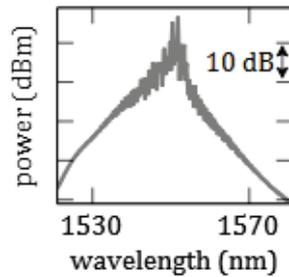


Figure 3.28- Spectre d'un RSOA butt-joint.

Nous avons évalué la rapidité d'un RSOA enterré via SIBH et sans réflexion parasite. Ce RSOA est issu d'une structure laser au nombre de puits restreint. Contrairement aux lasers pour lesquels cette technique contribue à des résultats à l'état de l'art, le SIBH n'accroît pas la rapidité du RSOA. La figure 3.29 représente les diagrammes de l'œil de composants court et long directement modulés. A 1,25 Gbit/s, le RSOA long est ouvert malgré le temps de décroissance du 1 vers le 0. Il atteint probablement sa limite à 2,5 Gbit/s, limite repoussée à 5 Gbit/s en injectant un signal lumineux.

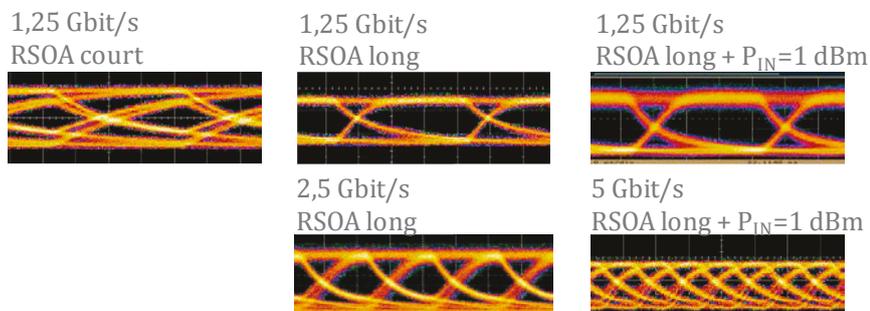


Figure 3.29- Diagramme de l'œil d'un RSOA enterré en SIBH de structure type laser.

Les solutions actuelles dont l'efficacité a été démontrée pour les technologies laser ne semblent pas être appropriées pour les technologies RSOA. Le *butt-joint* pourrait être une solution pour les RSOA de gains classiques mais pas pour ceux des cavités auto-alimentées. Le SIBH pourrait aussi contribuer

à l'amélioration globale des performances mais c'est la conception de la structure qui demeure le critère décisif (plus de détail sur le RSOA SIBH sont donnés en annexe). C'est pourquoi nous avons cherché à étudier de nouvelles configurations. Le chapitre 2 décrivait leur conception, le paragraphe 3.4 dégage leurs principales caractéristiques.

3.4. Evaluation de l'aluminium et de la bande O

Pour rappel, nous avons choisi de nous diriger vers la bande O afin d'augmenter la portée de la transmission et vers l'aluminium pour l'amélioration du confinement électronique. Mieux confinés, les électrons seraient moins sensibles aux variations de température et leur temps de recombinaison stimulée réduit. Parmi les variations de matériau, d'hauteur de barrières et de *gap*, nous prendrons pour référence une plaque phosphore en bande C et de barrière à 1,17 μm .

3.4.1. Caractérisation statique

Une manière simple d'évaluer le gain du RSOA consiste à mesurer sa puissance et son spectre. Une manipulation plus rigoureuse impliquerait l'injection d'une longueur d'onde fixe dont on ferait varier la puissance. La courbe de la puissance en fonction du courant apporte non seulement des informations sur la puissance mais aussi sur le seuil et la saturation (figure 3.30).

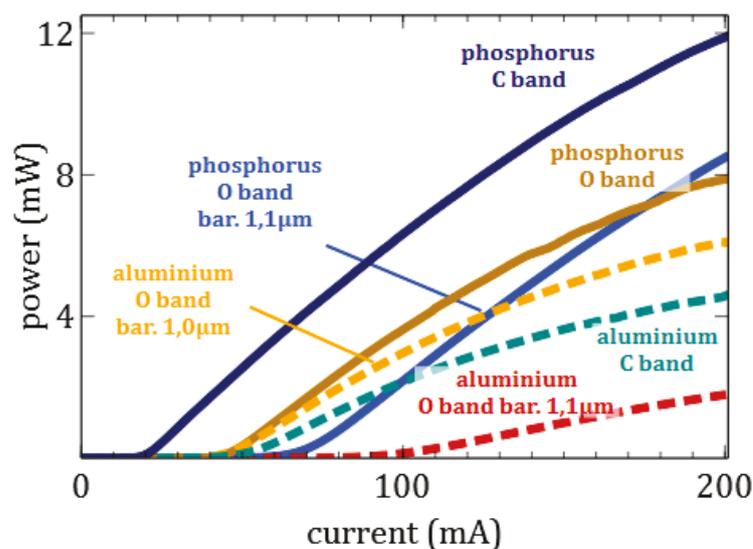


Figure 3.30- Puissance d'ASE en fonction du courant pour différentes structures.

Deux RSOA se distinguent des autres. La plaque dite référence (phosphore, bande C, barrières à 1,17 μm ou 1,05 eV) présente un seuil faible et une puissance d'ASE élevée. A 100 mA et 20°C, la puissance d'ASE totale est de 11,6 dBm et la puissance couplée dans la fibre de 8 dBm environ. La plaque aluminium bande O d'hauteur de barrières 1,1 μm (ou 1,13 eV) affiche un seuil très élevé d'une centaine de milliampères et donc une puissance très faible à ce courant. Puisque le seuil décale le passage en régime stimulé, la simple comparaison des puissances à un courant donné ne décrit pas pleinement le comportement des composants. Nous avons alors calculé la variation de la puissance d'ASE en fonction de la variation du courant dans la partie linéaire des courbes 3.30 (table 3.5). Cette partie est située après le seuil mais avant la saturation, deux paramètres qui varient en fonction du composant. Cette valeur ne correspond pas complètement au rendement quantique différentiel externe d'un laser calculé en fonction des flux de photons. Si la plaque aluminium bande O et à hauteur

moyenne de barrières se démarque encore par sa piètre qualité, les valeurs deviennent en revanche comparables entre les RSOA en phosphore ($\Delta P/\Delta I \sim 0,0085 \text{ W.A}^{-1}$) d'une part et les RSOA en aluminium d'autre part ($\Delta P/\Delta I \sim 0,0055 \text{ W.A}^{-1}$). Contre-intuitivement, ce sont les RSOA phosphore qui présentent les meilleures performances.

	BANDE C phosphore <i>bar. 1,17μm</i>	BANDE C phosphore <i>bar. 1,1 μm</i>	BANDE C aluminium <i>bar. 1,1 μm</i>	BANDE O aluminium <i>bar. 1,0 μm</i>	BANDE O aluminium <i>bar. 1,1 μm</i>	BANDE O phosphore <i>bar. 1,1 μm</i>
$\lambda_{\text{pic, PL}}$	1532 nm	1545 nm	1535 nm	1289 nm	1332 nm	1336 nm
$\lambda_{\text{pic, ASE}}$	1532 nm	1545 nm	1560 nm	1310 nm	1330 nm	1325 nm
Largeur optique	18 nm	25 nm	20 nm	14 nm	14 nm	16,6 nm
Seuil RSOA	20 mA	70 mA	60 mA	45 mA	95 mA	45 mA
$P_{\text{totale, 100mA}}$	11,55 dBm	7 dBm	6,7 dBm	9,9 dBm	- 10 dBm	10,9 dBm
$P_{\text{couplée, 100mA}}$	6,3 mW	2,7 mW	2 mW	3 mW	0,13 mW	5,2 mW
$\Delta P/\Delta I$ (10^3 W/A)	83,1	85,8	57	54,4	17	87,2

Table 3.5- Performances statiques des RSOA.

A titre comparatif, nous avons appliqué le même raisonnement aux lasers Fabry-Pérot des structures correspondantes (table 3.6). Compte-tenu de leurs longueurs différentes, nous avons remplacé le courant de seuil par le seuil de densité volumique de courant. On y retrouve les mêmes tendances que pour les RSOA. Le seuil élevé du FP bande C phosphore d'hauteur de barrières 1,1 μm laisserait suggérer une qualité de matériau inférieure à celle des autres composants. Deux plaques de cette structure ayant été fabriquées et présentant les mêmes caractéristiques, nous pouvons écarter la fabrication comme cause de cette dégradation. Précisons que les Fabry-Pérot issus des plaques RSOA non pas des conceptions et fabrications optimales en raison du fort dopage p et du fort confinement du mode dans la zone active.

	BANDE C phosphore <i>bar. 1,17μm</i>	BANDE C phosphore <i>bar. 1,1 μm</i>	BANDE C aluminium <i>bar. 1,1 μm</i>	BANDE O aluminium <i>bar. 1,0 μm</i>	BANDE O phosphore <i>bar. 1,1 μm</i>
λ_{pic}	1550 nm	1564 nm	1578 nm	1322 nm	1347 nm
Seuil laser ($\text{mA}/\mu\text{m}^3$)	0,075	0,28	0,19	0,16	0,13
$P_{\text{couplée, 100mA}}$	3,3 mW	0,75 mW	1,2 mW	0,22 mW	2,6 mW
$\Delta P/\Delta I$ (10^3 W/A)	36	26	25,3	7,1	31

Table 3.6- Performances statiques des lasers Fabry-Pérot.

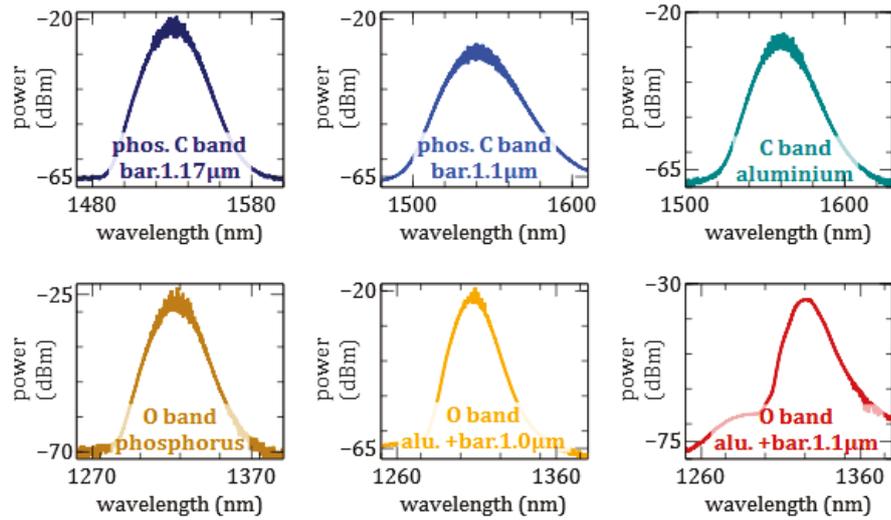


Figure 3.31- Spectres d'ASE pour différentes structures.

Hormis le RSOA bande O aluminium de barrières 1,1 μm , les spectres d'ASE ne révèlent pas de caractéristiques physiques particulières. La largeur optique à -3 dB semblerait légèrement supérieure en bande C qu'en bande O mais les variations d'un composant à l'autre ne permettent pas de conclure. La vingtaine de nanomètres disponibles est suffisante pour notre application quoique les RSOA aluminium bande O soient un peu étroits (14 nm) pour envisager une implémentation système.

3.4.2. Caractérisation dynamique

La figure 3.32 représente les diagrammes de l'œil des RSOA. Les contrastes de rapidité sont éloquents. Les RSOA phosphore sont ouverts à 5 Gbit/s et ceux émettant en bande C parviennent à atteindre les 10 Gbit/s contrairement au RSOA en aluminium, fermés dès les 5 Gbit/s.

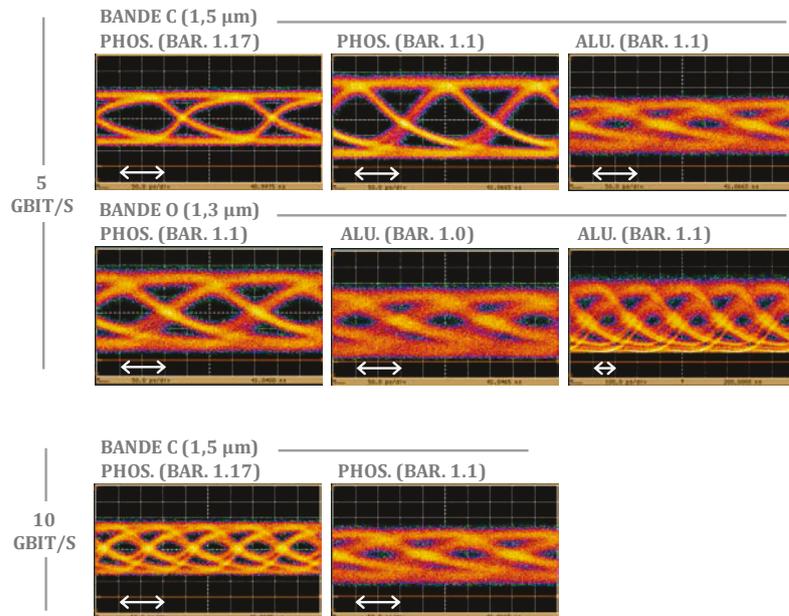


Figure 3.32- Diagrammes de l'œil à 5 et 10 Gbit/s des RSOA.

Ces disparités se retrouvent ans les Fabry-Pérot réalisés avec les structures correspondantes (figure 3.33). Les composants en aluminium sont limités par le temps de transition du 1 vers le 0 tandis que

ceux en phosphore sont encore ouverts à 10 Gbit/s. La résonance laser permet néanmoins d’obtenir un diagramme de l’œil ouvert à 10 Gbit/s en bande O phosphore, contrairement au RSOA.

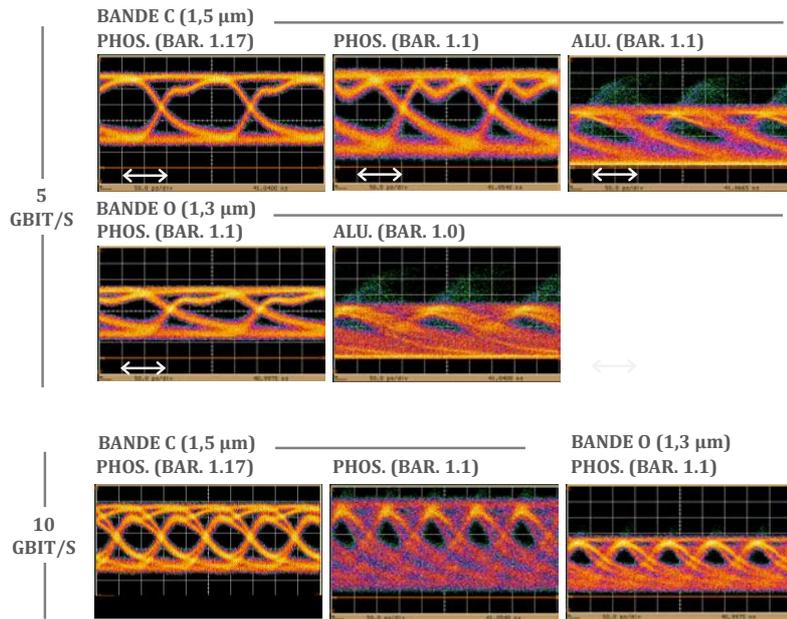


Figure 3.33- Diagrammes de l’œil à 5 et 10 Gbit/s des lasers Fabry-Pérot correspondants.

La réponse en amplitude de la modulation petit-signal confirme ces observations (figure 3.34). Entre 0 et 1 GHz, la pente des composants phosphore est relativement plate alors que celle des composants aluminium décroît très fortement. La fréquence de résonance du laser parvient à peine à compenser la perte de bande passante tant l’affaissement est brutal. Entre 0 et 3 GHz, la bande passante n’augmente plus au-delà de 100 mA à l’exception du phosphore bande C de hauteur de barrières 1,1 μm pour lequel le seuil est à 150 mA et du RSOA aluminium bande O (barrières à 1,1 μm) dont les performances en dynamiques sont à l’image de ses performances en statique. Les bandes passantes n’excédant pas 4 GHz, nous sommes moins intéressés par le comportement de la réponse après 5 GHz.

Plus précisément, trois pentes caractéristiques apparaissent à des fréquences de rupture autour de 1,5 et 5 GHz. La figure 3.35 résume les pentes de chaque RSOA à 100 et 200 mA sur les intervalles [0 ; 1,5 GHz], [1,5 ; 5 GHz] et [5 ; 10 GHz]. A 100 mA, les courbes ayant la plus forte chutes sont les RSOA aluminium en bande C et en bande O. La pente des RSOA de référence de 700 μm est satisfaisante mais celle de 1,5 mm est inférieure à 5 dB par décade. Cet ordre se conserve sur le second intervalle. Pour des fréquences supérieures à 5 GHz, les pentes convergent vers une valeur légèrement inférieure à 20 dB par décade. La convergence est la même à 200 mA. Remarquons que les écarts entre les composants sont plus resserrés en dessous de 1,5 GHz, y compris les composants de longueurs différentes. La thèse de Guilhem de Valicourt avait montré que les RSOA de 850 μm étaient plus rapides que des RSOA de 300 μm. Nous avons poursuivi l’étude sur les RSOA bande C avec des longueurs de 700 μm, 1 mm (traits pleins) et 1,3 mm (traits pointillés). La longueur 1 mm s’avère être la longueur “seuil”.

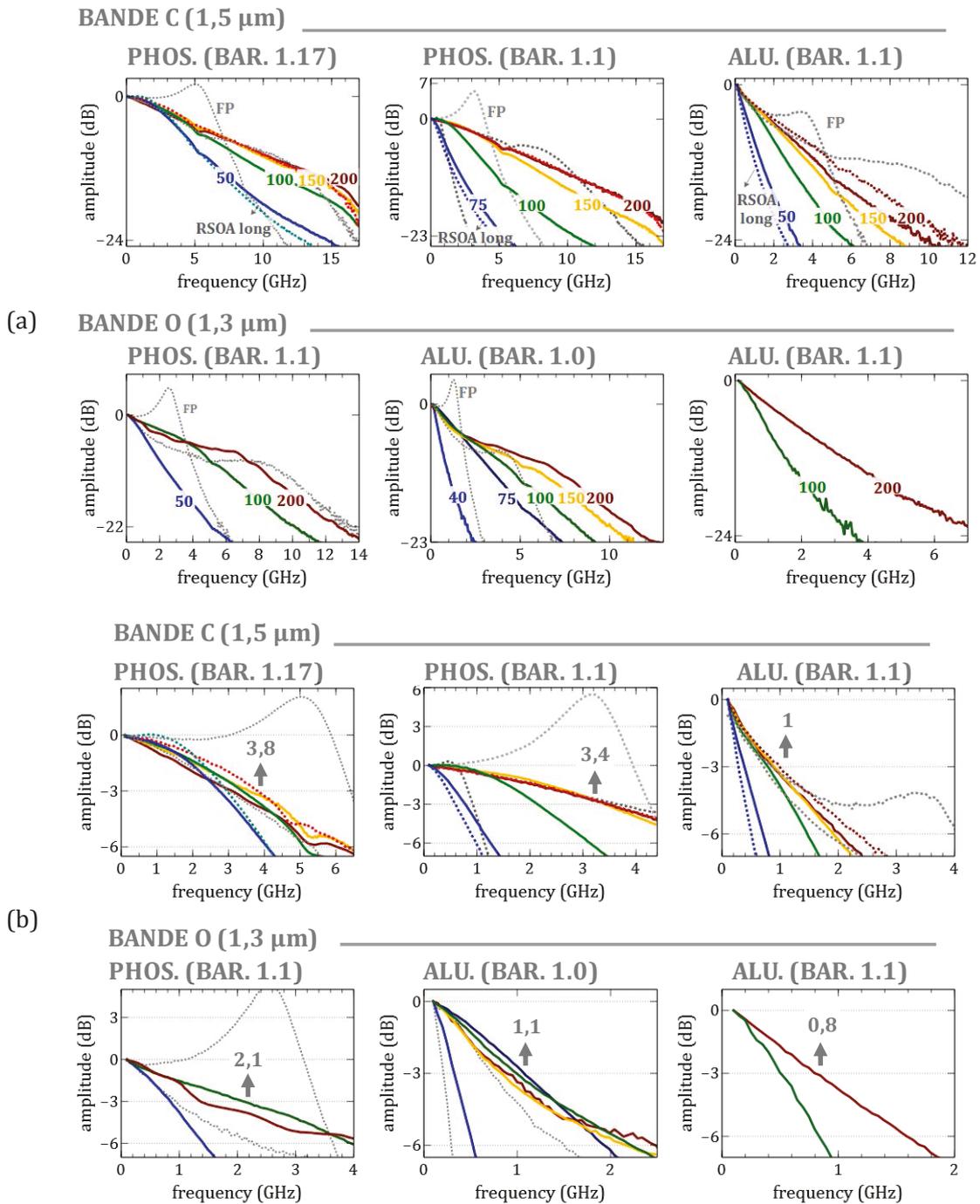


Figure 3.34- Bandes passantes en fonction du courant des RSOA des différentes structures, (b) est un agrandissement de (a).

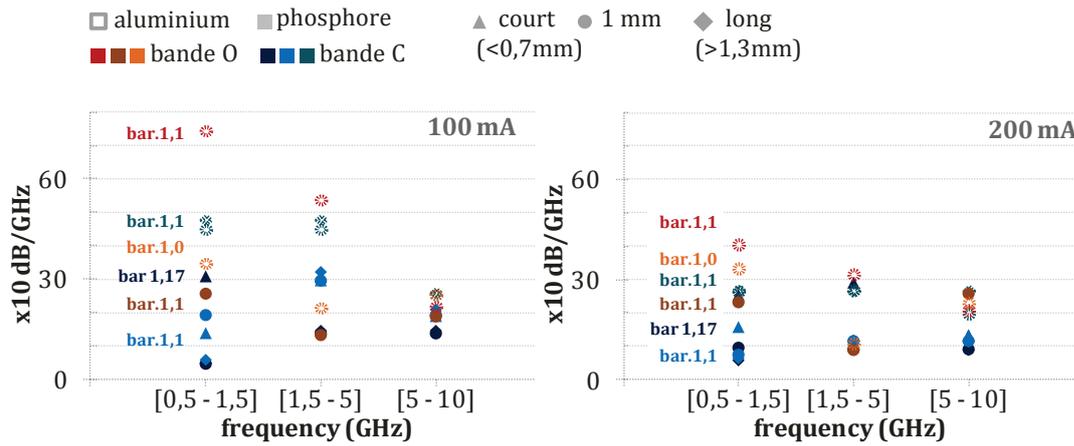


Figure 3.35- Pentes de la réponse petit signal en fonction de l'intervalle de fréquences (couleurs bleues : bande C, couleurs orangées : bande O, marqueurs vides : aluminium, marqueurs pleins : phosphore).

Mises en perspectives, bande passante du RSOA et bande passante du Fabry-Pérot correspondant (traits pointillés gris) possèdent le même comportement hors fréquence de relaxation. Cela prouve que nos RSOA BRS sont en partie limités par le temps de vie des porteurs mais aussi grandement par la capacité parasite liée au process BRS, surtout dans le cas des RSOA aluminium.

Mork et al. réussirent à modéliser l'allure de la bande passante [41]. Ils nommèrent par résonance le maximum que l'on peut observer sur les plaques phosphore et montrèrent qu'il augmente avec les pertes internes dans le guide de même qu'avec sa longueur.

3.4.3. Vieillessement et reproductibilité

En marge des performances brutes des composants, vieillissement et reproductibilité incarnent deux notions majeures dans notre ambition de valorisation.

Une bonne reproductibilité facilite le tri unitaire des composants, augmente le rendement et donc diminue les coûts. De plus, disposer de la variation d'une grandeur (puissance, *ripple*, etc. ...) d'un composant à l'autre aide à définir l'incertitude de mesure. Il s'agit d'un élément utile pour déterminer si l'on est capable de conclure quant aux différences observées entre deux structures différentes. Afin d'optimiser cette estimation, nous avons eu recours à une machine de tri automatique de la société *ficontec*. Nous avons intégré des marques de reconnaissance sur nos masques, adapté l'algorithme de la machine et écrit un programme de lecture et de tri des données. Plus précisément nous récupérons la courbe P(I) mesurée au détecteur large ainsi que le spectre par couplage fibré. Nous en déduisons la longueur d'onde au pic de gain, la largeur optique, le seuil, la puissance d'ASE à 100 mA et le *ripple*. En fonction des conditions souhaitées, on peut en extraire les composants unitaires à monter sur embase. Sans avoir mené une étude statistique poussée mais en ayant recoupé les mesures effectuées sur les dizaines de composants sur embase, nous avons dégagé quelques tendances. La largeur optique à 3 dB tout comme la longueur d'onde au pic de gain est relativement stable avec de faibles écarts-types. Le seuil et donc la puissance d'ASE à 100 mA sont plus variables. Ils pourraient révéler les écarts d'homogénéité lors de la fabrication.

LONGUEUR D'ONDE AU PIC DE GAIN	LARGEUR OPTIQUE	PUISSANCE ASE A 100 mA	SEUIL
relativement stable $\Delta\lambda_{\max} \sim 8$ nm $\sigma \sim 2$ nm	stable $\Delta\lambda_{\max} \sim 2$ nm $\sigma < 1$ nm	variable $\Delta P_{\max} \sim 4$ dB $\sigma \sim 2$ dB	relativement stable $\Delta I_{\max} \sim 10$ mA $\sigma \sim 2$ mA

Table 3.7- Variations des principales caractéristiques statiques d'un RSOA à l'autre.

De part sa forte oxydation, la fiabilité de l'aluminium est une problématique récurrente. Pour garantir le bon fonctionnement de nos composants, nous avons mené 500 heures de vieillissement sur les RSOA bande C en aluminium et en phosphore (barrières à 1,17 μm) à 100°C en injectant 200 mA. Aucune dégradation n'a été observée (tableau 3.8).

	DUREE VIEIL.	PUISSANCE TOTALE (100 MA)	PUISSANCE FIBREE (100 MA)	SEUIL	RIPPLE
RSOA, ALUMINIUM, BANDE C	500 h	$\Delta =$ [-0,6; +0,7]dB	$\Delta =$ [-0,9; +0,6]dB	$\Delta =$ [-3; +4]mA	$\Delta =$ [-1,5; +1,6]dB
RSOA, PHOSPHORE (REFERENCE)	500 h	$\Delta = +0,2$ dB	$\Delta = +0,5$ dB	$\Delta =$ [0; +2]mA	$\Delta = -0,4$ dB
RSOA PHOSPHORE BAR. 1,1 μm	48 h	$\Delta \sim -11$ dB	$\Delta \sim -12$ dB	$\Delta \sim +30$ mA	$\Delta \sim -5$ dB
FP PHOSPHORE, BANDE O	48 h	-	$\Delta = +0,5$ dB	$\Delta = +1$ mA	
FP PHOSPHORE BAR. 1,1 μm	96 h	$\Delta = -2$ dB	$\Delta = -1,5$ dB	$\Delta = +17$ mA	-
FP PHOSPHORE (REFERENCE)	48 h	-	$\Delta = +0,1$ dB	$\Delta = +0,5$ mA	

Table 3.8- Variations des principales caractéristiques statiques des RSOA bande C aluminium et phosphore et Fabry-Pérot phosphore bandes C et O après vieillissement.

Inversement, les nouveau RSOA phosphore bande C (barrières 1,1 μm) s'altèrent dès les premières 48 heures. Pour confirmation, nous avons réalisé des vieillissements sur des Fabry-Pérot de même structure à 150 mA et 100°C. Ses caractéristiques statiques subissent un affaissement les premières 48 heures puis se stabilisent. Quoique moins marqué que pour les RSOA, cet affaissement est trop important pour que les composants soient utilisables. Cela laisse suggérer une mauvaise qualité matériau dont la cause proviendrait de l'épitaxie, de la fabrication ou de la reprise. Ce défaut est cohérent avec les moins bonnes performances globales du composant. Dans des conditions d'utilisation classiques à 20°C et 100 mA, la dégradation s'effectue plus lentement et n'est pas visible à moyen terme.

Enfin, la structure bande O phosphore a simplement été testée via des Fabry-Pérot sur 48 heures. Nous n'avons pas observé d'altération.

Les premières caractérisations menées sur les nouveaux lots de RSOA amènent à des résultats contre-intuitifs : le matériau aluminium n'apporte pas d'amélioration significative en comparaison au phosphore de référence mais est fiable dans le temps tandis que les nouveaux lots en phosphore sont moins performants que les anciens. Avant d'analyser un peu plus ces comportements, poursuivons les caractérisations avec l'influence de la température.

3.5. Influence de la température

Afin d'évaluer l'influence de la température sans l'échauffement provoqué par l'injection de courant, nous avons utilisé une source pulsée avec un détecteur large (figure 3.36). De manière générale, les RSOA saturent moins vite que les Fabry-Pérot correspondants et atteignent donc des niveaux de puissance plus élevés.

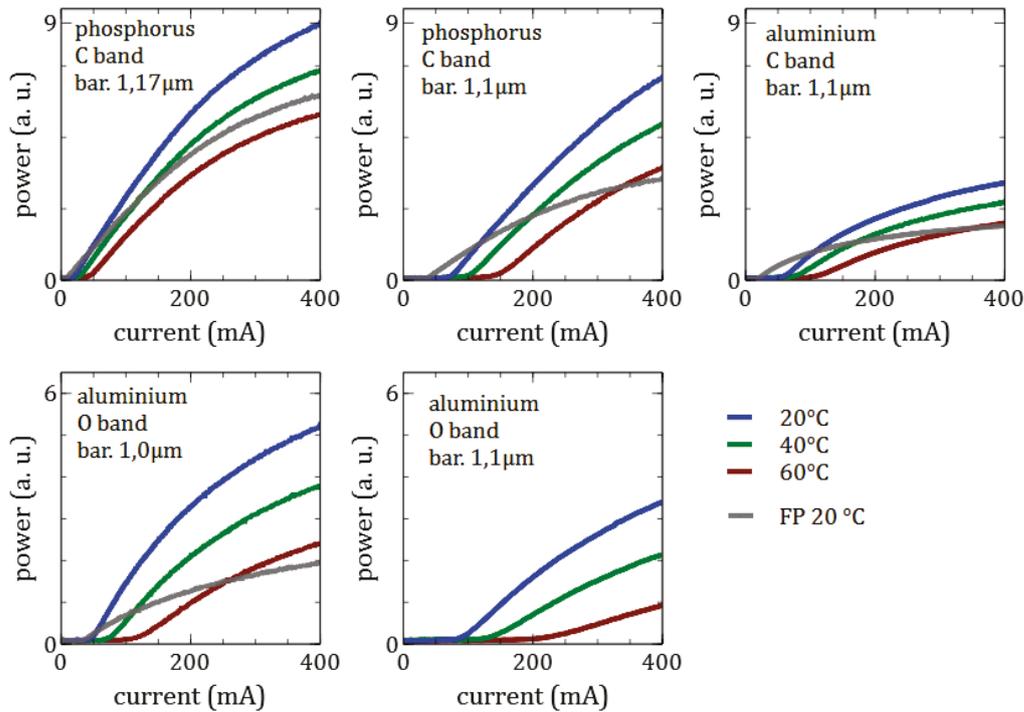


Figure 3.36- Puissance en fonction du courant et de la température. Mesures effectués avec une source pulsées. Courbe grise : Fabry-Pérot.

Qualitativement, il semble que les écarts de puissances entre 20 et 60°C soient un peu plus marqués dans les matériaux aluminium, notamment en bande O. D'un point de vue quantitatif, nous avons relevé les seuils de chaque composant en fonction de la température (figure 3.37). La dépendance est linéaire. Comme attendu, la plus faible dépendance concerne la plaque phosphore de référence avec une dérive de 6,5 mA/10° C et la plus forte dépendance concerne la plaque aluminium bande O de barrières à 1,1 μm avec une dérive de 29 mA/10° C. Le seuil de la seconde plaque phosphore bande C aux barrières à 1,1 μm se décale relativement fortement, de 19 mA par 10° C. En revanche les plaque aluminium bande C et O et la plaque phosphore bande O ont un bon comportement (14 mA/ 10° C). Les Fabry-Pérot se comportent légèrement différemment. La plaque phosphore présente toujours la plus faible variation et la seconde plaque phosphore la plus forte. Le Fabry-Pérot bande C aluminium évolue peu avec la température, suivi du Fabry-Pérot bande O phosphore. Le Fabry-Pérot bande O aluminium de barrière 1,0 μm varie fortement.

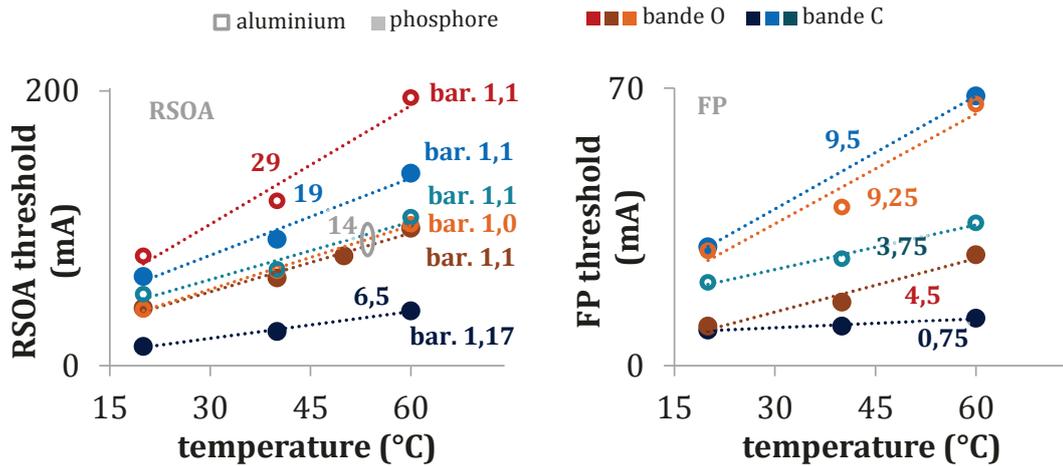


Figure 3.37- Evolution du courant du seuil du RSOA et du seuil du Fabry-Pérot correspondant. Pentes données en mA/10°C.

Pour quantifier un peu plus le comportement en température, nous nous sommes intéressés à la variation de puissance. Nous avons relevé les puissances à plusieurs courants et plusieurs températures. A un courant donnée la variation ΔP (mW) sur ΔT (°C) est linéaire (figure 3.38). Nous avons alors comparé les pentes à plusieurs courants et les avons mis en perspective entre tous les composants. De plus, nous avons vu que le courant de seuil varie du simple au triple d'un composant à l'autre. En plus de tracer les pentes en fonctions du courant, nous les avons tracés en fonction du rapport courant sur courant de seuil de chaque composant (figure 3.39).

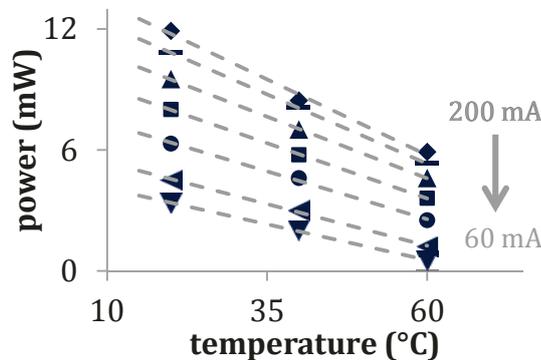


Figure 3.38- Evolution de la puissance en fonction de la température pour différents courants dans le RSOA de référence (phosphore bande C barrières à 1,17 μm).

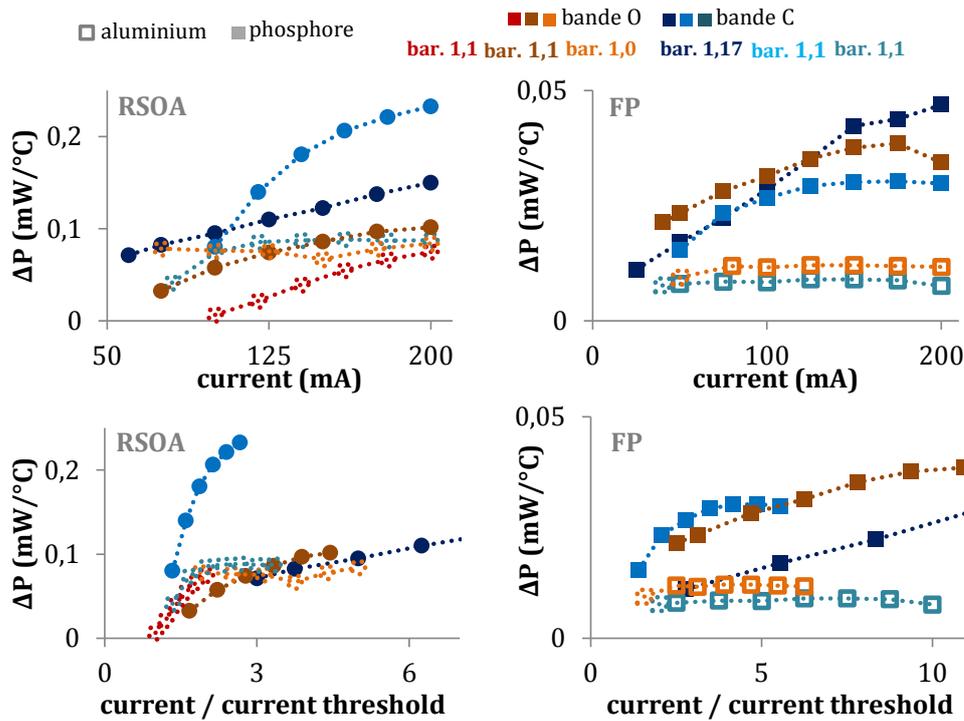


Figure 3.39- Pentes (valeur absolue) en mW/°C/mA des RSOA et des FP en fonction du courant et en fonction du rapport courant sur courant de seuil.

Chaque RSOA possède un comportement différent. La perte de puissance en fonction du courant en fonction de la température augmente constamment dans le RSOA de référence de même que dans le RSOA bande O aluminium de barrières 1,1 μm . La pente $\Delta P/\Delta T$ du RSOA aluminium de barrières 1,0 μm ne varie pas en fonction du courant. De même pour le RSOA aluminium bande C. Celle du RSOA bande O phosphore augmente légèrement en “cloche” tandis que celle du RSOA phosphore bande C de barrières 1,1 μm a une forme plus marquée.

Si l’on trace cette même courbe en fonction non plus du courant mais du ratio courant/ courant de seuil, alors tous les RSOA exhibent le même comportement à l’exception du nouveau RSOA phosphore bande C. La pente $\Delta P/\Delta T$ n’évolue que très sensiblement pour les courants supérieurs à deux fois le courant de seuil.

Les pentes $\Delta P/\Delta T$ des Fabry-Pérots en aluminium bande C et O (barrières 1,0 μm) sont très faibles et n’évoluent pas en fonction du courant tandis que celles des nouvelles plaques phosphore bande O et C sont plus élevées et augmentent avant de se stabiliser. La dépendance du Fabry-Pérot de référence est linéaire en fonction du courant et de la température. Le graphique avec pour abscisse le ratio courant sur courant de seuil n’apporte pas d’information supplémentaire.

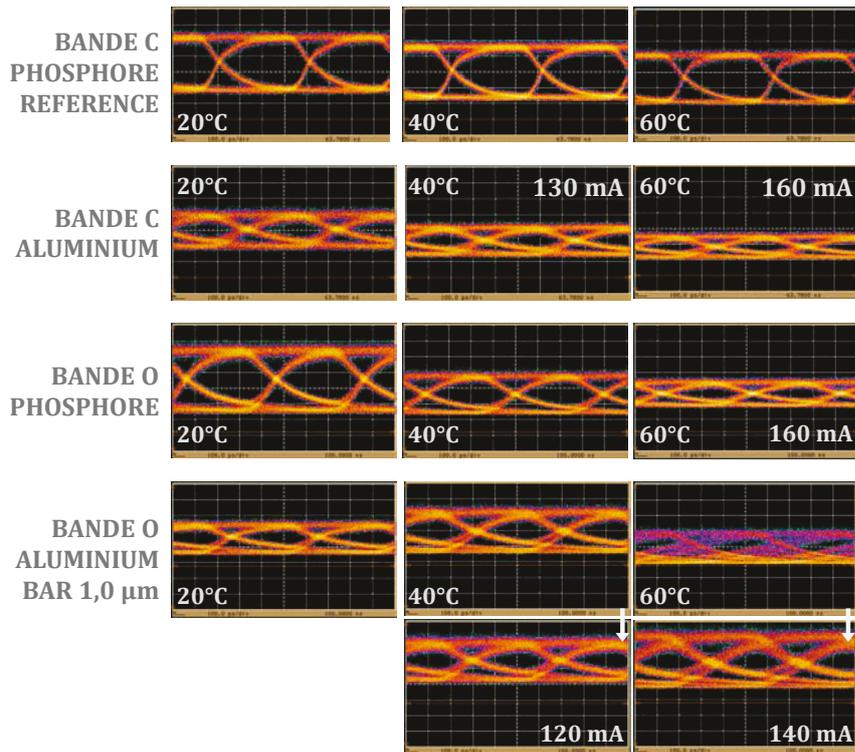


Figure 3.40- Diagrammes de l'œil à 2,5 Gbit/s des RSOA de 20 à 60 °C en ajustant le courant injecté (par défaut I = 100 mA).

En régime dynamique et à un débit acceptable par tous les composants, la température altère l'ouverture de l'œil (figure 3.40) mais l'effet de la température peut être contrebalancé en augmentant le courant. Seul le RSOA de référence ne nécessite pas d'adaptation. Ce phénomène se retrouve dans les bandes passantes petit-signal. La température décale le courant pour lequel la bande passante atteint sa valeur maximale. Le passage de 40 à 60°C est plus marqué que le passage de 20 à 40°C. Bien que le RSOA phosphore bande C de barrières à 1,1 μm n'ait pas atteint sa valeur maximale à 200 mA, sa bande passante demeure plus élevée que celle du RSOA aluminium (figure 3.41).

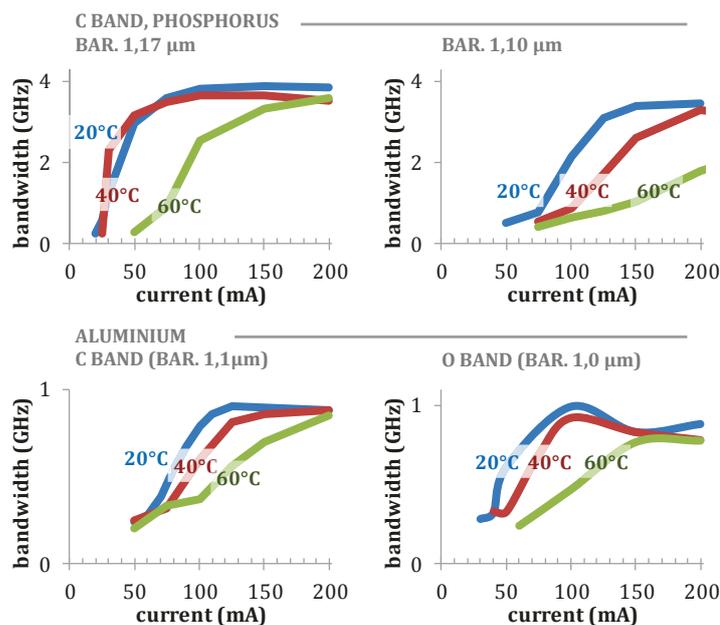


Figure 3.41- Bandes passantes à -3 dB en fonction de la température et du courant.

3.6. Analyse

Dynamique du RSOA

Dans leur modèle, Antonelli et al. [11] indiquèrent que la bande passante à -3 dB pourrait augmenter avec le temps de vie des porteurs à très fort courant, principe assez contre-intuitif. Comparons les diagrammes de l'œil à un débit pour lequel aucun de nos RSOA n'est limité, 2,5 Gbit/s. L'ouverture de l'œil est limitée par le temps de transition d'un 1 vers un 0, court pour le RSOA de référence, long dans les RSOA aluminium bande O. Il existe plus exactement deux constantes de temps, une plutôt rapide en début de transition (en bleu sur la figure 3.42) et une seconde plus lente pour atteindre le 0 (en orange sur la figure 3.42). Malgré l'aspect qualitatif de cette démarche, il semble même que la première constante de temps du RSOA phosphore soit plus lente que celle des RSOA aluminium. On attribue cette décroissance à de l'émission stimulée, la densité de photon étant encore élevée. Après recombinaison stimulée, le nombre de photons devient faible et les porteurs se recombinent autrement. En fonction des phénomènes mis en jeu, les recombinaisons peuvent être rapides (RSOA phosphore de référence) ou longues (RSOA aluminium bande O barrières 1,0 μm). L'enjeu réside donc à identifier ces phénomènes. Il rejoint les problématiques lasers étudiées dès la fin des années 1980 et sur lesquelles nous reviendront.

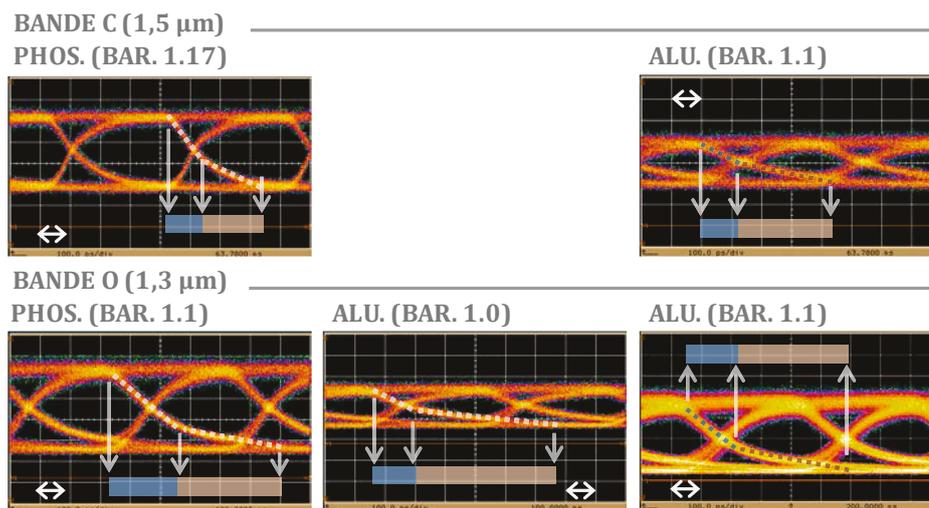


Figure 3.42- Diagrammes de l'œil à 2,5 Gbit/s pour les différents RSOA et temps caractéristiques de la décroissance de 1 vers 0 et constantes de temps caractéristiques.

Un second point de vue couramment utilisé dans les applications SOA (*cross gain modulation*, *self-gain modulation*...) est la mesure pompe sonde qui informe sur le temps de recouvrement du gain. Néanmoins les paramètres sont multiples, notamment la longueur d'onde, la largeur de la pulsation et la puissance injectées [73]. Nous n'entrerons donc pas dans les détails de la mesure mais l'utiliserons comme un éclairage supplémentaire. En effet, à chaque partie de la courbe correspond un phénomène particulier [74]. L'injection de la pompe déplete d'abord les porteurs. La descente est provoquée par l'absorption, elle est similaire d'un RSOA à l'autre et dépend essentiellement de la source. Puis le gain se reforme par injection des porteurs. Les ruptures de pentes de la courbe indiquent des phénomènes de recombinaisons différents. Le temps de recouvrement dans un amplificateur est d'autant plus rapide que l'émission stimulée (l'ASE par exemple) est forte [75].

Nous avons regroupé sous un même graphique la réponse du RSOA phosphore de référence avec celle du RSOA aluminium bande C (figure 3.43). Leurs temps de recouvrement sont significativement distincts (115 ps pour le RSOA phosphore, 270 ps pour le RSOA aluminium).

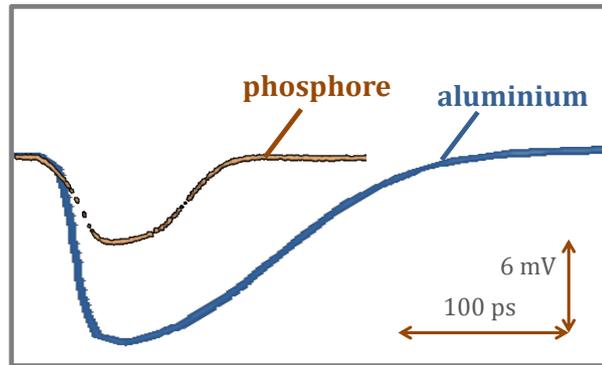


Figure 3.43- Mesures pompes sondes sur le RSOA phosphore de référence et le RSOA bande C aluminium. Courbes superposées, échelles différentes.

Au regard des mesures précédentes, les RSOA aluminium se révèlent plus lents que les RSOA phosphore. Les mesures d'émission spontanée sont capables de mettre en évidence si l'émission stimulée domine ou non.

Emission spontanée dans les RSOA

La figure 3.44 représente les courbes de puissance d'émission spontanée en fonction du courant de nos RSOA et du Fabry-Pérot correspondant. Dans le RSOA, les mesures ont été prises du côté entrée/sortie, au milieu du ruban (non représenté) et côté miroir appelé " HR " sur les graphiques par abus de langage. Les courbes ont été normalisées en supposant une répartition uniforme des porteurs à très faible courant (1 à 2 mA). Rappelons que la puissance d'émission spontanée est proportionnelle à la densité de porteurs au carré.

A faible courant, l'évolution de la densité de porteurs dans le Fabry-Pérot et dans le RSOA est la même. En continuant à injecter des porteurs, le Fabry-Pérot bascule dans un régime stimulé et sa courbe se clampé (paragraphe 3.1.3). A 20°C, côté miroir, la densité de porteurs continue à augmenter mais plus lentement. Côté entrée/sortie, les courbes sont différentes selon les composants. Dans le RSOA phosphore de référence, la densité de porteurs n'est pas tout à fait clampée, elle s'accroît sensiblement avec le courant tandis qu'elle est constante dans le RSOA phosphore bande C de barrières 1,1 μm , dans le RSOA phosphore bande O et dans le RSOA aluminium bande O de barrières 1,0 μm . Dans le second RSOA aluminium bande O de barrières plus faibles, la densité de porteurs n'est pas totalement clampée. Enfin, les puissances d'émission spontanée mesurées au miroir et en sortie dans le RSOA aluminium bande C se superposent quasiment à 20°C et complètement à 45°C. L'émission stimulée transparait seulement à 14°C.

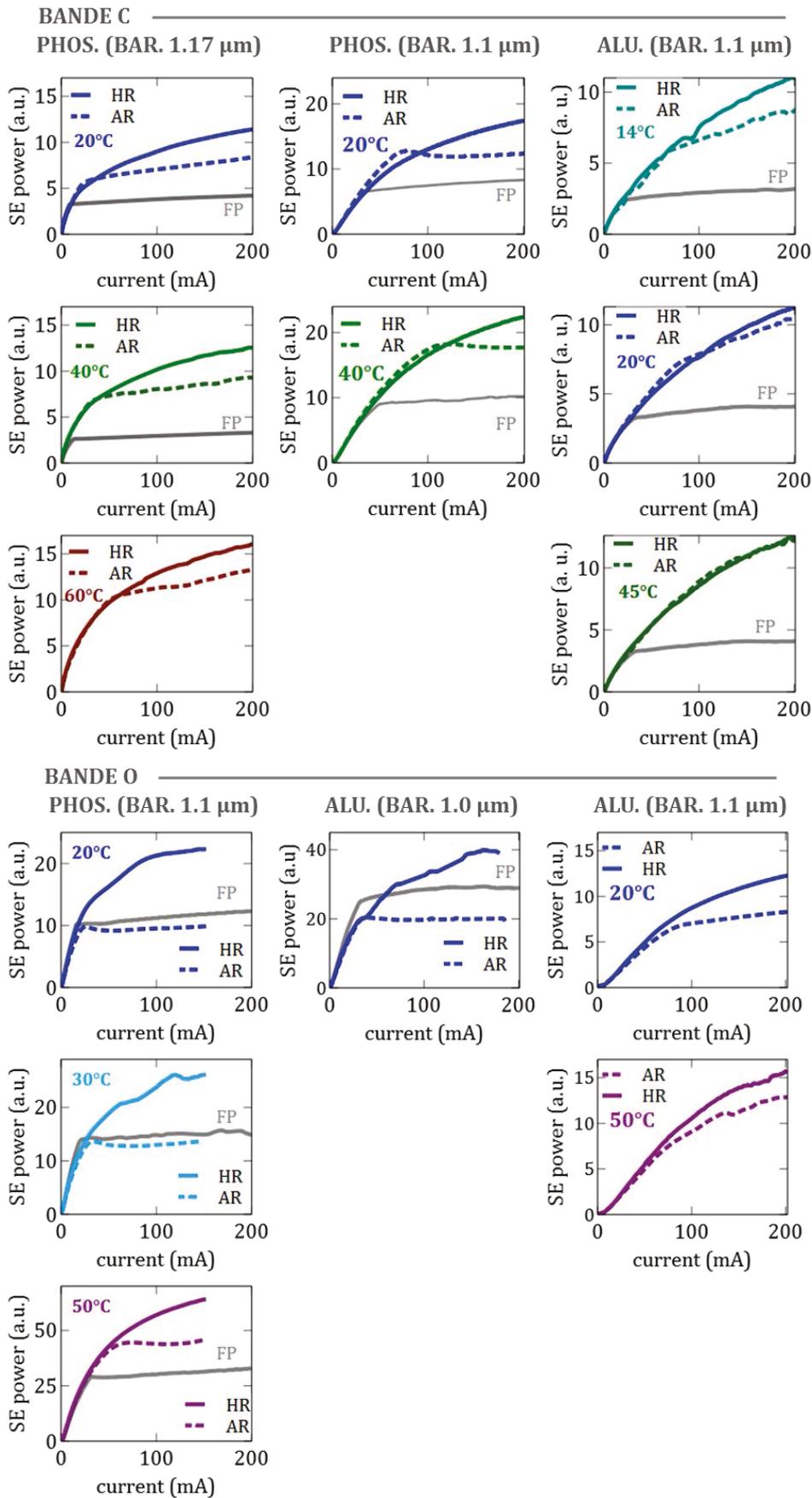


Figure 3.44- Courbes P(I) normalisées à 2 mA pour comparer la répartition de la densité de porteurs le long du composant en fonction de la température. Comparaison avec le Fabry-Pérot correspondant.

Le caractère plus ou moins clampé des courbes précédentes apporte des informations supplémentaires sur la réponse dynamique des RSOA. Des études récentes sur la modélisation dynamique des RSOA ont introduit la notion de localisation de la modulation [7]. En d'autres termes la modulation s'appliquerait de manière préférentielle en une zone du composant. Si cette zone est dominée par de l'émission stimulée comme la zone d'entrée/sortie dans la plupart des RSOA, alors la faible variation de courant est convertie en une variation de la densité de photons. En revanche si la modulation est appliquée préférentiellement au niveau du miroir, elle est appliquée dans une zone de régime d'émission spontanée et ne sera pas convertie en une variation de la densité de photons. Nous avons quantifié la "force" de l'émission stimulée au travers du rapport des puissances normalisées d'émission spontanée au niveau du miroir et au niveau de l'entrée/sortie (figure 3.45). A 20°C et 200 mA la puissance d'émission spontanée côté entrée/sortie égale environ à 70 % de la puissance côté miroir pour les RSOA phosphore et aluminium bande C et, étonnamment, pour le RSOA aluminium bande O d'hauteur de barrières élevée. Il est d'environ 50 % pour les RSOA bande O phosphore et aluminium (barrières 1,0 μm). Cet écart se réduit avec la température pour atteindre une valeur de 1 : puisque le seuil du RSOA se décale avec la température, la puissance d'émission spontanée se clampé à une valeur plus élevée donc plus proche de la puissance d'émission spontanée côté miroir (figure 3.44). Notons que le ratio du RSOA phosphore de référence varie peu avec la température (moins de 0,1 point), celui du RSOA bande O aluminium de faible barrière se stabilise après 30° C.

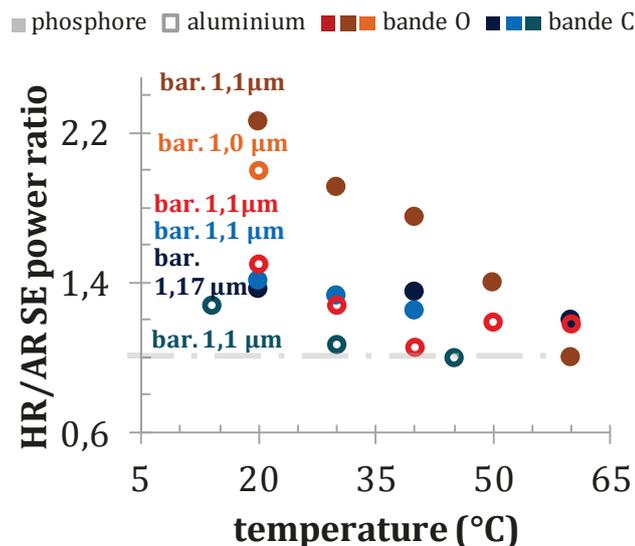


Figure 3.45- Rapport de la puissance normalisée mesurée en entrée/sortie ("AR") et côté miroir ("HR") du RSOA à 200 mA en fonction de la température.

Nous avons comparé les courbes P(I) pour différentes températures en supposant un couplage optimal à chaque fois (figure 3.46). Cette hypothèse nous permet de nous affranchir de l'évaluation du facteur de collecte. Côté miroir, la puissance diminue avec la température pour tous nos RSOA. Il en est de même côté entrée/sortie pour les puissances d'émission spontanée des RSOA phosphore bande O et bande C en dessous de leur seuil. Cette baisse de puissance traduit la diminution du nombre de porteurs effectivement injectés dans la zone active, diminution due aux fuites décrites dans les paragraphes précédents. En régime stimulé, la densité de porteurs augmente avec la température laissant suggérer une moins bonne efficacité des mécanismes de recombinaison. En bande O, l'augmentation est telle qu'à 60°C, les recombinaisons basculent en régime d'émission spontanée.

Nous avons constaté en figure 3.44 que l'émission spontanée dominait tout le long du RSOA aluminium bande C. La diminution de la puissance avec la température tant du côté miroir que du côté

entrée/sortie le confirme. Le RSOA aluminium bande O (barrières d' hauteur 1,1 μm) présente aussi un comportement atypique par rapport aux RSOA phosphore : la puissance d'émission spontanée côté entrée/sortie augmente avec la température exprimant potentiellement le passage soudain au régime d'émission spontanée au-delà de 30°C.

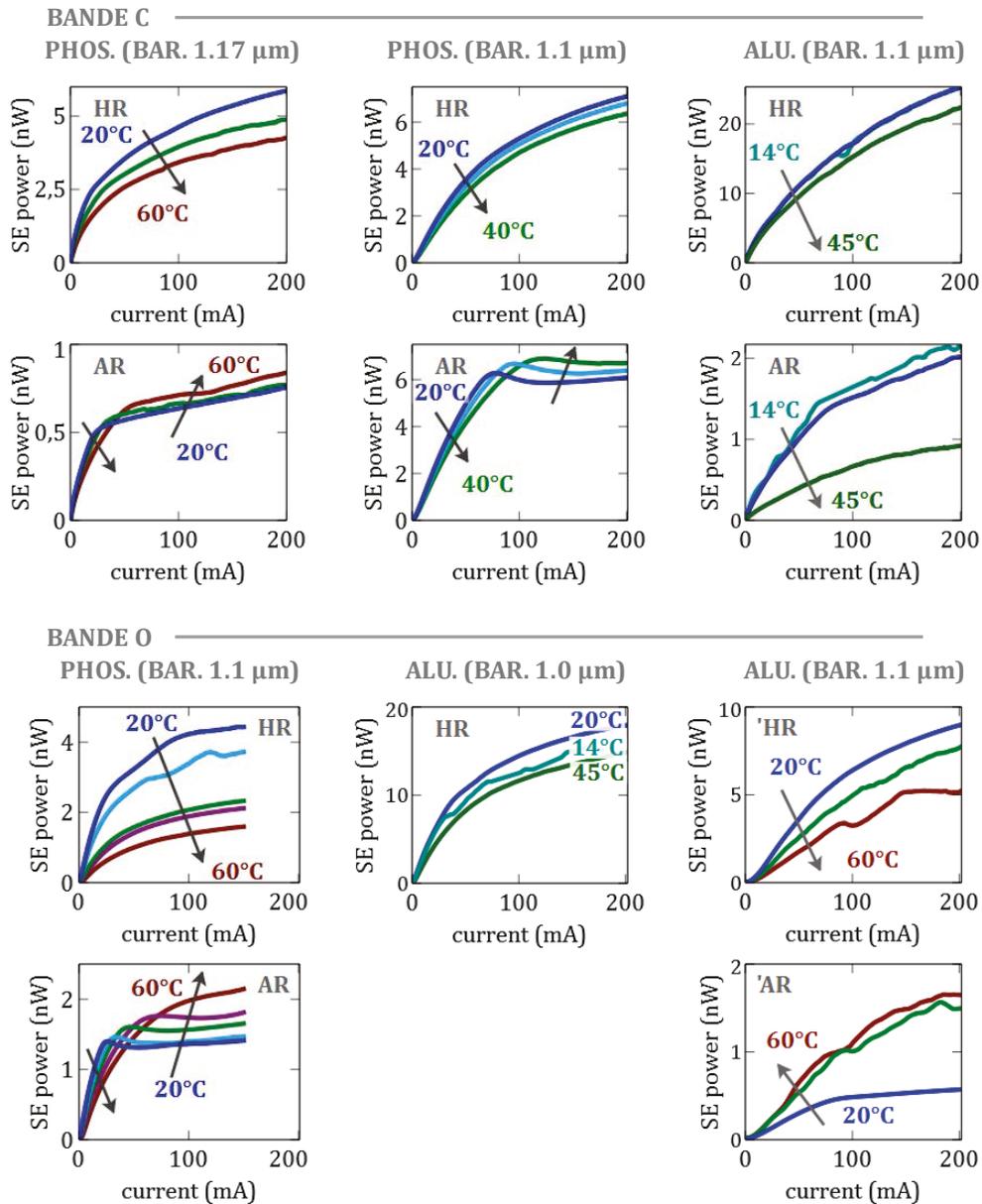


Figure 3.46- Puissance en fonction du courant et de la température côté miroir et en sortie des RSOA.

Ces mesures de puissance d'émission spontanée nous permettent de comprendre, au moins partiellement, les écarts de rapidité entre les composants. Les composants rapides sont ceux au *spatial hole burning* prononcé, c'est-à-dire avec un régime d'émission stimulée prononcé en entrée/sortie du RSOA. Elles laissent aussi suggérer des mécanismes différents entre bande C et bande O, en particulier à haute température.

Ces mesures ne permettent toutefois pas de comprendre ce qui provoque le basculement d'un régime spontané à un régime stimulé et réciproquement. Des éléments de réponse sont apportés par les spectres correspondants. Les spectres d'émission spontanée nous renseignent sur le remplissage des états électroniques, sans déformation par le gain matériau.

La figure 3.47 compare les spectres de RSOA mesurés au niveau du miroir et de l'entrée/sortie avec celui du Fabry-Pérot correspondant. Sous le seuil du RSOA, les trois courbes se superposent. Dans le Fabry-Pérot comme au niveau de l'entrée/sortie du RSOA, le pic de puissance augmente puis sature lorsqu'on augmente le courant (figure 3.48). A fort courant, ces deux spectres continuent à se superposer dans le cas des RSOA phosphore et bande O aluminium de barrières à 1,0 μm . Cela est cohérent avec les mesures de puissances de la figure 3.44. En régime stimulée, on injecte des porteurs jusqu'à remplir le niveau fondamental. Les porteurs supplémentaires se recombinaient avec les photons incidents.

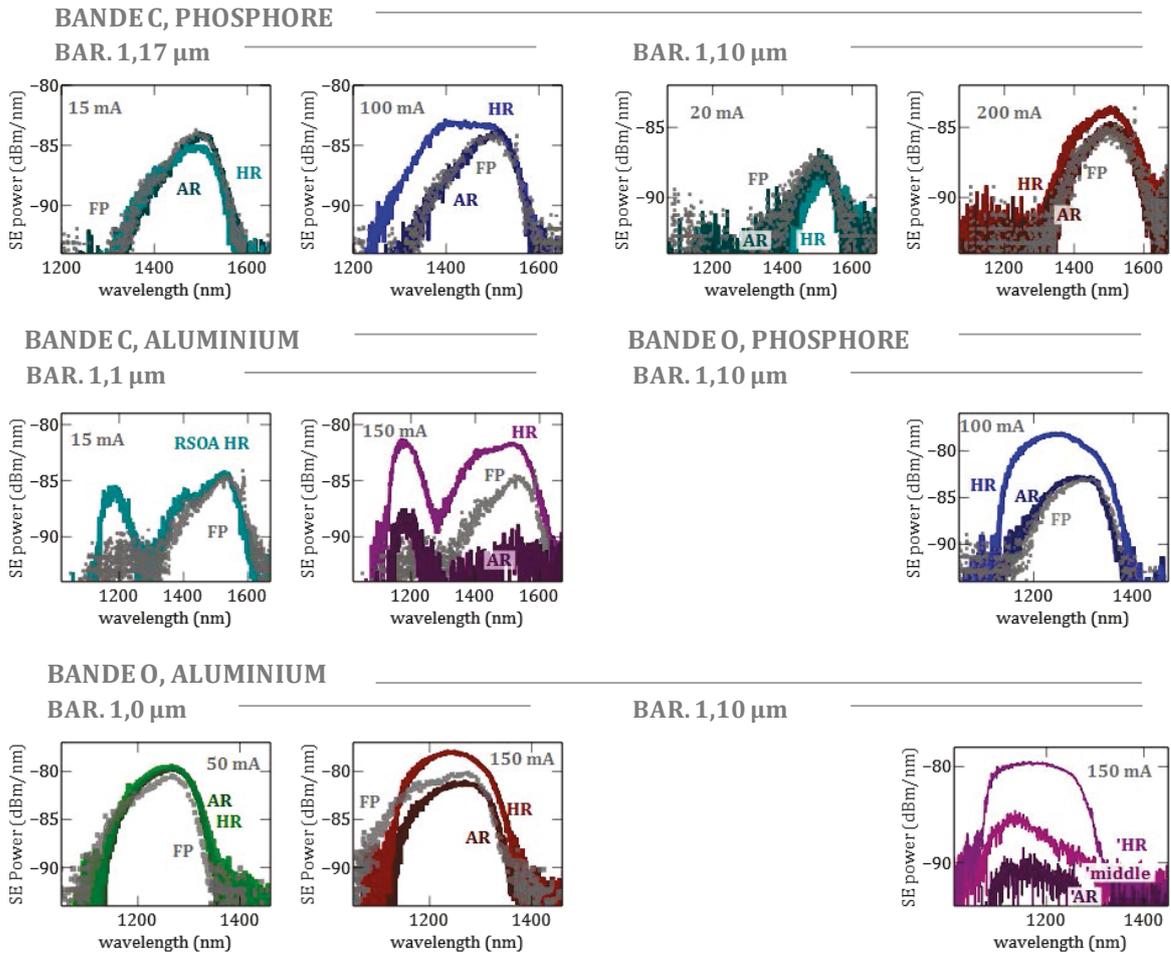


Figure 3.47- Comparaison des spectres d'émission spontanée à différents endroits du RSOA et spectre d'émission spontanée du Fabry-Pérot correspondant.

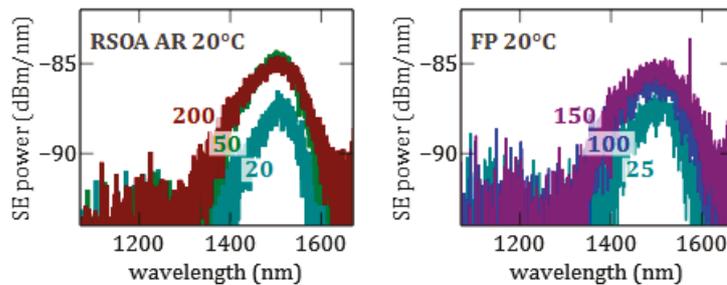


Figure 3.48- Evolution des spectres d'émission spontanée de la structure phosphore bande C (barrière 1,1 μm) mesurés sur un RSOA côté AR et un Fabry-Pérot.

En régime d'émission spontanée, l'injection de porteurs supplémentaires remplit les états suivants (e_1hh_2 puis e_1hh_3 ou e_1lh_1). Ils ont un *gap* plus élevé donc sont de plus basse longueur d'onde. C'est ce que l'on observe sur la figure 3.49 avec l'élargissement progressif des spectres mesurés au niveau du miroir.

La figure 3.47 révèle que les spectres ont une pente abrupte autour de 1132 nm. Cette chute est visible sur les RSOA bande O mais aussi sur le spectre du RSOA aluminium bande C. Il peut s'agir soit de fuites ou plus probablement de l'absorption des quaternaires. La forme du spectre d'émission spontanée peut être décrite par le produit de la statistique de Fermi-Dirac avec la densité des états joints. La pente à basses longueurs d'ondes varie en $\exp(-\Delta E/kT)$ et est d'autant plus grande que la température est basse [76].

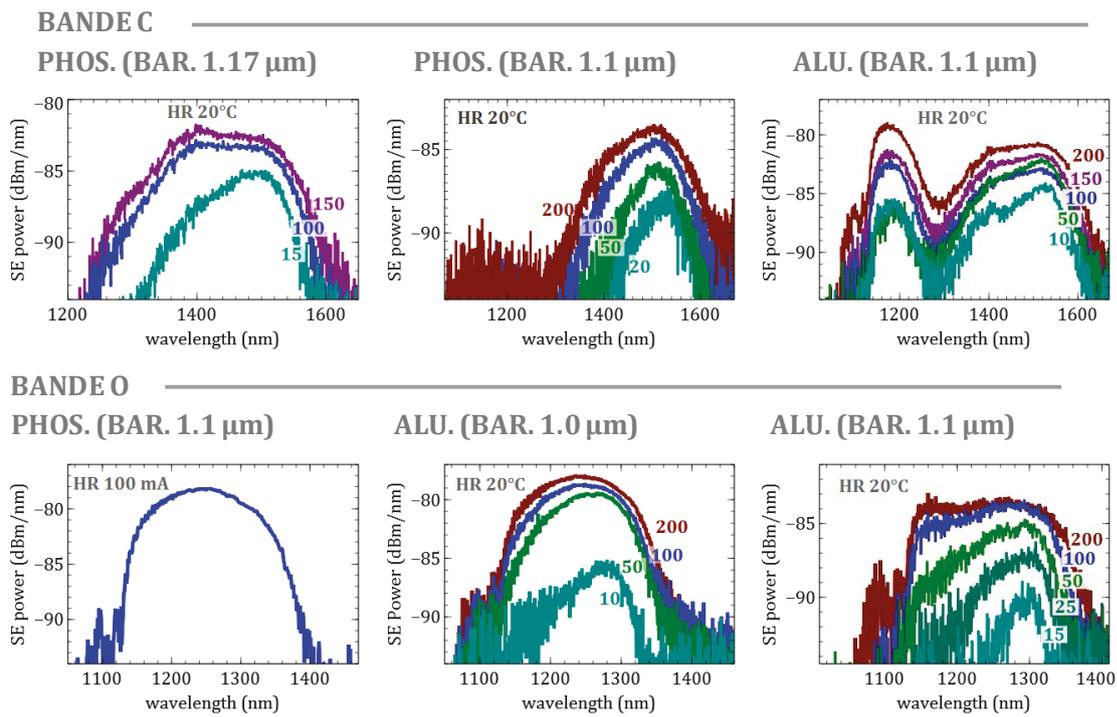


Figure 3.49- Spectres d'émission spontanée en fonction du courant des RSOA.

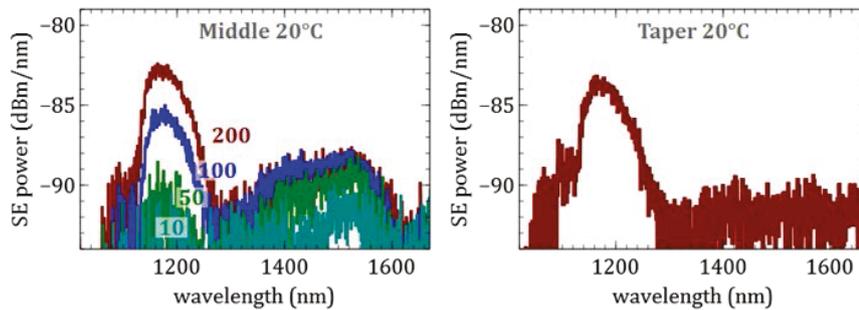


Figure 3.50- Spectres d'émission spontanée du RSOA bande C aluminium de barrières à 1,17 μm .

L'aspect du spectre du RSOA aluminium bande C indique une fuite des porteurs vers un matériau de *gap* 1,17 μm . Il peut s'agir de la semelle ou de la SCH. Des mesures complémentaires au niveau du *taper* confirment la semelle comme étant la source de ces recombinaisons spontanées non souhaitées (figure 3.50). Alors que le remplissage des états de la zone active sature vers 100 mA, le pic à 1,17 μm augmente continuellement avec le courant. La puissance totale liée à ce pic demeure sans doute moindre que les émissions de la zone active car le pic est plus étroit. Néanmoins, la semelle fait compétition à

la zone active. Cette compétition est aussi visible en milieu de composant où les recombinaisons dans la zone active sont marginales par rapport à celles dans la semelle (figure 3.50). Ces observations confirment le régime spontané tout le long du composant déduit de la figure 3.44. On n'explique cependant pas comment les électrons peuvent se recombiner préférentiellement dans un matériau de *gap* plus élevé. Une hypothèse pourrait provenir des barrières, de hauteur insuffisante et dans lesquelles les porteurs se recombineraient.

Fuites et recombinaison Auger

Connelly a récemment modélisé l'importance des recombinaisons Auger et du processus de capture/ échappement dans les SOA à puits quantiques contraints [6]. Tout deux contribuent à la déplétion des porteurs. Le processus de capture/échappement s'accroissant avec l'injection des porteurs, Connelly propose d'augmenter la hauteur des barrières. D'autres modélisations indiquent en effet que le temps d'échappement des porteurs est principalement déterminé par le nombre d'électrons confinés d'énergies supérieures à celle de la barrière [77]. Totovic et al. ont même montré que la réponse du RSOA pouvait être sensiblement accrue par un temps de capture plus faible et un temps d'échappement plus grand [78]. Dans nos structures, les électrons ont un confinement d'une centaine de meV et celui des trous est compris entre 150 et 200 meV. Dans les structures aluminium, le confinement des électrons est compris entre 160 et 190 meV, celui des trous est autour de 160 meV (paragraphe 2.3.3, chapitre 2).

A contrario, si la hauteur de barrières est trop grande, on accroît la non-uniformité de la distribution des porteurs dans les puits quantiques qui conduit à un excès d'électrons du côté p de la jonction [79]. Les recombinaisons Auger ayant une dépendance cubique à la densité de porteurs, la désymétrisation causée par une hauteur de barrières trop grande entraîne celle de l'Auger et *in fine* une augmentation des fuites [80].

Les recombinaisons Auger ont d'ores et déjà été identifiées expérimentalement et théoriquement comme étant le processus dominant dans les SOA [4, 76]. Il a aussi été montré que les recombinaisons Auger contribuaient à 50 % dans le seuil des lasers à 1,3 μm et à 80 % dans celui des lasers à 1,5 μm [81], ordre logique puisque l'Auger augmente avec la diminution du *gap*. Ainsi la valeur du coefficient de recombinaisons C_{Aug} est estimée être plus de deux fois plus faible à 1,3 μm qu'à 1,5 μm [82]. En revanche, il ne semble pas y avoir de différence significative entre les matériaux en phosphore de ceux en aluminium [25, 83, 84].

Tendances globales

Parmi les six structures étudiées, deux présentent des anomalies notoires.

Le confinement des électrons et des trous dans le RSOA aluminium bande O de barrières à 1,1 μm sont relativement faibles. Cela a pour conséquences de l'absorption à faibles longueurs d'ondes et une bande passante limitée.

Dans les RSOA aluminium bande C, les porteurs fuient et se recombinent spontanément dans la semelle. Il y a donc peu de recombinaisons stimulées, son temps de réponse est lent.

Globalement les RSOA bande C sont plus rapides que les RSOA bande O. Assez contre-intuitivement, on attribue cette propriété par l'effet des recombinaisons Auger qui consomme les porteurs même lorsque les densités de photons sont faibles. Ils consomment donc les porteurs résiduels dont le temps de vie caractéristique est particulièrement long. Ces recombinaisons, prédites par la littérature, s'observent indirectement sur nos mesures par la puissance d'émission spontanée au niveau de

l'entrée/sortie du RSOA qui continue à croître avec le courant alors que celle des RSOA bande O reste clampée par l'émission stimulée.

La lenteur des RSOA aluminium au regard des RSOA phosphore s'explique aussi par un temps de vie des porteurs long en présence de faibles densités de photon. La bande passante médiocre des Fabry-Pérot aluminium laisse aussi penser une anomalie matériau provenant éventuellement de l'enterrement des rubans. La pente de la réponse petit-signal est abrupte à basses fréquences (inférieures au GHz) alors qu'elle est plate dans les composants phosphore. Nous n'avons cependant pas réussi à identifier plus précisément la cause de cette décroissance.

La relative bonne tenue en température des RSOA et des Fabry-Pérot aluminium en statique et en dynamique confortent en partie le choix de ce matériau.

Les écarts de performances entre les RSOA phosphore d'hauteur de barrière différente soulignent l'importance du confinement des trous et des porteurs. Des barrières trop élevées détériorent les caractéristiques statiques et dynamiques.

Au travers de la succession de ces mesures, le seuil du RSOA apparaît comme un élément clef qui définit aussi bien le gain que la bande passante.

Conclusion du chapitre 3

Dans les premiers chapitres, nous avons mesuré l'importance de la source émettrice placée dans une cavité auto-alimentée. Le RSOA offrant des promesses de performances et de coût, il s'est imposé face aux autres solutions telles que le Fabry-Pérot. Les premiers résultats sont même allés au-delà de la simple preuve de concept, imposant cette architecture comme un candidat crédible pour les nouveaux réseaux d'accès. Pourtant, la marche à franchir restait encore grande avant de prétendre à une implémentation ou l'entrée dans les normes éditées par les organismes internationaux. Pour monter en débit et être compétitif économiquement, nous avons envisagé de remplacer le quaternaire traditionnel phosphore par un quaternaire aluminium et de changer de bande d'émission.

L'évaluation de ces nouvelles générations de composant n'ont toutefois tenu leurs promesses que partiellement. Les RSOA bande O quoique moins rapides que les RSOA en bande C permettent des transmissions grande distance, ayant pour seul limite le budget optique. Les RSOA en aluminium se comportent différemment de ceux en phosphore, en particulier en régime dynamique. Plus lents, la perte de bande passante survient à faibles fréquences. La tenue en température fut aussi jaugée, montrant des résultats différents selon que l'on considère le courant "brut" en milliampères ou le courant en fonction du courant de seuil.

Afin de comprendre un peu plus les phénomènes impliqués, nous avons résumé les particularités physiques du RSOA, notamment les principales recombinaisons. Par la suite, nous les avons mis en perspective avec des mesures d'émission spontanée, riches d'informations. L'émission stimulée joue un rôle clef mais ne suffit pas à elle seule à expliquer les performances non égalées du RSOA de référence. L'émission Auger est une hypothèse probable quant aux différences de performances, elle ne peut néanmoins pas être facilement observée directement. Enfin le confinement des électrons se doit d'être ni trop faible (comparaison des RSOA en aluminium bande O) ni trop fort (comparaison des RSOA en phosphore bande C). La hauteur des barrières et les pertes internes semblent aussi influencer sur la rapidité et les performances statiques du composant.

Une anomalie dans le RSOA aluminium bande C nous empêche de conclure quand à l'apport réel de l'aluminium. Néanmoins nous pensons qu'au-delà du matériau, une conception spécifique et attentive aux hauteurs de barrières et de puits est nécessaire. Cela ne peut se faire sans une nouvelle génération de RSOA, nouveau développement par nature coûteux en ressources humaines, matérielles et temporelles.

Dans le dernier chapitre, nous avons cherché à trouver des solutions à moyen terme permettant d'atteindre les performances auxquelles nos RSOA ne parviennent pas aujourd'hui.

Bibliographie chapitre 3

- [1] T. Durhuus, B. Mikkelsen and K. E. Stubkjaer, "Detailed dynamic model for semiconductor optical amplifiers and their crosstalk and intermodulation distortion," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no. 8, pp. 1056-1065, Aug 1992. doi: 10.1109/50.156845
- [2] P. Brosson, "Analytical model of a semiconductor optical amplifier," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 49-54, Jan 1994. doi: 10.1109/50.265734
- [3] M. J. Connelly, "Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 3, pp. 439-447, Mar 2001. doi: 10.1109/3.910455
- [4] M. J. Connelly, "Wide-Band Steady-State Numerical Model and Parameter Extraction of a Tensile-Strained Bulk Semiconductor Optical Amplifier," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 43, no. 1, pp. 47-56, Jan. 2007. doi: 10.1109/JQE.2006.885205
- [5] M. J. Connelly, "Reflective semiconductor optical amplifier modulator dynamic model," *Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 2014*, Palma de Mallorca, 2014, pp. 41-42. doi: 10.1109/NUSOD.2014.6935346
- [6] M. J. Connelly *et al.*, "Wideband Steady-State Model of a Strained InGaAsP MQW-SOA," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 11, pp. 2656-2662, June1, 1 2016. doi: 10.1109/JLT.2016.2550183
- [7] A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić, M. L. Mašanović and D. M. Gvozdić, "A Self-Consistent Numerical Method for Calculation of Steady-State Characteristics of Traveling-Wave and Reflective SOAs," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1-11, Sept.-Oct. 2013. doi: 10.1109/JSTQE.2013.2263118
- [8] A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić and D. M. Gvozdić, "An Efficient Semi-Analytical Method for Modeling of Traveling-Wave and Reflective SOAs," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 11, pp. 2106-2112, June1, 2014. doi: 10.1109/JLT.2014.2317478
- [9] A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić and D. M. Gvozdić, "Numerical Study of the Small-Signal Modulation Bandwidth of Reflective and Traveling-Wave SOAs," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 13, pp. 2758-2764, July1, 1 2015. doi: 10.1109/JLT.2015.2412252
- [10] Z. Vujčić, R. P. Dionísio, A. Shahpari, N. B. Pavlović and A. Teixeira, "Efficient Dynamic Modeling of the Reflective Semiconductor Optical Amplifier," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1-10, Sept.-Oct. 2013. doi: 10.1109/JSTQE.2013.2259616
- [11] C. Antonelli and A. Mecozzi, "Reduced Model for the Nonlinear Response of Reflective Semiconductor Optical Amplifiers," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 23, pp. 2243-2246, Dec.1, 2013. doi: 10.1109/LPT.2013.2282215
- [12] C. Antonelli, A. Mecozzi, W. Li and L. A. Coldren, "Efficient and Accurate Modeling of Multiwavelength Propagation in SOAs: A Generalized Coupled-Mode Approach," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 9, pp. 2188-2197, May1, 1 2016. doi: 10.1109/JLT.2016.2519240
- [13] M. Liu, M. Zhang, L. Liu, Y. Wei, Libo Cai and Peida Ye, "Numerical modeling and experimental testing of reflective semiconductor optical amplifier (RSOA) with modulation bandwidth optimization," *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, Shanghai, 2010, pp. 82-83. doi: 10.1109/ACP.2010.5682825
- [14] S.P. O Duill, L.P. Barry, Improved reduced models for single-pass and reflective semiconductor optical amplifiers, *Optics Communications*, Volume 334, 1 January 2015, Pages 170-173, ISSN 0030-4018, <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2014.08.040>.
- [15] D. Marcuse, "Computer model of an injection laser amplifier," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 19, no. 1, pp. 63-73, Jan 1983. doi: 10.1109/JQE.1983.1071725
- [16] M. J. Adams, J. V. Collins and I. D. Henning, "Analysis of semiconductor laser optical amplifiers," in *IEE Proceedings J - Optoelectronics*, vol. 132, no. 1, pp. 58-63, February 1985. doi: 10.1049/ip-j.1985.0012
- [17] I. Henning, M. Adams and J. Collins, "Performance predictions from a new optical amplifier model," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 21, no. 6, pp. 609-613, Jun 1985. doi: 10.1109/JQE.1985.1072709

- [18] W. Mathlouthi, P. Lemieux, M. Salsi, A. Vannucci, A. Bononi and L. A. Rusch, "Fast and Efficient Dynamic WDM Semiconductor Optical Amplifier Model," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 11, pp. 4353-4365, Nov. 2006. doi: 10.1109/JLT.2006.884217
- [19] R. Gutierrez-Castrejon and M. Duelk, "Uni-directional time-domain bulk SOA Simulator considering carrier depletion by amplified spontaneous emission," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 42, no. 6, pp. 581-588, Jun 2006. doi: 10.1109/JQE.2006.874063
- [20] P. Morel and A. Sharaiha, "Wideband Time-Domain Transfer Matrix Model Equivalent Circuit for Short Pulse Propagation in Semiconductor Optical Amplifiers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 45, no. 2, pp. 103-116, Feb. 2009. doi: 10.1109/JQE.2008.2001935
- [21] C. Antonelli, A. Mecozzi, Z. Hu and M. Santagiustina, "Analytic Study of the Modulation Response of Reflective Semiconductor Optical Amplifiers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 20, pp. 4367-4376, Oct.15, 15 2015. doi: 10.1109/JLT.2015.2453232
- [22] L. A. Coldren, S. W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits", John Wiley & Sons, 1995
- [23] N. Dutta, D. Wilt and R. Nelson, "Analysis of leakage currents in 1.3- μm InGaAsP real-index-guided lasers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 201-208, June 1984. doi: 10.1109/JLT.1984.1073604
- [24] Dutta, N. K., "Calculated temperature dependence of threshold current of GaAs-AlxGa1-xAs double heterostructure lasers", *Journal of Applied Physics*, 52, 70-73 (1981), DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.328459
- [25] R. Olshansky, C. Su, J. Manning and W. Powazinik, "Measurement of radiative and nonradiative recombination rates in InGaAsP and AlGaAs light sources," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 20, no. 8, pp. 838-854, Aug 1984. doi: 10.1109/JQE.1984.1072500
- [26] Dutta, N. K. and Nelson, "The case for Auger recombination in In1-xGaxAsyP1-y", R. J., *Journal of Applied Physics*, 53, 74-92 (1982), DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.329942
- [27] , K. Vahala and A. Yariv, "Semiclassical theory of noise in semiconductor lasers - Part I," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 19, no. 6, pp. 1096-1101, June 1983. doi: 10.1109/JQE.1983.1071986
- [28] B. Tromborg, H. E. Lassen and H. Olesen, "Traveling wave analysis of semiconductor lasers: modulation responses, mode stability and quantum mechanical treatment of noise spectra," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 30, no. 4, pp. 939-956, Apr 1994. doi: 10.1109/3.291365
- [29] A. D'Ottavi *et al.*, "Efficiency and noise performance of wavelength converters based on FWM in semiconductor optical amplifiers," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 357-359, April 1995. doi: 10.1109/68.376801
- [30] G. Talli, M.J. Adams, Amplified spontaneous emission in semiconductor optical amplifiers: modelling and experiments, *Optics Communications*, Volume 218, Issues 1-3, 15 March 2003, Pages 161-166, ISSN 0030-4018, http://dx.doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01196-9.
- [31] M. Shtaif, B. Tromborg and G. Eisenstein, "Noise spectra of semiconductor optical amplifiers: relation between semiclassical and quantum descriptions," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 34, no. 5, pp. 869-878, May 1998. doi: 10.1109/3.668775
- [32] Alessandro Marques de Melo, Klaus Petermann, On the amplified spontaneous emission noise modeling of semiconductor optical amplifiers, *Optics Communications*, Volume 281, Issue 18, 15 September 2008, Pages 4598-4605, ISSN 0030-4018, http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2008.06.039.
- [33] S. A. Gebrewold *et al.*, "Reflective-SOA Fiber Cavity Laser as Directly Modulated WDM-PON Colorless Transmitter," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 503-511, Sept.-Oct. 2014. doi: 10.1109/JSTQE.2014.2307314
- [34] Henry, Charles H. and Kazarinov, Rudolf F, "Quantum noise in photonics," *Rev. Mod. Phys.*, 68, 3, 801--853, 1996, 10.1103/RevModPhys.68.801
- [35] G. Giuliani and D. D'Alessandro, "Noise analysis of conventional and gain-clamped semiconductor optical amplifiers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 9, pp. 1256-1263, Sept. 2000. doi: 10.1109/50.871703

- [36] Suematsu, S. Akiba and Tehanghee Hong, "Measurement of spontaneous-emission factor of AlGaAs double-heterostructure semiconductor lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 13, no. 8, pp. 596-600, Aug 1977. doi: 10.1109/JQE.1977.1069417
- [37] K. Petermann, "Calculated spontaneous emission factor for double-heterostructure injection lasers with gain-induced waveguiding," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 15, no. 7, pp. 566-570, Jul 1979. doi: 10.1109/JQE.1979.1070064
- [38] M. J. Adams, S. Said, D. Ramoo and J. Masum, "Novel approach to the spontaneous emission factor," *Semiconductor Laser Conference, 1998. ISLC 1998 NARA. 1998 IEEE 16th International*, Nara, Japan, 1998, pp. 69-70. doi: 10.1109/ISLC.1998.734141
- [39] Daniel T. Cassidy, "Spontaneous-emission factor of semiconductor diode lasers," *J. Opt. Soc. Am. B* 8, 747-752 (1991)
- [40] van Exter, M. P. and Nienhuis, G. and Woerdman, J. P., "Two simple expressions for the spontaneous emission factor β ," *Phys. Rev. A*, 54, 4, 3553--3558, 1996, 10.1103/PhysRevA.54.3553
- [41] J. Mork, A. Mecozzi and G. Eisenstein, "The modulation response of a semiconductor laser amplifier," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 3, pp. 851-860, May/June 1999. doi: 10.1109/2944.788459
- [42] G. P. Agrawal and N. A. Olsson, "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 25, no. 11, pp. 2297-2306, Nov 1989. doi: 10.1109/3.42059
- [43] G. P. Agrawal, N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, 2nd Edition, Kluwer academic publisher 1993
- [44] L. Occhi, L. Schares and G. Guekos, "Phase modeling based on the α -factor in bulk semiconductor optical amplifiers," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 788-797, May-June 2003. doi: 10.1109/JSTQE.2003.818346
- [45] M. Asada, Y. Miyamoto and Y. Suematsu, "Gain and the threshold of three-dimensional quantum-box lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 22, no. 9, pp. 1915-1921, Sep 1986. doi: 10.1109/JQE.1986.1073149
- [46] Yariv A., "Quantum Electronics", Third edition John Wiley & Sons, 1989
- [47] J. Minch, S. H. Park, T. Keating and S. L. Chuang, "Theory and experiment of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ and $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$ long-wavelength strained quantum-well lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 35, no. 5, pp. 771-782, May 1999. doi: 10.1109/3.760325
- [48] E. Yablonovitch and E. O. Kane, "Band structure engineering of semiconductor lasers for optical communications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 6, no. 8, pp. 1292-1299, Aug 1988. doi: 10.1109/50.4133
- [49] Leuthold, J. and Mayer, M. and Eckner, J. and Guekos, G. and Melchior, H. and Zellweger, "Material gain of bulk 1.55 μm InGaAsP/InP semiconductor optical amplifiers approximated by a polynomial model", Ch., *Journal of Applied Physics*, 87, 618-620 (2000), DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.371909>
- [50] Morel, Pascal and Sharaiha, Ammar and Brenot, Romain and Thiedrez, Bruno, "Wideband Gain and Noise Figure Modelling in SOA", *Optical and Quantum Electronics*, 2006, 38, 1, 231--236, <http://dx.doi.org/10.1007/s11082-006-0013-x>
- [51] L. Thylen, "Amplified spontaneous emission and gain characteristics of Fabry-Perot and traveling wave type semiconductor laser amplifiers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 1532-1537, Aug 1988. doi: 10.1109/3.7080
- [52] W. W. Chow, F. Jahnke and C. Gies, "Searching for Lasing Threshold in a Thresholdless Laser," *2014 International Semiconductor Laser Conference*, Palma de Mallorca, 2014, pp. 219-220. doi: 10.1109/ISLC.2014.242
- [53] J. M. Gerard, J. Claudon, J. Bleuse, M. Munsch and N. Gregersen, "Very Efficient Single-Photon Sources Based on Quantum Dots in Photonic Wires," *2014 International Semiconductor Laser Conference*, Palma de Mallorca, 2014, pp. 1-2. doi: 10.1109/ISLC.2014.133
- [54] W. W. Chow, "Are Nonclassical Light Sources Lasers?," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1503402-1503402, July-Aug. 2013. doi: 10.1109/JSTQE.2013.2257993
- [55] G. Bjork and Y. Yamamoto, "Analysis of semiconductor microcavity lasers using rate equations," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 2386-2396, Nov 1991. doi: 10.1109/3.100877

- [56] C. Z. Ning, "What is Laser Threshold?," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1503604-1503604, July-Aug. 2013. doi: 10.1109/JSTQE.2013.2259222
- [57] L. A. Coldren, "What is a Diode Laser Oscillator?," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1503503-1503503, July-Aug. 2013. doi: 10.1109/JSTQE.2013.2258330
- [58] GaAs microcavity quantum-well laser with enhanced coupling of spontaneous emission to the lasing mode, Horowicz, R. J. and Heitmann, H. and Kadota, Y. and Yamamoto, Y., *Applied Physics Letters*, 61, 393-395 (1992), DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.107893
- [59] Yokoyama, H. and Nishi, K. and Anan, T. and Nambu, Y. and Brorson, S. D. and Ippen, E. P. and Suzuki, M, "Controlling spontaneous emission and threshold-less laser oscillation with optical microcavities", *Optical and Quantum Electronics*, 1992,24, 2, S245--S272
- [60] W. H. Guo, D. C. Byrne, Q. Lu, B. Corbett and J. F. Donegan, "Fabry-Pérot Laser Characterization Based on the Amplified Spontaneous Emission Spectrum and the Fourier Series Expansion Method," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, no. 5, pp. 1356-1363, Sept.-Oct. 2011. doi: 10.1109/JSTQE.2010.2096502
- [61] Spontaneous emission factor and its scaling in vertical cavity surface emitting lasers, Shtengel, G. and Temkin, H. and Uchida, T. and Kim, M. and Brusenbach, P. and Parsons, C., *Applied Physics Letters*, 64, 1062-1064 (1994), DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.110932
- [62] M. Newstein, "The spontaneous emission factor for lasers with gain induced waveguiding," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 20, no. 11, pp. 1270-1276, November 1984. doi: 10.1109/JQE.1984.1072305
- [63] C. Henry, "Theory of spontaneous emission noise in open resonators and its application to lasers and optical amplifiers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 288-297, Mar 1986. doi: 10.1109/JLT.1986.1074715
- [64] H. Haus and S. Kawakami, "On the "Excess spontaneous emission factor" in gain-guided laser amplifiers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 21, no. 1, pp. 63-69, Jan 1985. doi: 10.1109/JQE.1985.1072528
- [65] S. Hausser, W. Idler, E. Zielinski, M. H. Pilkuhn, G. Weimann and W. Schlapp, "Spontaneous emission factor and waveguiding in GaAs/AlGaAs MQW lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 25, no. 6, pp. 1469-1476, Jun 1989 doi: 10.1109/3.29282
- [66] Spontaneous emission factor β for injection lasers, Sommers, H. S., *Journal of Applied Physics*, 52, 7439-7439 (1981), DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.328736
- [67] J. S. T. Smalley, Q. Gu and Y. Fainman, "Temperature Dependence of the Spontaneous Emission Factor in Subwavelength Semiconductor Lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 50, no. 3, pp. 175-185, March 2014. doi: 10.1109/JQE.2014.2303075
- [68] D. C. Byrne, W. H. Guo, Q. Y. Lu, B. Corbett and J. F. Donegan, "Technique to calculate geometric spontaneous emission factor from amplified spontaneous emission spectrum of FP semiconductor laser," in *Electronics Letters*, vol. 46, no. 14, pp. 1017-1019, July 2010. doi: 10.1049/el.2010.0421
- [69] J. Goodwin and B. Garside, "Measurement of spontaneous emission factor for injection lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, no. 8, pp. 1264-1271, Aug 1982. doi: 10.1109/JQE.1982.1071694
- [70] Kako, S. and Someya, T. and Arakawa, Y., "Observation of enhanced spontaneous emission coupling factor in nitride-based vertical-cavity surface-emitting laser" *Applied Physics Letters*, 80, 722-724 (2002), DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.1430855
- [71] W. J. Liu *et al.*, "Low Threshold Lasing of GaN-Based VCSELs With Sub-Nanometer Roughness Polishing," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 20, pp. 2014-2017, Oct.15, 2013. doi: 10.1109/LPT.2013.2280965
- [7] D. M. Baney, P. Gallion, and R. S. Tucker, "Theory and Measurement Techniques for the Noise Figure of Optical Amplifiers," *Opt. Fiber Technol.* 6, 122-154 (2000).
- [73] F. Ginovart, M. Amaya and A. Sharaiha, "Semiconductor Optical Amplifier Studies Under Optical Injection at the Transparency Wavelength in Copropagative Configuration," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 840-849, March 2007. doi: 10.1109/JLT.2006.889677
- [74] R. Bonk, "linear and nonlinear semiconductor optical amplifiers for next generation optical networks", PhD dissertation, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2013

- [75] I. Valiente, L. Lablonde, J. C. Simon, and L. Billès, "Effects of Amplified Spontaneous Emission on Gain Recovery Dynamics of Semiconductor Optical Amplifiers," in *Optical Amplifiers and Their Applications*, R. Jopson, K. Stubkjaer, and M. Suyama, eds., Vol. 5 of OSA Trends in Optics and Photonics Series (Optical Society of America, 1996), paper SD2.
- [76] J. N. Fehr *et al.*, "Hot phonons and Auger related carrier heating in semiconductor optical amplifiers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 38, no. 6, pp. 674-681, Jun 2002. doi: 10.1109/JQE.2002.1005418
- [77] Simple model for calculating the ratio of the carrier capture and escape times in quantum-well lasers Romero, B. and Arias, J. and Esquivias, I. and Cada, M., *Applied Physics Letters*, 76, 1504-1506 (2000), DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.126077>
- [78] Totović, A; Crnjanski, JV; Krstić, MM; Gvozdić, DM; „Modelling of carrier dynamics in multi-quantum well semiconductor optical amplifiers, *Physica Scripta*, 2012, T149, 014032, 2012, IOP Publishing
- [79] Piprek, Joachim and Abraham, Patrick and Bowers, John E., Carrier non uniformity effects on the internal efficiency of multiquantum-well lasers *Applied Physics Letters*, 74, 489-491 (1999), DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.123165>
- [80] S. Mogg and J. Piprek, "Optimization of the barrier height in 1.3 μm InGaAsP multiple-quantum-well active regions for high temperature operation," in *Proc. SPIE Physics and Simulation of Optoelectronic Devices*, vol. 4283, 2001
- [81] A. F. Phillips, S. J. Sweeney, A. R. Adams and P. J. A. Thijs, "The temperature dependence of 1.3- and 1.5- μm compressively strained InGaAs(P) MQW semiconductor lasers," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 3, pp. 401-412, May/Jun 1999. doi: 10.1109/2944.788398
- [82] M. Silver, E. P. O'Reilly and A. R. Adams, "Determination of the wavelength dependence of Auger recombination in long-wavelength quantum-well semiconductor lasers using hydrostatic pressure," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 1557-1566, Sep 1997. doi: 10.1109/3.622637
- [83] Experimental Study of Quantum Dot and Dash Lasers Susannah C. Heck, PhD Thesis, 2009
- [84] W. Bardyszewski and D. Yevick, "Band-to-band Auger processes in 0.95 eV bandgap ($\lambda=1.3 \mu\text{m}$) $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ lattice matched to InP," in *Electronics Letters*, vol. 21, no. 2, pp. 58-59, January 17 1985. doi: 10.1049/el:19850040

CHAPITRE 4

SOURCES BAS-COÛT EN CAVITE AUTO-ALIMENTEE : ETUDE ET RESULTATS

Le chapitre 3 a mis en évidence les limites du RSOA, notamment de sa vitesse de réponse électro-optique, paramètre essentiel des cavités auto-alimentées. A défaut de produire un composant supérieur au RSOA de référence, les pistes explorées par les nouvelles générations telles que les RSOA bande O peuvent apporter des éléments de réponse.

Un nouveau développement implique un coût dont nous ne sommes pas certains des résultats. Nous avons donc cherché à évaluer les autres solutions disponibles, en exploitant les composants dont nous maîtrisons la conception et la fabrication. Précisons que ces études se font en amont et en complément de celles de nos partenaires. Elles visent à effectuer les premières preuves de concept et comprendre les phénomènes physiques sur lesquels le composant pourrait avoir un impact. Le déploiement, l'étude globale de la cavité et de ses paramètres furent menés avec brio par nos partenaires.

Dans ce dernier chapitre, nous décrirons tout d'abord les performances des RSOA en cavité auto-alimentée en nous appuyant sur les résultats de nos partenaires ainsi que sur des observations expérimentales précisant les principaux paramètres physiques. Puis nous optimiserons le choix de lasers Fabry-Pérot pour cavité auto-alimentée avant de proposer un nouveau schéma d'implémentation basé sur l'EAM-RSOA, compromis dont nous évoquerons le potentiel. Enfin nous évoquerons un domaine d'application du RSOA connexe aux cavités auto-alimentées, celui des cavités externes pour lesquelles les contraintes sont moins fortes.

4.1. RSOA en cavité auto-alimentée

Le RSOA en cavité auto-alimentée fut au cœur des projets ERMES et LAMPION débuté, pour le premier, en 2011. Relatons ici les principales caractéristiques d'une telle cavité, les performances obtenues avec notre RSOA de référence et celles avec les RSOA en bande O. Enfin nous nous baserons sur nos observations expérimentales pour discuter des évolutions possibles.

4.1.1. Cavité auto-alimentée, un laser comme un autre ?

Quoique cette question ne soit pas fondamentale dans l'optimisation de la cavité, revenons sur sa nature, prêtant à débat dans la communauté.

La comparaison des courbes de puissance en fonction du courant d'une cavité fermée avec une cavité ouverte indiquent une rupture de pente, significative d'un seuil. Ce seuil se retrouve en faisant varier les pertes de la cavité (figure 4.1 (a)). A 60 mA, les courbes des cavités ouvertes et fermées se rejoignent à 10 dB d'atténuation ; à 120 mA elles se rejoignent à 13 dB. A 20 mA, le gain du RSOA ne parvient pas à compenser les pertes. Une seconde caractérisation provient du spectre de sortie. La cavité étant grande, l'espacement entre les modes est faible. Il est difficile de les observer directement avec un analyseur de spectres optiques. En plus d'une fine résolution, il faut assurer la stabilité du système, sensible à l'environnement. Pour ces raisons, il est plus aisé d'observer les modes à

l'analyseur de spectre électrique. Si l'on reprend les résultats de notre partenaire Orange Lab [1,2], on retrouve la proportionnalité de l'intervalle spectral libre (ISL) ou *free spectral range* (FSR) avec l'inverse de la longueur de cavité. Le coefficient correspond à l'indice de groupe effectif vu par le signal. Celui-ci est légèrement au-dessus de l'indice de la fibre (~1,5), ce que l'on peut attribuer à l'incertitude de mesure.

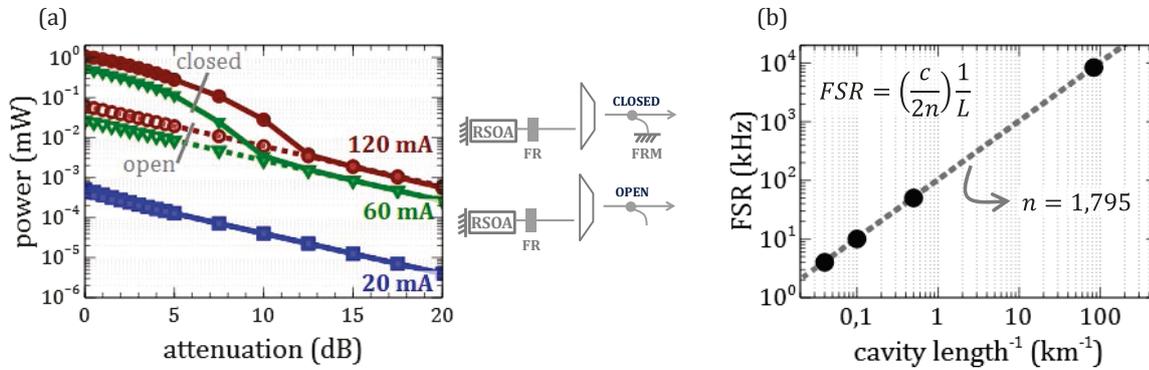


Figure 4.1- (a) Courbes de la puissance en fonction des pertes d'atténuation pour différents courants et (b) intervalle spectral libre en fonction de la longueur de cavité.

Malgré ces éléments, la largeur du spectre de sortie est grande et l'on admettra que la cohérence temporelle est faible. En effet, nous n'avons pas eu la possibilité de mesurer le degré de cohérence de la source.

Un second aspect qui différencie cette cavité d'un laser traditionnel concerne l'évolution du gain qui continue à augmenter après le seuil (figure 4.2 (a)). On explique ce phénomène par l'augmentation du nombre de porteurs au niveau du miroir et en milieu de composant (figure 4.2 (b)) [3].

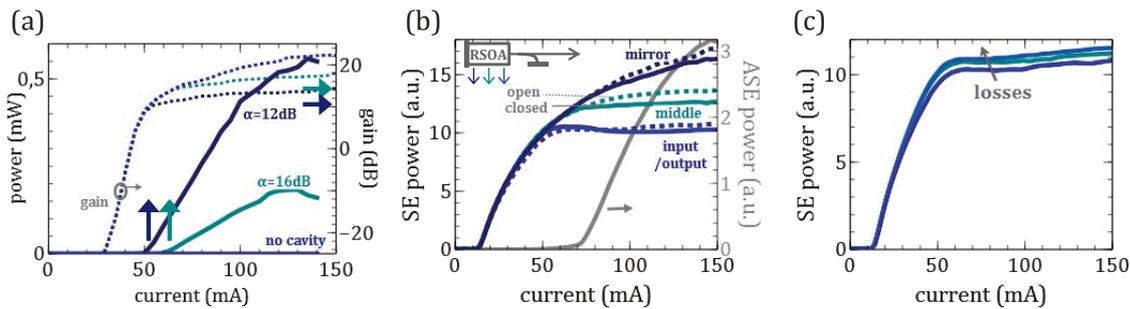


Figure 4.2- Gain du RSOA en cavité et puissance de sortie (a), émission spontanée dans le RSOA en cavité (b) et influence des pertes de la cavité sur l'émission spontanée du RSOA en entrée/sortie.

4.1.2. Performances obtenues

Transmises à nos partenaires, les RSOA bande O ont permis d'obtenir des résultats à l'état de l'art. Les principaux sont résumés dans la figure 4.3 avec, en entourés, les résultats lors de cette thèse. Des transmissions à 2,5 Gbit/s allant jusqu'à 90 km furent possibles [4] avec un coupleur 3 dB et une cavité de quelques mètres. De l'égalisation électronique multi-étage autorisa les 10 Gbit/s avec des cavités mesurant jusqu'à 1 km [5,6].

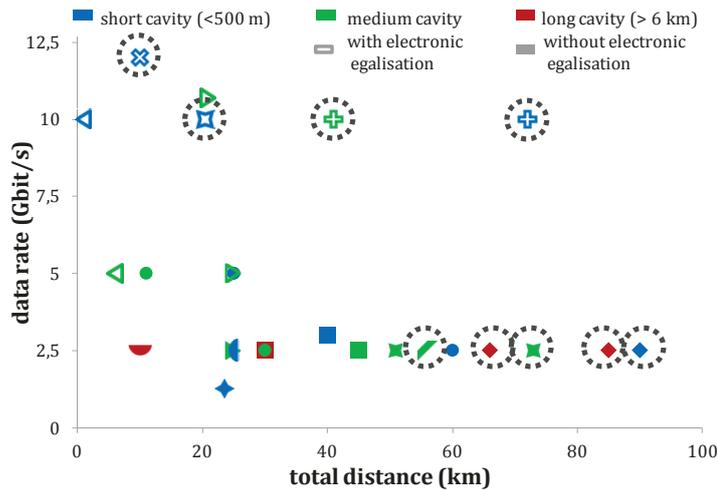


Figure 4.3- Résultats en cavité auto-alimentée obtenus pendant cette thèse (points entourés) avec les RSOA bande O (références en tableau 1.6).

4.1.3. Influence de l'élément réflectif

Au cours des paragraphes précédents, nous avons pu constater que résultats et études abondaient sur le sujet. Toutefois, il existe deux paramètres, liés l'un à l'autre, dont on souhaiterait préciser l'influence sur la vitesse de modulation. Il s'agit de la réflectivité des éléments réflectifs (miroir déporté et miroir du RSOA) et, *in fine*, des pertes dans la cavité (auxquelles les pertes miroir contribuent).

Ces thématiques ont déjà été abordées dans les cas de cavités externes mais seulement pour l'optimisation des performances statiques [7]. Les concepteurs de lasers à réseaux distribués détiennent en revanche un certain recul à ce sujet [8,9], nous nous en servons dans nos analyses.

Pour ce faire, nous avons remplacé le filtre optique et le miroir par une fibre à réseaux de Bragg (*Fiber Bragg Gratings*, FBG). Nous avons commencé nos observations avec une fibre de réflectivité 95 % et de largeur à mi-hauteur de 0,506 nm (figure 4.4). Par la suite, nous pourrions les poursuivre avec des fibres d'autres réflectivités et des largeurs plus appropriées pour notre application. Nous avons évalué la rapidité de la cavité via de la modulation petit signal, des mesures antérieures montrent que ces observations se retranscrivent dans la modulation grand signal [10].

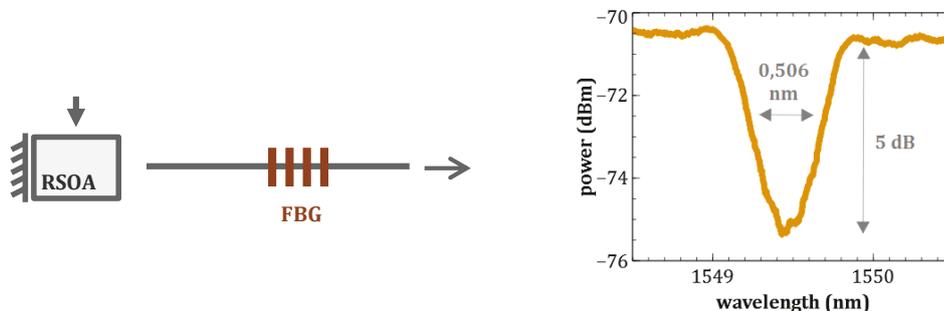


Figure 4.4- Schéma de principe du RSOA associé à la FBG.

Le RSOA est celui de référence décrit dans le chapitre 3 : en bande C et à multi-puits quantiques de 1,5 mm de long. La courbe P(I) de la cavité RSOA + FBG présente un seuil à 21 mA et plusieurs discontinuités caractéristiques de sauts de modes. Les spectres associés mesurés avec un analyseur de fine résolution (1,12 pm) laissent suggérer plusieurs cavités présentes. En raison des incertitudes sur la

position du réseau de Bragg dans la fibre, il ne nous est pas possible de déterminer l'ISL correspondant. L'ISL du pic le plus fin varie entre 85,3 et 98,5 pm.

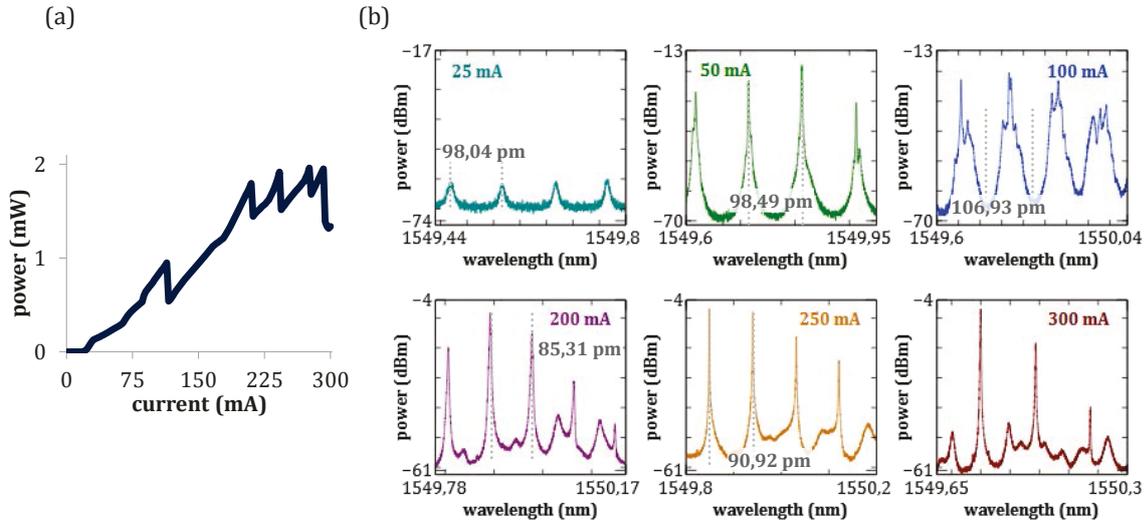


Figure 4.5- Caractéristiques statiques du RSOA de référence en cavité fermée par une FBG.

Sur la bande passante petit-signal (figure 4.6), on note, en plus de la résonance électron-photon standard, une résonance photon-photon après le seuil. Cette résonance est due à un second mode proche spectralement du mode principal. Pour voir cette résonance, il faut que le sous-mode coïncide avec la résonance de la cavité et qu'il soit suffisamment fort. Dans ses simulations de DBR à deux sections, Morthier a montré que la bande passante augmentait avec les pertes [11]. Les pertes décalent la résonance électron-photon vers des fréquences plus élevées jusqu'à rejoindre la seconde résonance. Reithmaier, lui, joue sur la force du réseau qui modifie l'aspect du second pic [12]. Sur la figure 4.6, on remarque une troisième résonance que l'on suppose provoquée par une cavité parasite dans le montage initial.

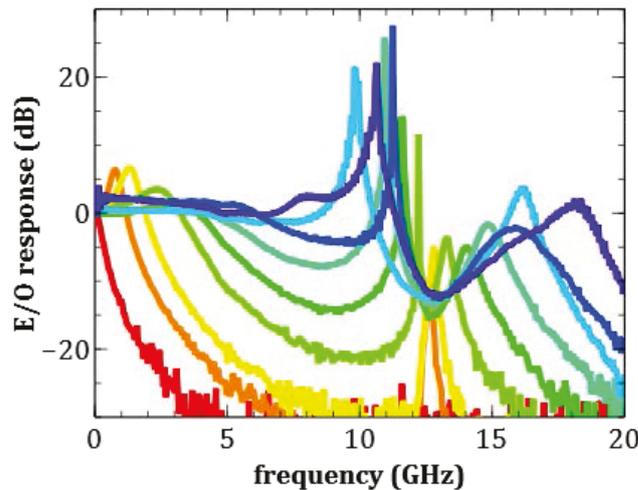


Figure 4.6- Bande passante petit-signal du RSOA de référence (phosphore) en cavité fermée par une FBG.

La cavité fermée par une FBG devient plus rapide que le RSOA et le Fabry-Pérot au-delà de 100 mA grâce à la résonance photon-photon.

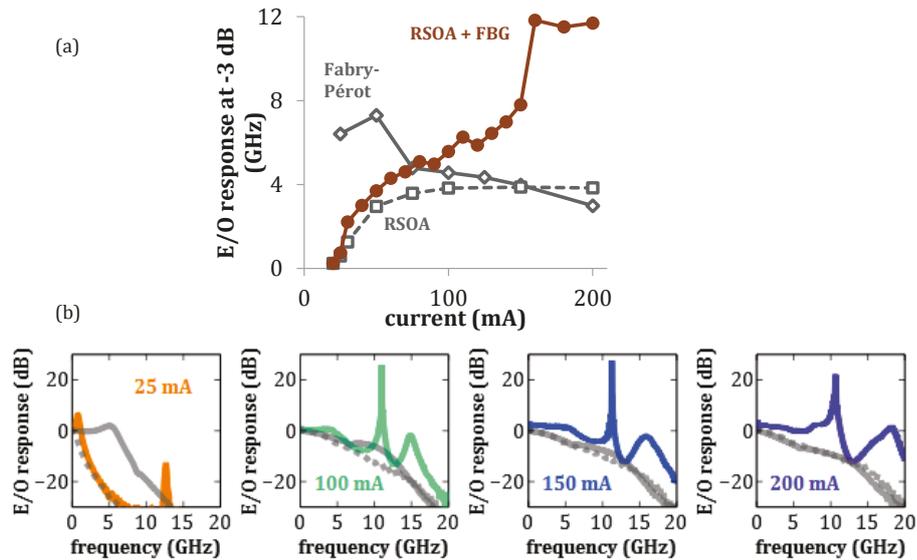


Figure 4.7- Comparaison entre bande passante du RSOA en cavité fermée par une FBG, du RSOA et du Fabry-Pérot associé.

Nous retrouvons le même comportement sur des composants pourtant peu performants, le RSOA aluminium bande C. Alors que la bande passante du RSOA ne dépassait pas 1 GHz, celle de la cavité atteint les 4 GHz. A nouveau, le seuil de la cavité est proche du seuil du RSOA (ici ~ 60 mA).

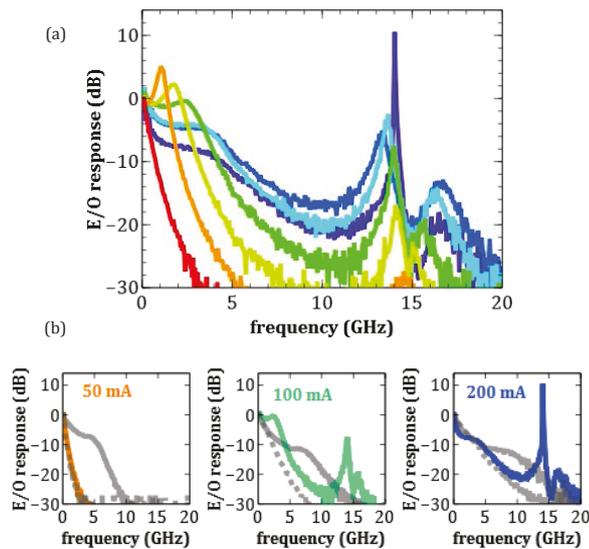


Figure 4.8- Bande passante petit-signal du RSOA aluminium bande C dans une cavité fermée par une FBG.

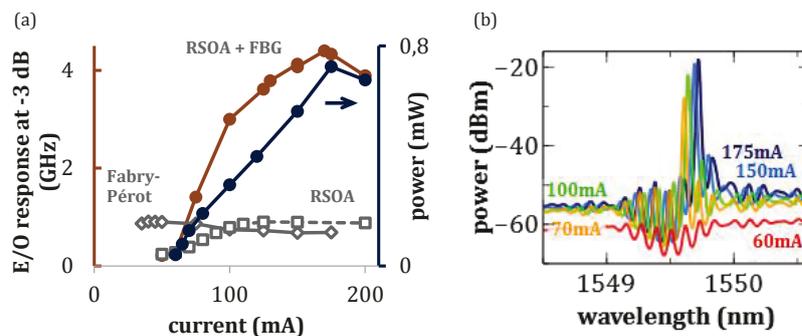


Figure 4.9- (a) Comparaison de la bande passante petit signal du RSOA bande C aluminium en cavité fermée par une FBG avec le RSOA et le Fabry-Pérot associé, (b) spectre en transmission.

La bande passante du RSOA diminue lorsque les pertes augmentent jusqu'à 6 dB. Entre 6 et 9 dB de pertes, la bande passante augmente à nouveau puis diminue à nouveau (figure 4.10 (a)). La puissance diminue logiquement avec les pertes. A 6,2 dB de pertes, le spectre optique présente toujours un pic (figure 4.10 (c)).

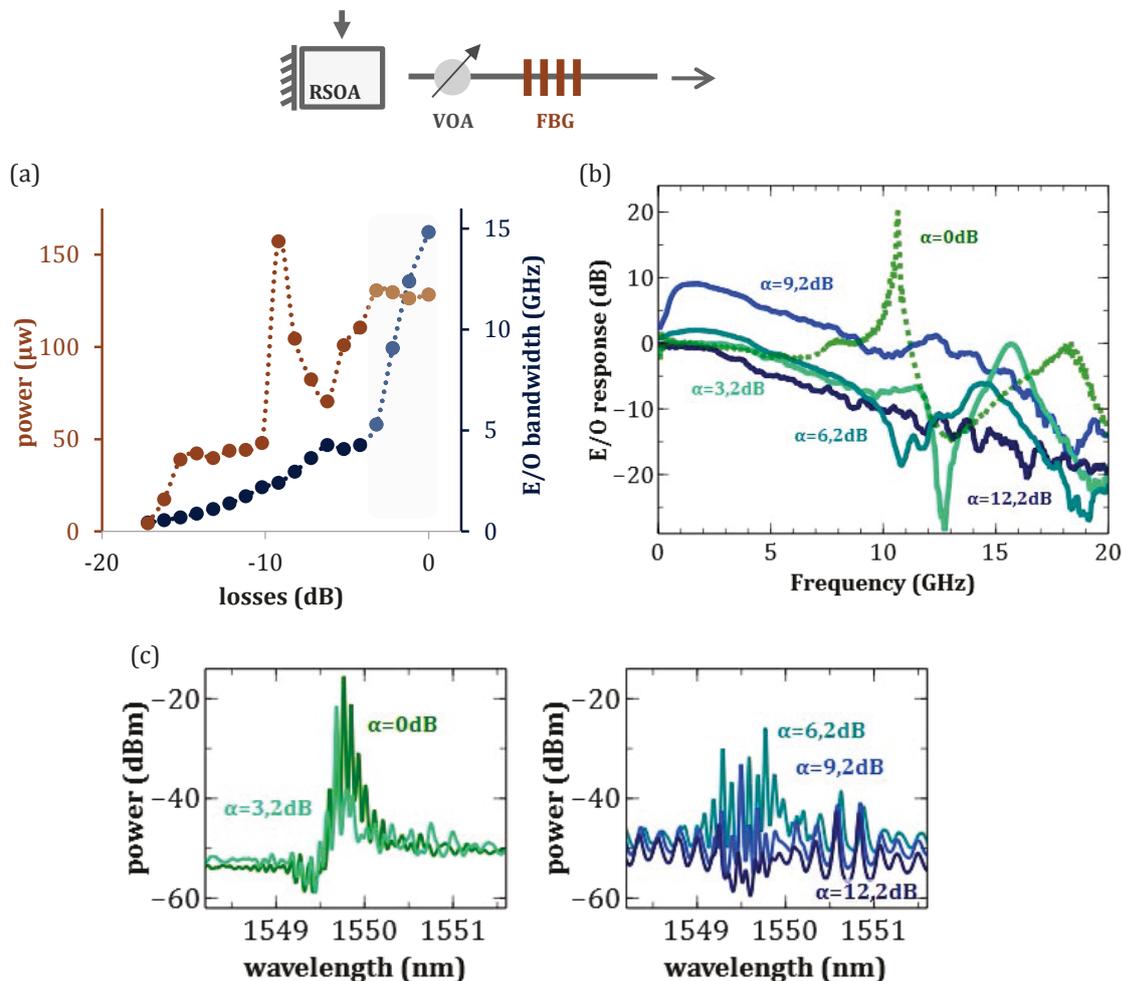


Figure 4.10- Effet des pertes dans la cavité sur la bande passante petit-signal.

Cette étude préliminaire montre l'impact bénéfique de la FBG sur la rapidité de la cavité. Elle laisse aussi supposer une influence des pertes de la cavité sans pour autant dégager des règles de conception. Elles devront être poursuivies grâce à des fibres de réflectivité plus faible et en formant des cavités de longueurs variées.

4.1.4. Limites et discussion

A la suite des projets ERMES et LAMPION, plusieurs réflexions s'imposent. Les RSOA en bande C présentent la plus grande bande passante mais la propagation du signal en sortie de cavité est pénalisée par la dispersion chromatique, plus élevée à cette longueur d'onde. Le passage en bande O, bande pour laquelle la dispersion chromatique est quasi-nulle, relâcha cette contrainte mais avec des composants moins rapides. Pour atteindre les 10 Gbit/s avec de tels composants, le recours à de l'égalisation électronique fut indispensable. De même, bien que la bande O soit développée depuis plusieurs années, tous les composants ne sont pas disponibles à cette longueur d'onde (le multiplexeur en longueur d'onde par exemple). Dans le chapitre 3, nous avons proposé quelques hypothèses pour

augmenter la bande passante des RSOA bande O, en particulier de jouer sur la hauteur des barrières. Pourtant, même si nous parvenions à atteindre les 10 Gbit/s, il ne serait pas certain qu'une solution en bande O bas coût puisse être développée. La disponibilité de multiplexeurs restant un verrou.

Il faudrait donc envisager un retour vers la bande C en parvenant à s'affranchir des limites causées par le *chirp*. Une seconde limite, commune aux deux bandes, est le bruit de battement entre les modes qui contribue au bruit relatif d'intensité (RIN, *Relative Noise Intensity*) [13] et dont la valeur augmente avec la longueur de la cavité [14].

Une solution que nous avons commencé à évaluer sans pour autant finir l'étude consiste à placer au niveau du miroir du RSOA un filtre de type anneau ou FBG, d'ISL analogue à celui du multiplexeur et de largeur optique étroite. Cette approche fut développée pour des applications de laser directement modulé CML (*Chirp Managed Laser*) [15]. Dans notre cas, en plus de cet avantage, cela rendrait le spectre plus étroit et donc moins sensible au *chirp*. De plus, s'il est extrêmement fin, le filtre participerait à l'effacement des données, en filtrant le spectre qui contient les informations contre-propagatrices. Déjà développé au sein du laboratoire, une intégration dite *butt-coupled* pourrait être envisagée, l'étape délicate étant l'alignement des deux composants entre eux. Achromatique, le coût supplémentaire serait réduit.

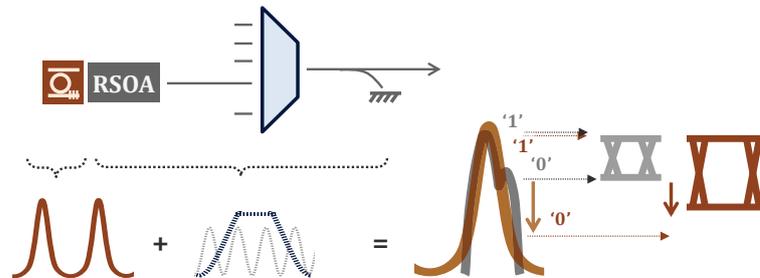


Figure 4.11- Schéma de principe d'un RSOA avec filtre en anneau intégré pour réduire le *chirp*.

D'autres alternatives sont envisageables en s'écartant quelque peu de la configuration initiale. En conservant la volonté de réduire le *chirp* par la réduction de la largeur du spectre, une solution pourrait être d'approfondir une configuration autrefois considérée : celle du Fabry-Pérot en cavité auto-alimentée. Une seconde option s'inscrit dans deux logiques complémentaires, celle du RSOA bi-électrode au *chirp* réduit [16] et celle de REAM-SOA à la large bande passante.

4.2. Optimisation du Fabry-Pérot en cavité auto-alimentée

4.2.1. Etat de l'art

Nous l'avons aperçu au premier chapitre, le Fabry-Pérot est un composant générique aux multiples applications. Dans celles des transmissions par modulation directe, la recherche s'est essentiellement portée sur le verrouillage en longueur d'onde [17-19]. Dans d'autres applications un peu plus éloignées de ce thème, les Fabry-Pérot sont auto-alimentés par cavité externe et fonctionnent en continu. Dans la plupart des applications, le Fabry-Pérot en cavité auto-alimentée est employé en continu [20, 21].

Il existe peu d'exemples de Fabry-Pérot directement modulés intégrés en cavité auto-alimentée. Le tableau 4.1 en compare quelques-uns en fonction du débit et de la distance accomplie. Précisons qu'en plus d'employer un SOA saturé au niveau du miroir (FBG), Su et al. [24] placent le multiplexeur après

l'élément réfléchissant, il ne pourra pas donc être partagé par tous les utilisateurs. De plus tout le spectre est réfléchi et non plus une partie filtrée par le canal préalablement désigné.

REFERENCE	DEBIT	DISTANCE	SMSR	BER	COUPLEUR	R _{1/0}
Zhu et al. [21]	1,25 Gbit/s	25 km	71 dB	error free	90/10	45 %
Presi et al. [22]	1,25 Gbit/s	25 km	-	error free	70/30	-
Komljenovic et al. [23]	1,25 Gbit/s	60 km	30 dB	10 ⁻⁶	90/10	0,05 %
Su et al. [24] * avec SOA	2,5 Gbit/s	25 km	45 dB	error free	varié	0,5 %

Table 4.1- Comparatif des solutions Fabry-Pérot en cavité auto-alimentée.

Des équipes taïwanaises [25] obtinrent de très bonnes performances en 2009 en plaçant deux Fabry-Pérot en face à face. En profitant de l'effet Vernier, ils formèrent quatre canaux modulables à 2,5 Gbit/s sur 85 km. L'ajout d'un second Fabry-Pérot est un avantage puisqu'il réduit la largeur du spectre et donne un gain supplémentaire au signal. D'autres bonnes performances (10 Gbit/s sur 25 km) furent obtenues par Chiuchiarelli et al. [26] avec un modulateur externe.

Ce succinct état de l'art montre la difficulté à proposer une solution Fabry-Pérot auto-alimentée dépassant les 1,25 Gbit/s sur 25 km.

La configuration que nous avons testée est rappelée en figure 4.12.

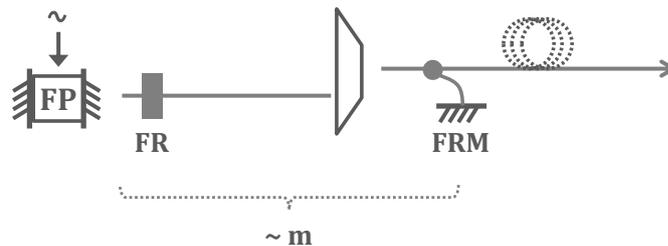


Figure 4.12- Schéma du Fabry-Pérot en cavité auto-alimentée.

4.2.2. Choix du Fabry-Pérot adapté

Un premier paramètre à déterminer est la longueur de la cavité qui doit être compatible avec l'ISL du multiplexeur. Généralement nous avons pris une longueur d'environ 200 μm pour un ISL de 0,8 nm, soit 100 GHz.

Dans ce type de configuration, un second paramètre essentiel au bon fonctionnement de la cavité est l'équilibre entre le signal réfléchi par le miroir déporté, que l'on notera $P_{\text{back, cav}}$, et le signal réfléchi par le miroir du Fabry-Pérot, noté $P_{\text{back, FP}}$. La figure 4.13 (a) présente le rapport entre les deux grandeurs précédentes et la puissance $P_{\text{FP, in}}$, définie comme la puissance du Fabry-Pérot juste avant son passage dans le miroir. Pour une puissance sortante $P_{\text{FP, in}}$ donnée, on compare ainsi l'intensité des puissances contre-propagatrices pour différentes valeurs de réflectivités du miroir Fabry-Pérot et différentes valeurs de pertes dans la cavité auto-alimentée. La figure 4.13 (b) définit la réflectivité du Fabry-Pérot pour laquelle les deux signaux retour sont égaux en faisant varier les pertes dans la cavité.

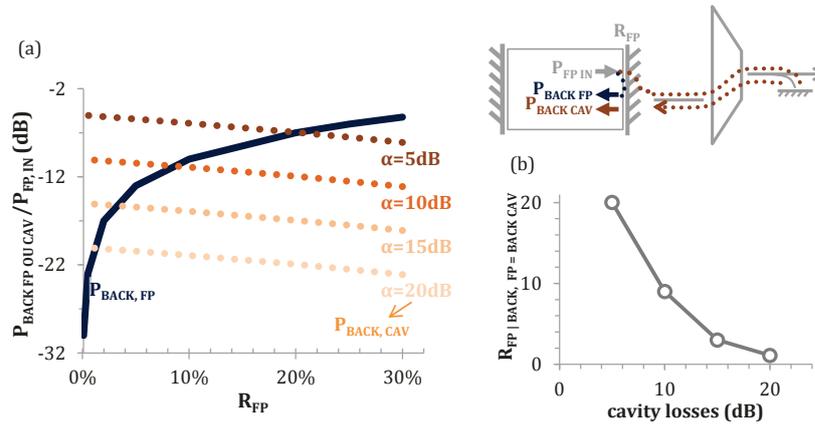


Figure 4.13- Comparaison des puissances retour en fonction de la réflectivité du miroir (a) et réflectivité pour laquelle les puissances retour sont égales en fonction des pertes dans la cavité.

La réflectivité doit donc être choisie avec attention pour que le signal retour de la cavité soit suffisamment significatif. S'il est trop important par rapport au signal interne, alors on retrouve le cas du RSOA et le seuil laser en cavité sera inférieur au seuil du laser Fabry-Pérot. Cette problématique a d'ailleurs été étudiée pour les applications à verrouillage en longueur d'onde [27-30]. Pour jouer sur cette valeur, nous disposons de tout un ensemble de possibilités en fonction du clivage dans le ruban actif ou dans le ruban passif ainsi que de l'angle du ruban par rapport à l'horizontal. Par exemple, pour un clivage dans l'actif à 7° , la réflectivité est de 0,15 %. Pour un clivage à 0° dans l'actif, elle est de 30 %. En jouant sur les deux facettes, on obtient une fourchette R_1R_2 comprise entre $2,3 \cdot 10^{-6}$ et 0,270. Nous avons comparé statiquement et dynamiquement quelques une de ces possibilités (figure 4.14). Il ne semble pas y avoir de logique particulière entre performances et réflectivité. Rappelons que les Fabry-Pérot fabriqués ici sont issus des mêmes conceptions que les RSOA et ne sont pas optimaux (beaucoup de puits, fort dopage p, confinement important...).

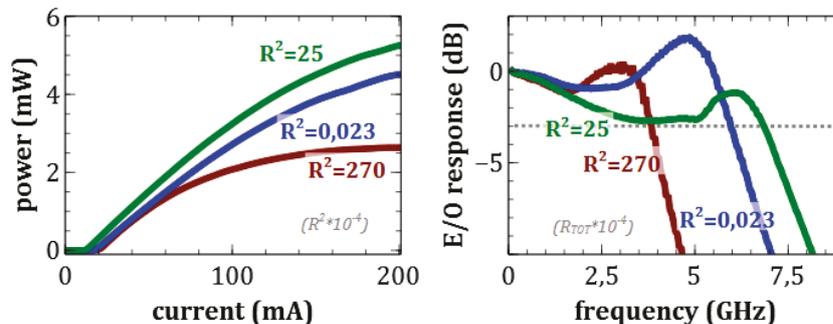


Figure 4.14- Mesures statiques et dynamiques de Fabry-Pérots de réflectivités variées.

De manière intuitive, nous avons choisi le Fabry-Pérot à la plus grande bande passante, le Fabry-Pérot dont le produit des réflectivités est de 0,0025. Bien que, d'après la figure 4.13, nous avons une puissance retour de la cavité supérieure à celle du Fabry-Pérot (pour des pertes comprises entre 5 et 10 dB), la cavité perd son caractère laser lorsqu'on module: le spectre s'élargissant, la puissance est répartie sur une plus grande plage de longueur d'onde et le SMSR devient négligeable (figure 4.15).

Augmenter la réflectivité du Fabry-Pérot jusqu'à un produit des réflectivités de 0,027 améliore la suppression du mode secondaire, le SMSR (*Side Mode Suppression Ratio*) est de l'ordre de 30 dB mais ne permet pas d'obtenir un œil ouvert (figure 4.16) en raison de l'élargissement spectral inhérent à la modulation.

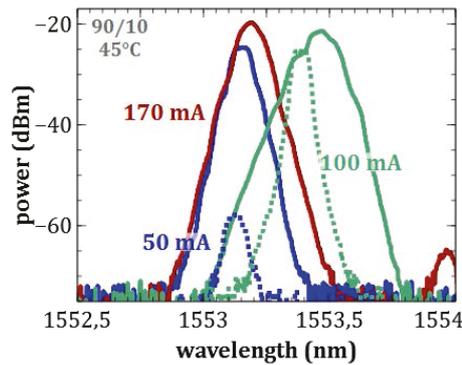


Figure 4.15- Spectres modulés à 2,5 Gbit/s en sortie de cavité pour un Fabry-Pérot de réflectivité totale de 0,0025 (en pointillés, cavité ouverte ; en traits pleins, cavité fermée).

On choisira donc une réflectivité de la facette plus forte (produit $\sim 0,054$) malgré de moins bons résultats statiques et dynamiques.

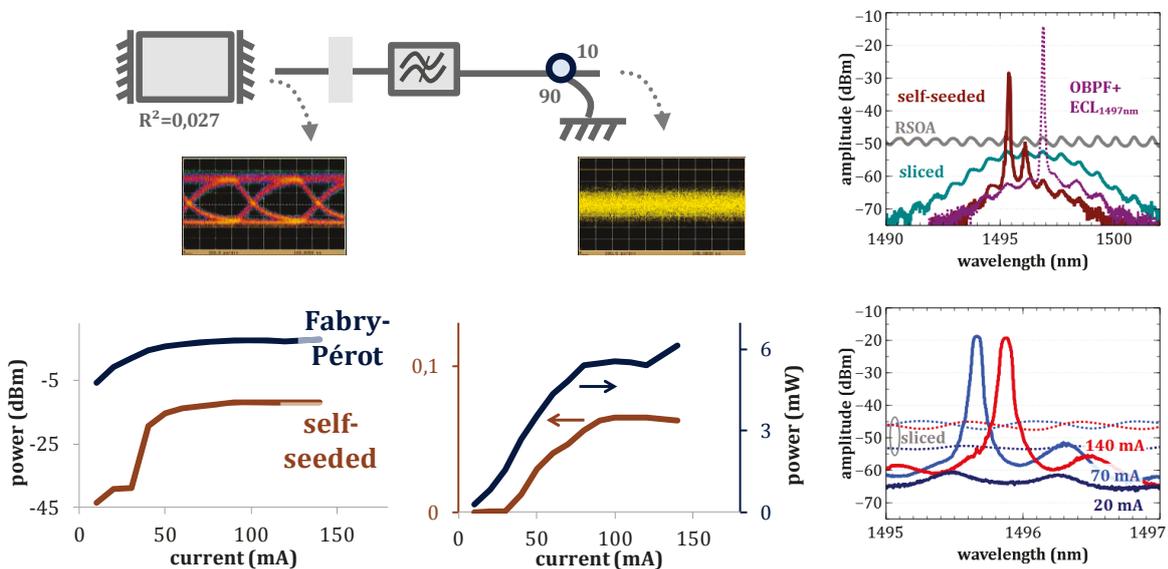


Figure 4.16- Principales caractéristiques du Fabry-Pérot avec un produit de réflectivité $\sim 0,027$: puissance en fonction du courant (échelles linéaire et logarithmique), spectres de sortie en fonction du courant et comparaison entre les spectres de sortie du Fabry-Pérot simple, de la cavité ouverte, du RSOA avec injection laser et de la cavité auto-alimentée.

4.2.3. Paramètres de la cavité

Les performances de la cavité dépendent aussi des paramètres des autres éléments. Nous avons cherché les points de fonctionnement optimaux.

En remplaçant le coupleur usuel 90/10 par un coupleur 50/50, le spectre se rétrécit (figure 4.17 (b)). Nous avons aussi observé qu'après un aller-retour, les puissances revenant au Fabry-Pérot étaient comparables entre les deux coupleurs (figure 4.18). Comme attendu, le seuil est plus faible avec le coupleur 90/10 et la puissance de sortie plus forte avec le coupleur 50/50. Dans la configuration filtrée (non représentée ici), la différence de puissance est de 7 dB ce qui correspond à l'écart des coupleurs. Enfin, le niveau de bruit, a priori dû au *Rayleigh backscattering* [31], ne dépend pas du coupleur et reste négligeable.

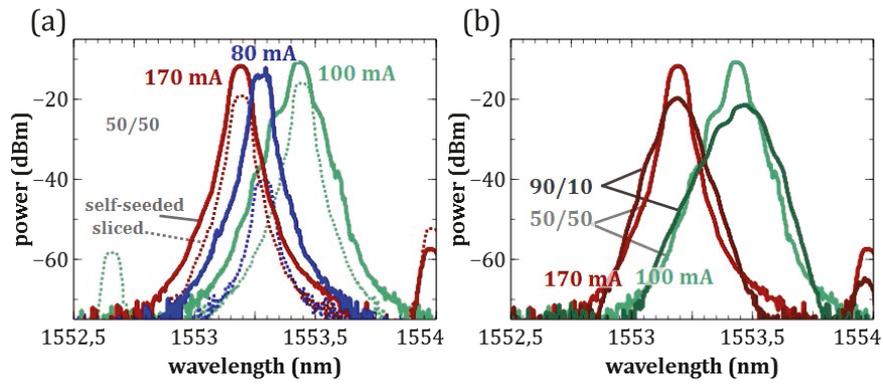


Figure 4.17- Spectres du signal modulé en sortie de cavité pour (a) le coupleur 50/50 et (b) comparaisons avec le coupleur 90/10 à 100 et 170 mA.

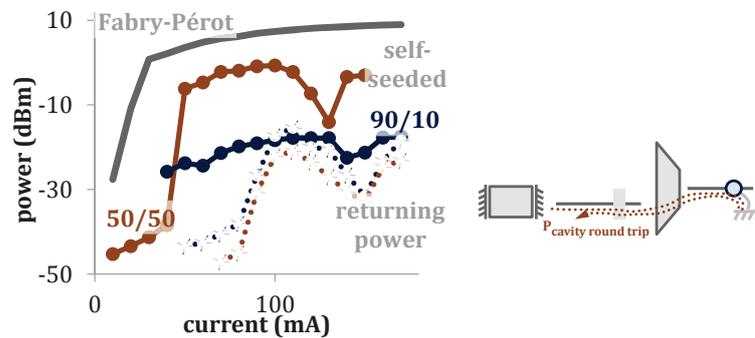


Figure 4.18- Influence du coupleur sur la puissance de sortie de cavité et retournant vers le Fabry-Pérot pour deux valeurs de coupleurs.

Remarquons sur la figure précédente, le point isolé à 140 mA pour le coupleur 50/50 et à 150 mA pour le coupleur 90/10, même présent en configuration filtrée (non représentée ici).

Du fait de son spectre plus étroit, le *chirp* est moins marqué dans le cas du coupleur 50/50 (figure 4.19(a)). Plus la modulation volt pic-pic est faible, plus la variation de l'indice effectif est faible est le *chirp* moins marqué (figure 4.19(b)).

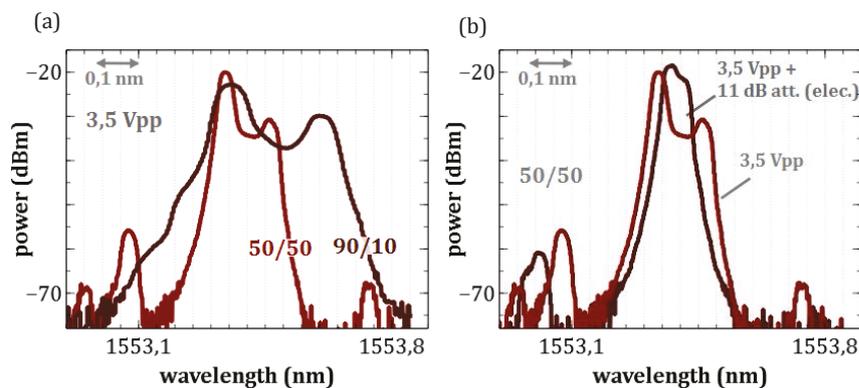


Figure 4.19- Impact du coupleur (a) et du taux d'extinction (b) sur le *chirp*.

Réduire le *chirp*, réduit le bruit inhérent à la largeur du spectre et améliore ainsi le BER (figure 4.20(b)). Le courant (figure 4.20(a)) et les pertes dans la cavité (figure 4.20(a)) impactent aussi le BER. Il existe un point optimal de courant, ici de 79 mA. Plus les pertes augmentent, plus le BER est dégradé. On retrouve dans la figure 4.20(c) le courant optimal pour lequel le bruit est minimal.

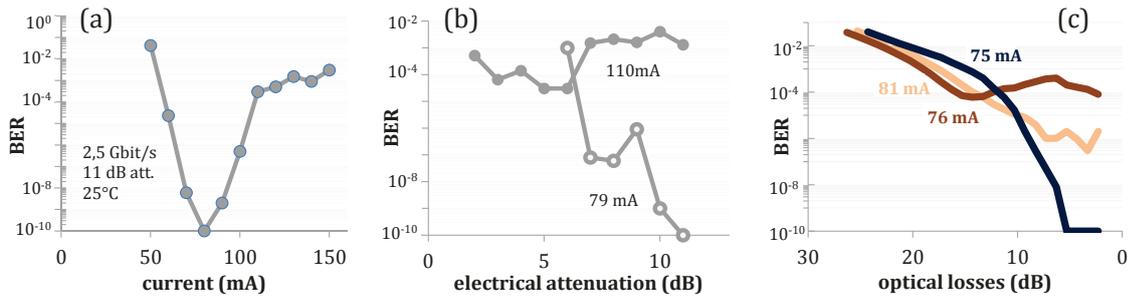


Figure 4.20- Impact du courant (a), de l'atténuation électrique (b) et des pertes dans la cavité (c) sur le BER.

Durant les mesures, il peut arriver qu'on soit amené à chauffer la température du composant afin d'être monomode et augmenter le SMSR. Toutefois, cela se fait au compromis de la puissance de sortie du Fabry-Pérot.

4.2.4. Transmissions à 2,5 Gbit/s

Les caractéristiques statiques du Fabry-Pérot de facettes clivées dans le ruban actif à 0° pour l'une et à 4° dans le ruban passif pour l'autre (soit $R^2 \sim 0,054$), sont représentées en figure 4.21 et 4.22. La cavité possède un seuil de 20 mA et un SMSR de 43 dB. L'intensité du mode secondaire augmente avec le courant. On remarque que le seuil de la cavité est similaire à celui du Fabry-Pérot. Les pertes de la cavité comprennent un passage aller et un passage retour dans le rotateur de Faraday, dans le multiplexeur et dans le coupleur ainsi qu'une réflexion sur le FRM. Elles sont de l'ordre de 13 dB. Précisons aussi qu'en raison du pic de gain du Fabry-Pérot vers 1505 nm, nous utilisons un filtre accordable de largeur à mi-hauteur plus grande que celle d'un AWG standard.

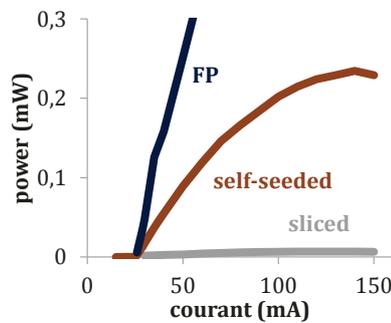


Figure 4.21- Courbe de la puissance en fonction du courant de la cavité auto-alimentée pour le Fabry-Pérot seul, le Fabry-Pérot filtré (*sliced*) et une cavité auto-alimentée (*self-seeded*).

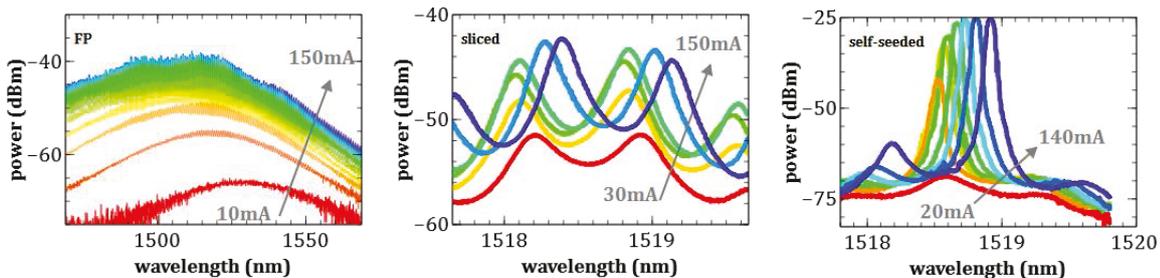


Figure 4.22- Spectres du Fabry-Pérot, du Fabry-Pérot filtré et de la cavité auto-alimentée en fonction du courant.

Les diagrammes de l'œil à 2,5 Gbit/s sont illustrés en figure 4.23. Le Fabry-Pérot seul est bien ouvert mais le bruit que l'on attribue à la partition modale le ferme en configuration filtrée. Dans la cavité auto-alimentée, l'œil est légèrement plus ouvert. On retrouve le rôle de l'atténuation dans la forme du spectre (figure 4.24).

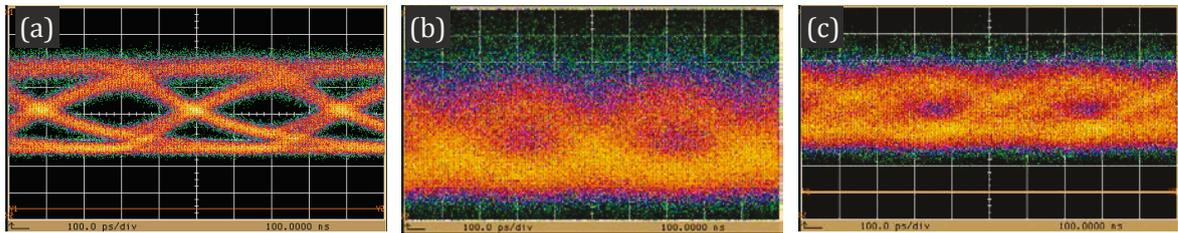


Figure 4.23- Diagrammes de l'œil à 2,5 Gbit/s (a) du Fabry-Pérot seul (11 dB d'atténuation électrique) (b) du Fabry-Pérot filtré (11 dB) et (c) de la cavité auto-alimentée (9 dB d'atténuation électrique).

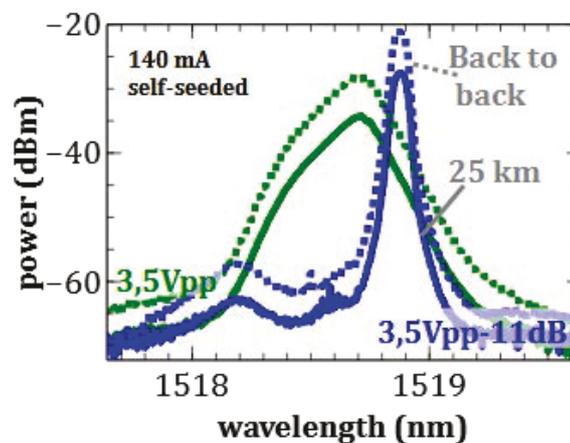


Figure 4.24- Spectre en sortie de cavité auto-alimentée modulée à 2,5 Gbit/s en *back-to-back* et après 25 km pour une tension pic à pic maximale de 3,5 V et minimale avec une atténuation de 11 dB.

Malgré des diagrammes de l'œil relativement peu ouverts, nous sommes parvenus à une transmission de 25 km de taux d'erreur inférieur à 10^{-3} . Pour un BER de $3 \cdot 10^{-5}$, la sensibilité du récepteur est de -33,2 dBm soit un budget optique de 25,4 dB, ce qui est relativement faible. 75 km de transmission donnent un BER de $1,2 \cdot 10^{-2}$ pour une sensibilité de -28 dBm à la réception. En optimisant les paramètres pour le 50 km à 2,5 Gbit/s (courant et tension volt pic-pic), nous avons obtenu un BER de $4 \cdot 10^{-4}$ pour un budget optique de 14,5 dB.

Quoique peu concluant en comparaison aux transmissions avec RSOA, il s'agit là, du meilleur de notre connaissance, d'une des rares transmissions à 2,5 Gbit/s sur 75 km.

Malgré un *chirp* restreint et un SMSR plus grand, le Fabry-Pérot ne convainc pas autant que le RSOA. Le recours à un code Manchester pour réduire le bruit de partition modale [32, 33].

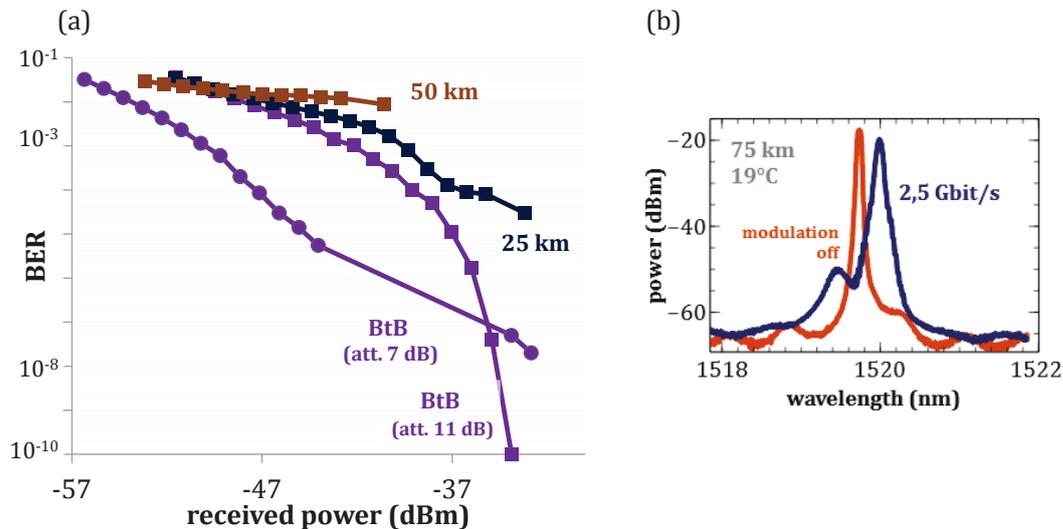


Figure 4.25- (a) BER du FP en cavité auto-alimentée modulée à 2,5 Gbit/s en *back-to-back* et jusqu'à 50 km, (b) spectres optiques modulés après 75 km.

4.3. Intégration d'une nouvelle source : l'EAM-RSOA

4.3.1. Contexte et principe

Dans le chapitre 1, nous évoquons le SOA-REAM en configuration injectée. Le SOA y était utilisé en tant que *booster*, pour amplifier le signal. En cavité auto-alimentée, le SOA a pour double rôle d'effacer le signal et de fournir le gain requis. Sa présence en sortie effacerait donc les données modulées par le REAM.

D'autre part, pour ajouter une fonction supplémentaire à leur SOA, certains ont introduit dans les années 1990 une seconde section ou plus simplement une seconde électrode [34, 35]. En particulier, Holtmann et al. [36] proposèrent en 1996 un RSOA à double section. La première amplifie tandis que la seconde, côté réfléchif, est partagée temporellement pour servir de photodiode à la réception et de modulateur à l'émission. Cette idée fut reprise dix ans plus tard, en 2007 [37], pour augmenter la bande passante du RSOA en divisant l'électrode initiale en deux parties. En injectant une puissance optique plus grande dans la section qui module, le temps de vie des porteurs est réduit. Aussi, diminuer la taille de l'électrode réduit la capacité parasite et augmente potentiellement la bande passante. Ces travaux ont été poursuivis par Guilhem de Valicourt qui montra qu'en plus d'augmenter la bande passante, cette configuration réduisait le *chirp* et donc les pénalités de transmission [15]. La configuration optimale est celle où la modulation est appliquée à l'électrode d'entrée/sortie et le courant continu à la facette miroir. En effet, la variation de la densité de porteurs fait varier l'indice effectif et donc la longueur d'onde (ou *chirp*). Or, les porteurs ne sont pas répartis uniformément le long du RSOA, leur densité est maximale au niveau de la facette réfléchissante. Moduler la section d'entrée/sortie entraîne donc de plus faibles variations que moduler l'électrode côté miroir.

Ces observations furent suivies par d'autres groupes [38], notamment en 2016 appliquées aux cavités auto-alimentées [39]. Si le débit fut effectivement augmenté (jusqu'à 10 Gbit/s), les équipes japonaises ne parvinrent pas à transmettre le signal généré.

Fort de ce contexte, nous avons voulu expérimenter une configuration sensiblement différente, fruit des deux logiques précédentes. Le schéma de principe est représenté en figure 4.26. L'élément actif est

un EAM-RSOA : le RSOA efface et apporte du gain, l'EAM module. En dissociant ces fonctions, nous pouvons adapter les paramètres de chaque élément sans compromis sur le débit. De plus, en modulant via l'EAM, on réduit la variation de la densité de porteurs et donc le *chirp*. En contrepartie de ces avantages, la fabrication requiert deux zones actives différentes, donc une étape de croissance épitaxiale supplémentaire. Ce coût étant partagé par un grand nombre de composant, le coût additionnel sera modéré.

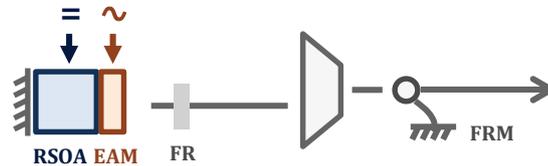


Figure 4.26 Schéma de principe du RSOA-EAM en cavité auto-alimentée.

4.3.2. Composants étudiés

Nous avons repris un EAM-SOA développé pour un autre projet. L'EAM-SOA a été clivé de manière à former un EAM-RSOA. Entre 1500 et 1550 nm, à 20°C, le taux d'extinction entre -2 et 0 V est d'une dizaine de dB (figure 4.27). Polarisé à -1V, sa bande passante (figure 4.28 (a)) est de 15 GHz. Sur la figure, nous avons également tracé la bande passante avec une tension de +1 V, ce qui correspond à un régime SOA. Elle est négligeable et souligne la différence entre une modulation par absorption et une modulation par la densité de porteurs. La modulation grand-signal (figure 4.28(b)) montre un diagramme de l'œil bien ouvert à 20 Gbit/s.

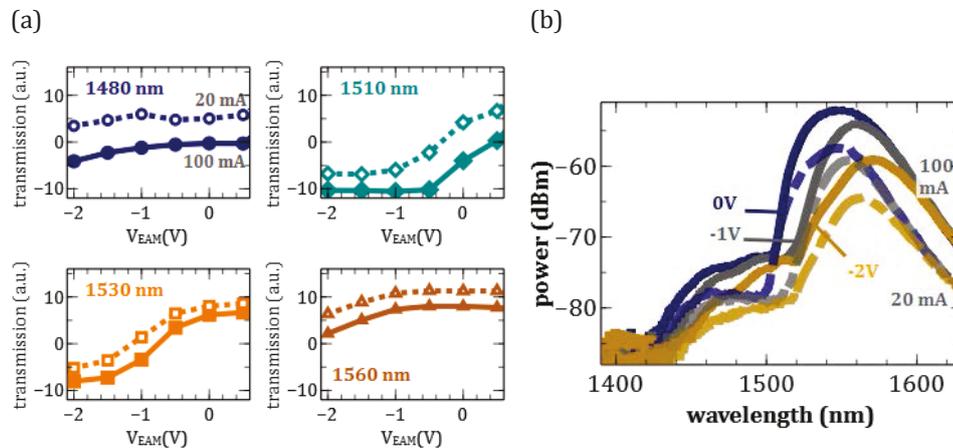


Figure 4.27- (a) Taux d'extinction du SOA-EAM à quatre longueurs d'onde et (b) spectres correspondants.

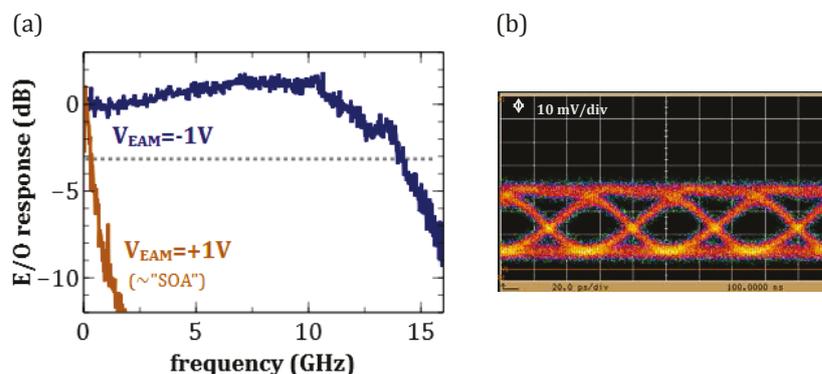


Figure 4.28- (a) Bande passante électro-optique de l'EAM et (b) modulation grand signal à 20 Gbit/s.

En configuration filtrée (figure 4.29), l'œil est encore ouvert à 10 Gbit/s mais en cavité, le RSOA ne parvient pas à effacer le signal retour (figure 4.30). En effet il est de structure similaire à l'EAM, c'est-à-dire en multi-puits et à faible confinement optique, deux conditions peu optimales pour l'effacement.

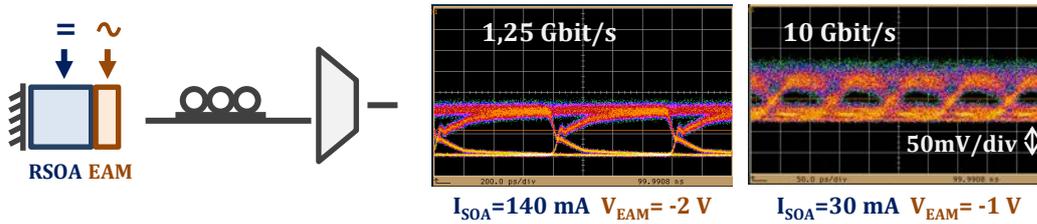


Figure 4.29- RSOA-EAM intégré modulé à 1,25 et 10 Gbit/s en configuration filtrée.

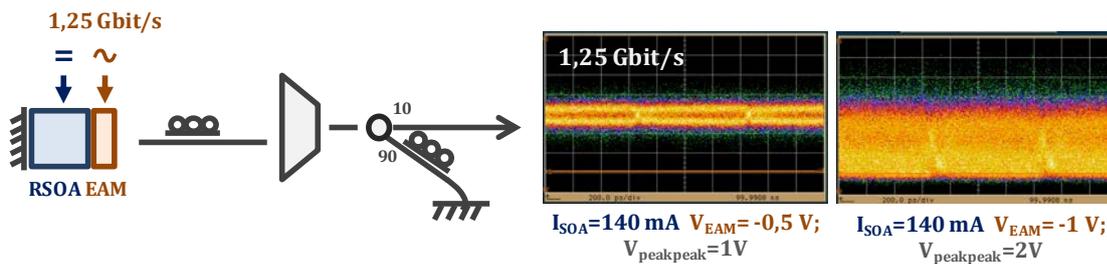


Figure 4.30- RSOA-EAM intégré modulé à 1,25 Gbit/s en cavité auto-alimentée.

Nous savons depuis le chapitre 2 que le RSOA massif à fort confinement optique permettait le meilleur effacement. Pour tester le concept d'intégrer un RSOA massif à 80 % de confinement avec un EAM, de fait en multi-puits, nous considérerons le système discret décrit en figure 4.31. L'EAM-SOA est similaire au précédent. Ce montage a pour inconvénient d'introduire des éléments supplémentaires et donc des pertes mais surtout de ne pas pouvoir contrôler la polarisation dans le tronçon de fibre intermédiaire.

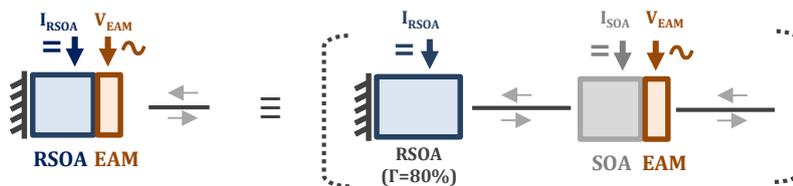


Figure 4.31- RSOA-EAM discrétisé.

La figure 4.32 illustre les capacités du système. Le RSOA efface jusqu'à 20 Gbit/s, même avec un grand taux d'extinction incident. Potentiellement, leur association en cavité auto-alimentée pourrait donc fonctionner à 20 Gbit/s. Remarquons que nous si nous constatons la limite du modulateur, nous ne connaissons pas la limite du RSOA, la photodiode et l'oscilloscope utilisés ici étant limités au-delà de 25 GHz.

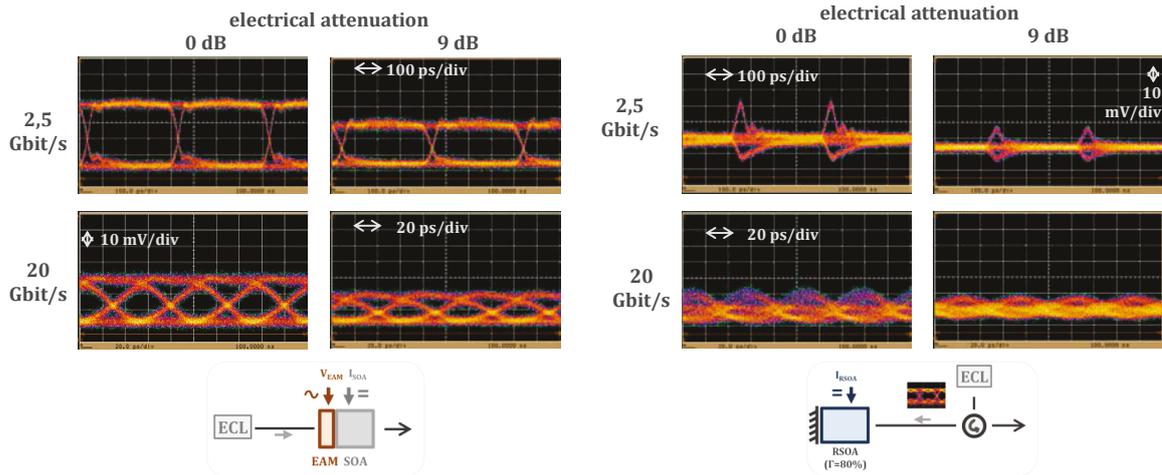


Figure 4.32- Capacités de l'EAM et du RSOA jusqu'à 20 Gbit/s avec le meilleur et le plus mauvais cas.

La très forte sensibilité du RSOA aux réflexions nous a cependant pénalisés car sujet à un fort *ripple* malgré des spectres respectifs corrects (figure 4.33). En fonction des conditions opérationnelles, il fallut parfois se placer dans un régime de plus faible gain pour éviter de former une cavité parallèle.

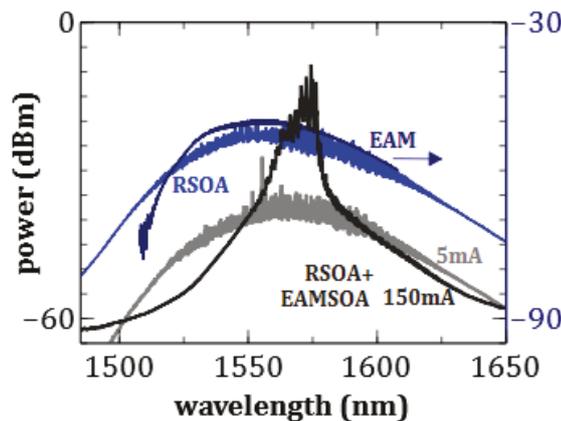


Figure 4.33- Sensibilité du RSOA aux réflexions.

Intégrer les deux composants ci-dessus nécessite un développement particulier. En effet, le mode est très confiné dans le RSOA et l'est beaucoup moins dans l'EAM. Il faudra donc penser et réaliser un adaptateur de mode, le plus transparent possible pour la transmission. Il faudra aussi être vigilant au décalage en longueur d'onde entre les zones actives et placer le gain du RSOA dans la zone où le modulateur est transparent à tension nulle, absorbant pour des tensions négatives.

4.3.3. EAM-RSOA en cavité

Les caractéristiques statiques sont tracées sur les figures ci-dessous. L'effet laser est visible sur la courbe de la puissance en fonction du courant. Du fait de la configuration atypique, on a ajouté un paramètre supplémentaire, le courant du SOA. Le seuil de la cavité dépend principalement du courant dans le RSOA mais aussi du courant dans le SOA. Même à un faible courant de SOA comme 5 mA, l'effet laser est visible (figure 4.34).

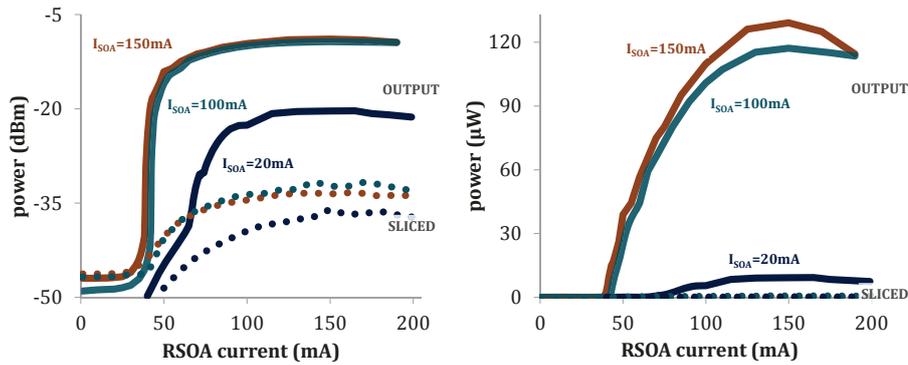


Figure 4.34- Puissance en fonction du courant RSOA du RSOA-EAM en cavité auto-alimentée (traits pointillés : cavité ouverte dite *sliced*, trait plein : cavité fermée)

On retrouve la condition sur le gain en faisant varier les pertes optiques de la cavité. Sur la figure 4.35, le gain des RSOA et SOA ne compense plus les pertes au-delà de 5 dB. Il existe une légère distinction entre les pertes selon qu’elles concernent tout le spectre d’un canal (entre EAM-RSOA et multiplexeur) ou tous les canaux (entre multiplexeur et le coupleur et entre le coupleur et le miroir) (figure 4.36).

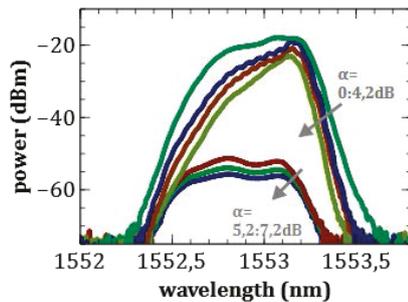


Figure 4.35- Spectres en sortie de cavité pour des pertes optiques variant de 0 à 7 dB.

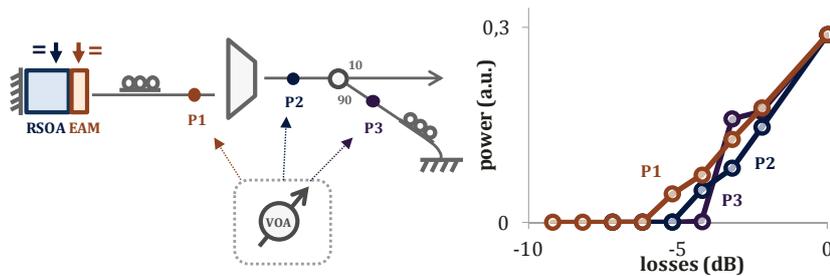


Figure 4.36- Influence de la localisation des pertes dans la cavité.

La comparaison des spectres en sortie de cavité pour différents courants dans le SOA et dans le RSOA indique un comportement original. Les courbes pour des courants SOA de 100 et 150 mA suivent la même tendance que celle de la littérature [39] : le pic de longueur s’établit plutôt aux grandes longueurs d’ondes. Mais à plus faible courant (5 mA), le pic de la cavité est à basses longueurs d’ondes. Nous avons complété ces observations par celles du signal revenant dans l’EAM-RSOA, mesurées à l’aide du coupleur 99/1 (figure 4.38). Pour le courant de SOA de 150 mA, la comparaison du signal sortant de la cavité (pointillés) et revenant vers l’EAM-RSOA (trait plein) ne donne qu’une translation proportionnelle aux pertes dans la cavité. A 100 mA dans le SOA, le spectre retour apparaît plus filtré aux basses longueurs d’ondes.

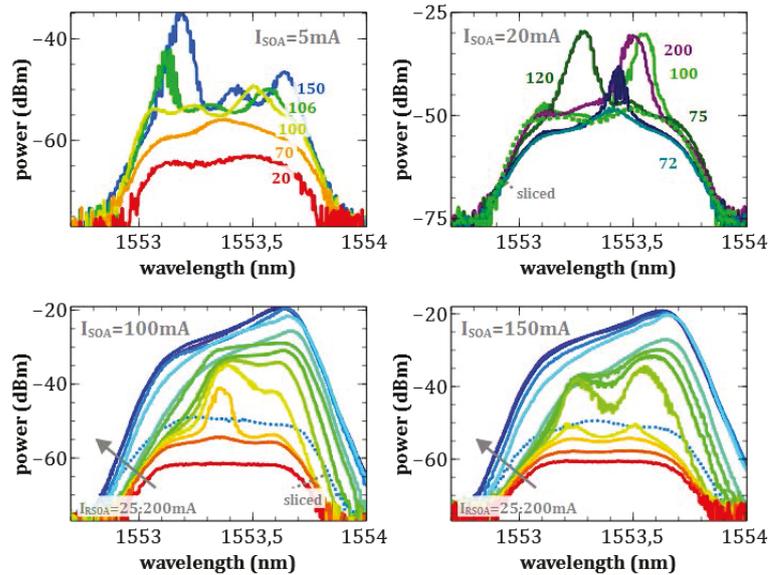


Figure 4.37- Spectres de l'EAM-RSOA en cavité auto-alimentée pour différents courants de SOA et de RSOA.

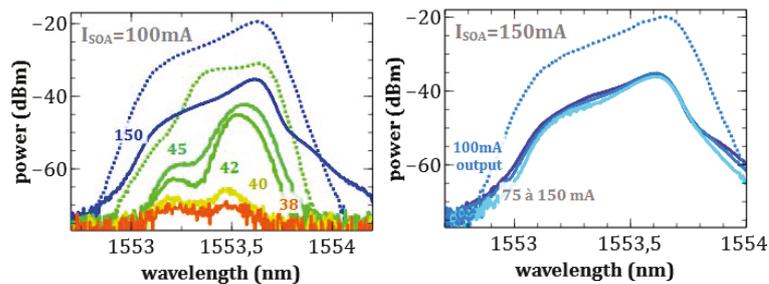


Figure 4.38- Spectres revenant à l'EAM-RSOA.

La gestion de la polarisation influe grandement le signal de sortie. Sur la figure 4.39, nous voyons qu'un mauvais réglage du contrôleur de polarisation peut entraîner un œil bruité et complètement fermé.

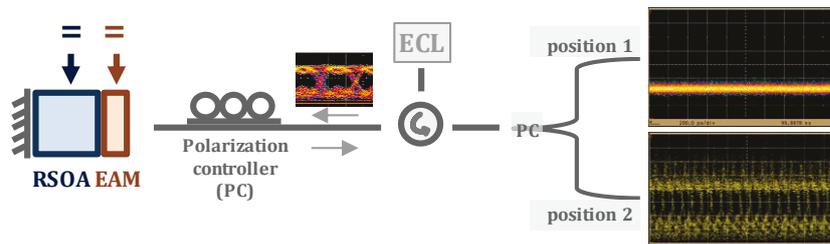


Figure 4.39- Influence de la polarisation sur un signal modulé.

Enfin nous avons cherché les conditions minimisant le taux d'erreur à 2,5 Gbit/s (figure 4.40). Il est minimal pour une polarisation du modulateur à -1,5 V et une modulation volt pic à pic de 3,5 V. A ces conditions, le courant optimal du RSOA est de 80 mA. Au-delà de 100 mA, celui du SOA n'influe plus.

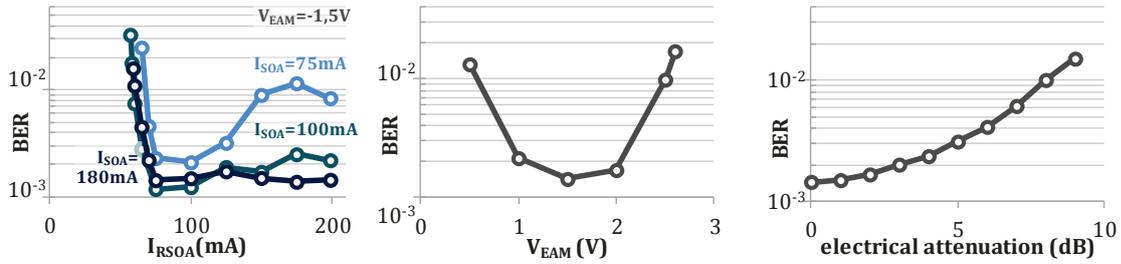


Figure 4.40- Optimisation des courants RSOA et SOA, de la tension appliquée au modulateur et de l’amplitude de modulation.

Notre configuration initiale se compose du composant discrétisé de la figure 4.31, d’un rotateur de Faraday, d’un AWG de 0,8 nm de large, d’un coupleur 90/10 et du FRM. En *back-to-back*, le BER atteint à peine la valeur de 10^{-3} . L’ajout d’un contrôleur de polarisation entre les deux éléments diminue dans un premier temps le BER à 4.10^{-4} mais il augmente à nouveau lorsqu’on ajoute des pertes. En revanche remplacer l’AWG par un filtre plus large améliore le taux d’erreur. Ajouter à cette configuration le contrôleur de polarisation et inverser l’ordre EAM-SOA permet d’atteindre un BER de 10^{-5} . Toutefois, l’ajout de ces éléments entraîne des pertes supplémentaires et restreint le budget optique à une transmission sur 10 km et un taux d’erreur à 4.10^{-3} . Nous avons donc poursuivi avec la configuration initiale (figure 4.41). A 50 km et pour un BER de 2.10^{-2} , la pénalité est de 2,8 dB pour une sensibilité en réception de -38 dBm soit un budget optique de 30 dB.

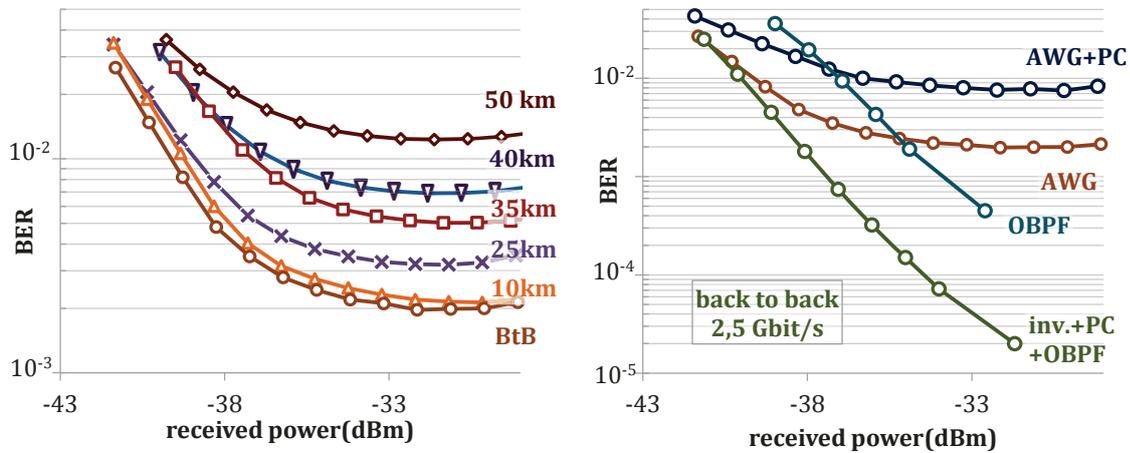


Figure 4.41- Taux d’erreurs du RSOA-EAM en cavité auto-alimentée à 2,5 Gbit/s.

Afin de s’affranchir de la gestion de la polarisation, nous pourrions effectuer cette manipulation en remplaçant la fibre entre RSOA et EAM-SOA par de l’optique en espace libre.

Conclusion du chapitre 4

Les cavités auto-alimentées demeurent un vaste sujet. Bien que l'on saisisse de plus en plus le comportement et les effets dans la cavité, des questions restent en suspens, à commencer par sa nature laser ou non. Plus concrètement, nous avons mis en évidence l'importance du rôle de l'élément réfléchissant mais ne sommes pas allés au bout de cette réflexion. Des mesures complémentaires permettront probablement de déterminer plus précisément le rôle des pertes et de la taille de la cavité sur sa rapidité.

D'autre part, les nouvelles conceptions de RSOA n'ont répondu que partiellement aux exigences de débit et de distance. Les performances visées ne peuvent s'obtenir sans une nouvelle rupture. A défaut de provenir de la physique même du RSOA, elle pourrait provenir d'un changement de point de vue. Cela passe par de nouveaux composants et de nouvelles fonctions. Pour éviter la bande O, pour laquelle tous les éléments ne sont pas encore standardisés, nous avons contourné par deux manières la gestion du *chirp*. Par réduction de la largeur de la raie laser (Fabry-Pérot) d'abord et ensuite par la réduction de la variation de la densité de porteurs (RSOA bi-électrode, RSOA-EAM).

C'est ce que nous avons donc entrepris en réalisant des types de cavité auto-alimentée encore peu pratiqués. Malgré des résultats prometteurs, de nombreuses optimisations sont à apporter. Ainsi le bruit de partition modal limite la transmission dans le Fabry-Pérot auto-alimenté. Le code Manchester pourrait être une réponse mais diminuerait dans le même temps le caractère générique de la solution initiale.

Les promesses du RSOA-EAM sont restées à l'état de potentialité en raison du contrôle de polarisation difficile entre les deux éléments discrets. La même configuration en introduisant de la propagation en espace libre relâcherait ce type de contrainte. L'intégration est possible mais se positionne sur du moyen terme.

Dans les deux cas, nous sommes parvenus à des transmissions à 2,5 Gbit/s sur 50 km.

Bibliographie chapitre 4

- [1] Simon, G. ; Saliou, F. ; Chanclou, P. ; Brenot, R. ; Maho, A. ; Barbet, S. ; Erasme, D., "Bruit de battement des sources self-seeded à cavité kilométrique pour le multiplexage en longueur d'onde," in Journées Nationales de l'Optique Guidée (JNOG),2015, Rennes,P82
- [2] A. Maho *et al.*, "Demystification of the Self-Seeded WDM Access," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 776-782, Jan.15, 15 2016. doi: 10.1109/JLT.2015.2466090
- [3] R. Brenot *et al.*, "Evidence of gain modulation in km-long lasers," *ISLC 2012 International Semiconductor Laser Conference*, San Diego, CA, 2012, pp. 108-109. doi: 10.1109/ISLC.2012.6348351
- [4] G. Simon, F. Saliou, P. Chanclou, Q. Deniel, D. Erasme and R. Brenot, "70km external cavity DWDM sources based on O-band self seeded RSOAs for transmissions at 2.5Gbit/s," *OFC 2014*, San Francisco, CA, 2014, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2014.W3G.
- [5] P. Parolari *et al.*, "10-Gb/s Operation of a Colorless Self-Seeded Transmitter Over More Than 70 km of SSMF," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 6, pp. 599-602, March15, 2014. doi: 10.1109/LPT.2014.2301192
- [6] A. Gatto, M. Brunero, P. Parolari, P. Martelli, R. Brenot and P. Boffi, "O-band 12-Gb/s FDM-WDM PON transmission exploiting self-seeding in reflective semiconductor optical amplifiers," *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Budapest, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICTON.2015.7193397
- [7] Hong-Gang Yu, Yong Wang, Chang-Qing Xu, J. Wojcik and P. Mascher, "Spectral investigation of multimode fiber Bragg grating based external-cavity semiconductor lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 41, no. 12, pp. 1492-1501, Dec. 2005. doi: 10.1109/JQE.2005.857706
- [8], M. Radziunas *et al.*, "Design of multisection semiconductor laser for 40 Gb/s direct modulation," *2005 31st European Conference on Optical Communication, ECOC 2005*, Glasgow, 2005, pp. 677-678 vol.3. doi: 10.1049/cp:20050667
- [9] L. Bach, W. Kaiser, J. P. Reithmaier, A. Forchel, T. W. Berg and B. Tromborg, "Enhanced direct-modulated bandwidth of 37 GHz by a multi-section laser with a coupled-cavity-injection-grating design," in *Electronics Letters*, vol. 39, no. 22, pp. 1592-1593, 30 Oct. 2003. doi: 10.1049/el:20031018
- [10] Q. T. Le *et al.*, "RSOA-based external cavity laser as cost-effective upstream transmitter for WDM passive optical network," *CLEO: 2011 - Laser Science to Photonic Applications*, Baltimore, MD, 2011, pp. 1-2. doi: 10.1364/CLEO_AT.2011.JWA9
- [11] G. Morthier, R. Schatz and O. Kjebon, "Extended modulation bandwidth of DBR and external cavity lasers by utilizing a cavity resonance for equalization," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 36, no. 12, pp. 1468-1475, Dec. 2000. doi: 10.1109/3.892568
- [12] 2005 J. P. Reithmaier *et al.*, "Modulation speed enhancement by coupling to higher order resonances: a road towards 40 GHz bandwidth lasers on InP," *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2005*, 2005, pp. 118-123. doi: 10.1109/ICIPRM.2005.1517434
- [13] Gebrewold, S.A.; Bonjour, R.; Barbet, S.; Maho, A.; Brenot, R.; Chanclou, P.; Brunero, M.; Marazzi, L.; Parolari, P.; Totovic, A.; Gvozdic, D.; Hillerkuss, D.; Hafner, C.; Leuthold, J. Self-Seeded RSOA-Fiber Cavity Lasers vs. ASE Spectrum-Sliced or Externally Seeded Transmitters—A Comparative Study. *Appl. Sci.* 2015, 5, 1922-1941.
- [14] Q. Deniel *et al.*, "Up to 10 Gbit/s transmission in WDM-PON architecture using external cavity laser based on self-tuning ONU," *OFC/NFOEC*, Los Angeles, CA, 2012, pp. 1-3.
- [15]
- [16] G. de Valicourt *et al.*, "Chirp Reduction in Directly Modulated Multi-Electrode RSOA Devices in Passive Optical Networks," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 19, pp. 1425-1427, Oct.1, 2010. doi: 10.1109/LPT.2010.2062496
- [17] Ki-Man Choi and Chang-Hee Lee, "Colorless operation of WDM-PON based on wavelength locked Fabry-Perot laser diode," *2005 31st European Conference on Optical Communication, ECOC 2005*, Glasgow, 2005, pp. 453-454 vol.3. doi: 10.1049/cp:20050558
- [18] K. Y. Park and C. H. Lee, "Intensity Noise in a Wavelength-Locked Fabry-Perot Laser Diode to a Spectrum Sliced ASE," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 44, no. 3, pp. 209-215, March 2008. doi: 10.1109/JQE.2007.911685
- [19] Q. T. Nguyen *et al.*, "Bidirectional 2.5-Gb/s WDM-PON Using FP-LDs Wavelength-Locked by a Multiple-Wavelength Seeding Source Based on a Mode-Locked Laser," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 11, pp. 733-735, June1, 2010. doi: 10.1109/LPT.2010.2044569
- [20] M. Schell, D. Huhse, W. Utz, J. Kaessner, D. Bimberg and I. S. Tarasov, "Jitter and dynamics of self-seeded Fabry-Perot laser diodes," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 1, no. 2, pp. 528-534, Jun 1995. doi: 10.1109/2944.401238
- [21] Chien Hung Yeh, Fu Yuan Shih, Chia Hsuan Wang, Chi Wai Chow, and Sien Chi, "Cost-effective wavelength-tunable fiber laser using self-seeding Fabry-Perot laser diode," *Opt. Express* 16, 435-439 (2008)

- [22] Min Zhu, Shilin Xiao, Zhao Zhou, Wei Guo, Lilin Yi, Meihua Bi, Weisheng Hu, and Benoit Geller, "An upstream multi-wavelength shared PON based on tunable self-seeding Fabry-Pérot laser diode for upstream capacity upgrade and wavelength multiplexing," *Opt. Express* 19, 8000-8010 (2011)
- [23] M. Presi, A. Chiuchiarelli, R. Corsini and E. Ciaramella, "Uncooled and Polarization Independent Operation of Self-Seeded Fabry-Pérot Lasers for WDM-PONs," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 17, pp. 1523-1526, Sept.1, 2012. doi: 10.1109/LPT.2012.2207886
- [24] T. Komljenovic, D. Babic and Z. Sipus, "C and L band self-seeded WDM-PON links using injectionlocked Fabry-Pérot lasers and modulation averaging," *OFC 2014*, San Francisco, CA, 2014, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2014.W3G.1
- [25] Y. C. Su, Y. C. Chi, H. Y. Chen and G. R. Lin, "Using Self-Feedback Controlled Colorless Fabry-Perot Laser Diode for Remote Control Free Single-Mode DWDM-PON Transmission," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 50, no. 8, pp. 658-668, Aug. 2014. doi: 10.1109/JQE.2014.2333662
- [26] Fu Yuan Shih, Chien Hung Yeh, Chi Wai Chow, Chia Hsuan Wang, Sien Chi, Utilization of self-injection Fabry-Pérot laser diode for long-reach WDM-PON, *Optical Fiber Technology*, Volume 16, Issue 1, January 2010, Pages 46-49, ISSN 1068-5200, <http://dx.doi.org/10.1016/j.yofte.2009.10.001>.
- [27] A. Chiuchiarelli, M. Presi and E. Ciaramella, "Effective architecture for 10 Gb/s upstream WDM-PONs exploiting self-seeding and external modulation," *OFC/NFOEC*, Los Angeles, CA, 2012, pp. 1-3.
- [28] Ki-Man Choi, Jin-Serk Baik and Chang-Hee Lee, "Color-free operation of dense WDM-PON based on the wavelength-locked fabry-Pe/spl acute/rot laser diodes injecting a low-noise BLS," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 1167-1169, May 2006. doi: 10.1109/LPT.2006.874719
- [29] G. R. Lin, H. L. Wang, G. C. Lin, Y. H. Huang, Y. H. Lin and T. K. Cheng, "Comparison on Injection-Locked Fabry-Perot Laser Diode With Front-Facet Reflectivity of 1% and 30% for Optical Data Transmission in WDM-PON System," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 14, pp. 2779-2785, July15, 2009. doi: 10.1109/JLT.2009.2016676
- [30] C. H. Yeh, C. W. Chow, Y. F. Wu, S. P. Huang, Y. L. Liu and C. L. Pan, "Performance of Long-Reach Passive Access Networks Using Injection-Locked Fabry-Pérot Laser Diodes With Finite Front-Facet Reflectivities," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 12, pp. 1929-1934, June15, 2013. doi: 10.1109/JLT.2013.2254700
- [31] S. Y. Lin *et al.*, "Coherent Injection-Locking of Long-Cavity Colorless Laser Diodes With Low Front-Facet Reflectance for DWDM-PON Transmission," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1501011-1501011, July-Aug. 2013. doi: 10.1109/JSTQE.2013.2238896
- [32] G. Simon *et al.*, "Observation of a Random Fiber Laser Induced by Rayleigh Backscattering," *2014 International Semiconductor Laser Conference*, Palma de Mallorca, 2014, pp. 104-105. doi: 10.1109/ISLC.2014.185
- [33] M. E. Chaibi, L. Bramerie, S. Lobo and C. Peucheret, "Mitigation of Mode Partition Noise in Quantum-Dash Fabry-Perot Mode-Locked Lasers using Manchester Encoding," *ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication*, Dusseldorf, Germany, 2016, pp. 1-3.
- [34] C. Jorgensen *et al.*, "Two-section semiconductor optical amplifier used as an efficient channel dropping node," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 348-351, April 1992. doi: 10.1109/68.127209
- [35] J. -. Emery, B. Lavigne, C. Porcheron, C. Janz, F. Dorgeuille, F. Pommereau, F. Gaborit, I. Guillemot-Neubauer, and M. Renaud, "Two-section Semiconductor Optical Amplifier power equaliser with 8dBm Output Saturation Power for 10Gbit/s Applications," in *Optical Amplifiers and their Applications*, S. Kinoshita, J. Livas, and G. van den Hoven, eds., Vol. 30 of Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America, 1999), paper FB3.
- [36] C. Holtmann, R. Dall'Ara, P. -. Besse, D. Sakellariou, W. Hunziker, and H. Melchior, "Reflective Semiconductor Optical Amplifier at 1.3µm Wavelengths for Customer Connection in Optical Access Networks," in *Optical Amplifiers and Their Applications*, R. Jopson, K. Stubkjaer, and M. Suyama, eds., Vol. 5 of OSA Trends in Optics and Photonics Series (Optical Society of America, 1996), paper SD3.
- [37] R. Brenot *et al.*, "High modulation bandwidth reflective SOA for optical access networks," *33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication*, Berlin, Germany, 2007, pp. 1-2. doi: 10.1049/ic:20070372
- [38] Guiying JSemicon 2014] Jiang Guiying and Huang Lirong, "Remodulation scheme based on a two-section reflective SOA", *Journal of Semiconductors*, vol. 35, no. 5, pp. 054008, 2014
- [39] P. Zhou, W. Zhan, T. Tanemura, M. Mukaikubo and Y. Nakano, "Two-Section RSOA with Enhanced Modulation-Cancelling Effect for Self-Seeded Colorless WDM Transmitter," *ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication*, Dusseldorf, Germany, 2016, pp. 1-3.
- [40] G. Simon, F. Saliou, P. Chancelou and R. Brenot, "Infrastructure impact on transmission performances of self seeded DWDM colorless sources at 2.5Gbps," *2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Cannes, 2014, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2014.6964061

CONCLUSION GENERALE

Les nouveaux modes de consommation et les évolutions technologiques exigent des réseaux d'accès toujours plus performants en termes de débit, de coût et de latence. Leur mutation est d'ores et déjà amorcée entraînant une multitude de solutions. Quoiqu'un fort intérêt soit porté sur les couches hautes du modèle OSI (*Open Systems Interconnection*), la couche physique demeure une couche critique pour les opérateurs et équipementiers.

Ainsi les cavités auto-alimentées articulent un nouveau type d'architecture avec un nouveau type de composants directement modulés pour répondre aux spécifications éditées dans le récent standard NG-PON2. Cette solution a pour principal avantage d'être achromatique : tous les composants sont identiques ce qui simplifie considérablement son installation et son entretien. Malgré cet aspect séduisant, les verrous de débits, de distance de transmission et de consommation énergétique persistent. Cette thèse s'est attachée à les lever, ce manuscrit en retranscrit les principales étapes.

Nous avons tout d'abord décrit les cavités auto-alimentées dans leur ensemble. Leurs prémices remontent à la fin des années 1980. Mais il fallut attendre le début des années 2010 et les premiers RSOA directement modulés à haut-débit pour envisager une implémentation dans les nouveaux réseaux d'accès. Une cavité se définit par l'association d'un élément actif (typiquement un RSOA ou un laser Fabry-Pérot), d'un filtre optique (typiquement un AWG), d'un coupleur dont une sortie est connectée à un élément réfléchissant, et dont l'autre sortie est reliée au cœur de réseau. Précisons qu'il n'y a pas d'autre élément actif. Plusieurs groupes se sont intéressés à cette architecture au fort potentiel ; citons l'équipementier Huawei, l'université de Tokyo aux relations privilégiées avec Oclaro et NTT, et les partenaires européens des projets ERMES et LAMPION. Quoique de complexité réduite, chaque élément impacte les performances de débit et de distance de transmission. La littérature expose plusieurs de ces configurations, mesure ou simule l'impact des différents paramètres. Malgré ces optimisations, les verrous de débits et de portée persistent et n'étaient, au début de cette thèse, levés que par des compromis avec la simplicité et le coût du système. Une rupture avec les performances classiques de l'élément actif était alors attendue.

C'est pourquoi nous nous sommes concentrés sur l'élément le plus prometteur : le RSOA. Dans une première approche, nous avons cherché à évaluer les paramètres importants pour qu'un RSOA remplisse au mieux les rôles de l'élément actif de la cavité. Nous nous sommes appuyés sur les RSOA existants, à savoir des RSOA massifs de confinement optique variés, la première génération de RSOA multi-puits quantiques, ainsi que sur les résultats de la littérature. L'élément actif assure trois rôles principaux : la modulation, le gain et l'effacement des données contre-propagatives. Des tendances opposées se sont dégagées de ces comparaisons. Un RSOA massif à fort confinement privilégie l'effacement des données tandis que le RSOA multi-puits de confinement modéré assure une large

bande passante. Il est tout de même capable d’effacer “suffisamment” et nous l’avons pris par la suite comme référence. A partir de ces éléments, nous avons conçus et fabriqués différentes variantes de RSOA. Jusqu’à présent tous les RSOA du III-V Lab, et plus généralement de la littérature, étaient en bande C, c’est-à-dire émettant à 1,55 μm . Cette bande d’émission est la plus répandue et la plus maîtrisée, mais souffre de dispersion chromatique qui a pour conséquence de limiter la distance de transmission. En revanche la bande O, à 1,3 μm , présente une dispersion chromatique quasi-nulle et c’est pourquoi nous avons choisi d’explorer cette option. Une seconde option fut de remplacer le phosphore par de l’aluminium. Cette solution est employée dans les lasers pour augmenter bande passante et tenue en température grâce à un meilleur confinement des électrons et grâce à un meilleur gain différentiel. Néanmoins l’aluminium présente l’inconvénient de s’oxyder rapidement. Nous avons adapté de manière pragmatique la fabrication, fabrication d’autant plus sensible que les rubans sont enterrés. Enfin nous avons joué sur un autre paramètre déterminant dans le confinement des porteurs : la hauteur des barrières. Les processus de conception et fabrication ont été établis dans un souci de reproductibilité et de rendement afin d’améliorer l’uniformité d’une plaque et, *in fine*, réduire les coûts de production. Les vieillissements des plaques en aluminium ne dénotent pas d’affaiblissement caractéristique. Nous proposons donc une nouvelle génération de RSOA, nouvelle par la bande d’émission et par son matériau. Au-delà de l’espoir d’amélioration des performances de la cavité, ces variations multiples et croisées autorisent une comparaison poussée pour établir quels sont les phénomènes physiques dominants dans un RSOA.

Mais avant cela, nous avons rappelé quelques aspects de la physique des semiconducteurs, aspects qui nous semblaient essentiels dans la compréhension physique du RSOA et à partir desquels nous avons produit un outil de simulation sommaire. Disposer d’un outil prédictif constitue d’ailleurs un des principaux enjeux concernant les RSOA. A ce jour, les modèles les plus performants se font au prix de compromis, limitant d’autant le domaine d’application. Modèle et compréhension du RSOA vont de pair. Et c’est pourquoi nous les avons mis en perspective afin de mettre en évidence une définition possible du RSOA. Concrètement, nous pensons que le RSOA peut se définir expérimentalement par deux caractéristiques : son spectre et sa courbe de puissance en fonction du courant (P(I)). Son spectre d’ASE est l’image du gain matériau, son allure est parabolique. Parfois, la frontière entre “mauvais” RSOA (*i.e.* dont le spectre est perturbé par du *ripple*) et “mauvais” Fabry-Pérot (*i.e.* dont l’amplitude des modes est faible) est ténue. La rupture de pente du P(I) est alors discriminante. Celle du RSOA est continue tandis que celle du laser est discontinue. Ces définitions mathématiques traduisent des comportements physiques distincts et donc une définition du seuil du RSOA distincte de celle du laser. Nous ne maîtrisons pas encore totalement leur explication mais avons néanmoins démontré l’importance de l’émission spontanée par des mesures expérimentales et par des simulations. Cela étaye l’influence du confinement optique sur les P(I) associés. Nous avons enfin discuté de l’influence du “ β ” sans pour autant converger vers un rôle clairement défini.

Les espoirs nés des nouvelles conceptions de RSOA n’ont pas tous été confirmés. Nous l’avons vu au dernier chapitre, la bande O satisfait les transmissions longues distances. Toutefois, de même que les RSOA aluminium, ils ne furent pas aussi rapides que les RSOA références de la première génération. La tenue en température mesurée de manière factuelle par des P(I) d’ASE et des bandes passantes à des températures comprises entre 14°C et 60°C est aussi meilleure dans le RSOA de référence. Dans un second temps, la comparaison des RSOA de structures similaires mais d’hauteurs de barrières différentes indique qu’il existe pour chaque structure une hauteur optimale qui influe grandement sur les performances. Le confinement des trous semble tout aussi décisif que celui des électrons. De plus, la comparaison entre les Fabry-Pérot laisse supposer un défaut du matériau ou un

défaut lors du processus de fabrication des composants aluminium. Intuitivement, on pourrait attribuer ces défauts à l'enterrement du ruban sur les parois oxydées. Les analyses au microscope à balayage électronique n'ayant pas montré d'anomalie caractéristique, cette hypothèse ne pourra se vérifier qu'avec de nouvelles conceptions et fabrications.

Plus précisément, la comparaison entre les RSOA illustre la compétition entre émission stimulée et émission Auger. La première intervient avec de fortes densités de photons tandis que la seconde permet de consommer les porteurs résiduels à faibles densités de photons. L'Auger serait donc bénéfique au RSOA en réduisant le temps de vie des porteurs. Nous avons aussi tenté de réduire ce temps de vie en diminuant les fuites. Dans un RSOA classique (non modulé), la fuite des porteurs influe sur le rendement à la prise et sur la tenue en température. Dans un RSOA modulé, les fuites pourraient influencer aussi sur le temps de vie des porteurs, ce qui est d'ailleurs une nuance par rapport aux lasers où la bande passante est principalement limitée par la capacité parasite et par la fréquence de résonance. Schématiquement, le taux d'émission spontanée est proportionnel au carré de la densité de porteurs. Augmenter l'émission spontanée augmente l'ASE et donc l'émission stimulée qui consomme des porteurs et réduit leur temps de vie moyen. A nouveau les solutions "laser" telles que l'enterrement dans un matériau semi-isolant ne donnent pas de résultats concluants, indiquant la prédominance de la structure sur les autres paramètres.

Enfin, la manipulation des mesures expérimentales confirme l'importance du seuil. En effet, en comparant les données non pas en fonction du courant mais en fonction du rapport courant sur courant du seuil RSOA, les comportements des RSOA, pourtant variés, se rejoignent. Même si nous n'avons pas déterminé avec certitude les phénomènes impliqués, nous pouvons suggérer de porter les efforts d'optimisation dans la réduction du seuil RSOA.

Un dernier aspect, transverse à tous ces RSOA est celui des réflexions parasites dites *ripple*. D'intensité modérée sur les SOA et RSOA classiques, leur intensité est exacerbée dans les RSOA fort gain spécifiques aux cavités auto-alimentées. Les réflexions parasites ne sont pas dues au traitement antireflets de la facette, cause généralement admise pour expliquer ce phénomène, mais à des changements d'indice optique brusques. Ces changements sont provoqués par des petites imperfections de fabrication, usuellement transparentes pour l'utilisateur. Un effort conséquent a donc été porté à leur élimination.

Dans un dernier temps, nous avons porté notre intérêt sur la réalisation de cavité auto-alimentées. Nos partenaires ont obtenu avec les RSOA bande O des résultats à l'état de l'art tant en termes de distances (jusqu'à une centaine de kilomètres à 2,5 Gbit/s) qu'en termes de débit (jusqu'à 10 Gbit/s sur quelques dizaines de kilomètres). Nous avons également mené quelques observations sur l'influence de l'élément réfléchissant sur la bande passante, aspect encore peu étudié jusqu'à présent.

A défaut de pouvoir réunir les deux exigences de débit et de distances avec la nouvelle génération de RSOA, nous avons cherché des alternatives dans des composants proches du RSOA. Le laser Fabry-Pérot concilie simplicité de fabrication et possibilité de modulation haut débit. Le bruit de partition modale est un désagrément connu. Nous nous sommes confrontés à la compétition entre le signal revenant de la cavité auto-alimentée et celui revenant de la cavité Fabry-Pérot. Cette compétition empêche l'établissement du régime laser dans la cavité. Pour rétablir un équilibre, nous avons cherché la réflectivité optimale des facettes du laser. Nous avons alors pu obtenir une transmission parmi les plus performantes de l'état de l'art à 2,5 Gbit/s jusqu'à 75 km. Cette solution est toutefois trop sensible à plusieurs paramètres pour être envisagée dans un système plus complexe.

Une dernière étude porta alors sur une solution originale en changeant légèrement de point de vue. D'une part, le REAM-SOA permet d'obtenir de bons résultats en configuration injectée mais n'est pas compatible avec la configuration auto-alimentée. D'autre part, il n'existe pas de RSOA bande C rapide et transmettant sur de grandes distances. Nous avons suggéré de réaliser un EAM-RSOA dans lequel l'EAM assure la modulation haut-débit et le RSOA assure le gain et l'effacement des données. Le III-V Lab dispose déjà de modulateurs fonctionnant à des débits de 20 Gbit/s et de RSOA capables d'effacer ces mêmes débits. Avant d'envisager une conception et une fabrication spécifique, nous avons établi la preuve de concept avec des composants séparés. Il fallut les relier par de la fibre optique, rompant les conditions sur la polarisation. Le bruit apporté par l'état de polarisation aléatoire du signal limita la transmission à 2,5 Gbit/s.

A l'issue de cette thèse, les cavités auto-alimentées restent prometteuses mais ne confirment pas la rupture qu'elles laissaient espérer. Les verrous sont encore présents. Cette thèse donne des clefs pour les dépasser, mais ces optimisations nécessitent un temps de développement et de fabrication non compatible avec la course à la source haut-débit et bas coût que le standard NG-PON2 a lancée.

Les contributions majeures de cette thèse portent sur :

- la compréhension physique du RSOA, soulignant ses singularités ;
- la mise en évidence de réflexions parasites et leur origine dans le processus de fabrication ;
- des propositions à moyen terme pour des solutions achromatiques bas coût ;
- la valorisation du RSOA au travers d'applications variées.

Les perspectives autour du RSOA et des cavités auto-alimentées sont encore innombrables, seule leur pertinence vis-à-vis d'applications industrielles jugera de leur concrétisation ou non.

Concernant les cavités avec Fabry-Pérot, citons l'implémentation du code Manchester, plus robuste au bruit de partition modale.

Dans les configurations avec RSOA, deux solutions sont possibles : soit on augmente la distance de transmission des RSOA bande C, soit on augmente le débit des RSOA bande O. Pour la première solution, une idée pourrait être de remplacer son miroir par une FBG d'ISL similaire à celui de l'AWG mais de largeur étroite qui effacerait les données et rendrait le spectre de la cavité plus fin et donc moins sensible à la dispersion chromatique. On pourrait alors y placer les RSOA de référence à la bande passante élevée. Pour la seconde solution, les RSOA bande O bi-électrode (disponibles mais non testés) pourraient avoir une bande passante supérieure au RSOA mono-électrode en modulant à l'entrée/sortie du composant où l'émission stimulée domine.

Une autre piste est celle des RSOA-EAM dont l'intégration permettrait des transmissions à 20 Gbit/s. L'intégration étant justement le point nécessitant un développement particulier. En effet, le RSOA à fort confinement est très fortement divergent. Il faut donc concevoir une transition entre deux modes de tailles très différentes.

A notre sens, les optimisations du RSOA lui-même concernent le confinement des porteurs (en particulier l'influence des barrières) et la préparation de la plaque avant enterrement dans le cas des RSOA aluminium.

Les spécificités du RSOA ne sont encore qu'hypothèse. Des caractérisations supplémentaires sont toujours souhaitables (C(V), analyse des matériaux post-fabrication...). Le développement d'un modèle exhaustif relié aux observations expérimentales et adapté à la forte variabilité de nos RSOA serait un avantage non négligeable.

ANNEXE A

MODELISATION DU RSOA

Nous avons ébauché un premier modèle statique de RSOA basé sur celui de Connelly (chapitre 3). Rappelons ici les équations d'état :

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} = & \frac{I}{qV} - (A_{SHR}n + B_{rad}n^2 + C_{Aug}n^3 + D_{leak}n^{5,5}) \\ & - v_g g_{milieu}(\lambda_{signal}, n) (s_{signal}^+(z) + s_{signal}^-(z)) \\ & - v_g \sum_{j=1 \dots N_{ASE} \text{ section}} g_{milieu}(\lambda_j, n) (s_{ASE,j}^+(z) + s_{ASE,j}^-(z)) \quad (\text{éq. 3.19}) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial s_{signal}^+(z)}{\partial z} = g_{milieu}(\lambda_{signal}, n) s_{signal}^+(z) \quad (\text{éq. 3.20})$$

$$\frac{\partial s_{ASE}^+(z)}{\partial z} = \sum_{j=1 \dots N_{ASE} \text{ section}} \left(g_{milieu}(\lambda_j, n) s_{ASE,j}^+(z) \right) + \frac{\beta}{2} R_{sp}(n) \quad (\text{éq. 3.21})$$

Au vu de nos applications, on considère un seul signal incident λ_s . Pour tenir compte de l'inhomogénéité spatiale, la longueur du composant est discrétisée en M sections. La densité de porteur y est uniforme ($n_m(m\Delta z) = n_m((m+1)\Delta z)$) sur la section, les densités de photons (ASE ou du signal) sont continues aux interfaces $s_{ASE \text{ ou } sign, m}^+(m+1)\Delta z = s_{ASE \text{ ou } sign, m+1}^+(m+1)\Delta z$. On regarde communément le signal à la facette génériquement appelée d'entrée/sortie (côté R_{min}). Cependant de plus en plus d'applications utilisent aussi le signal en sortie du miroir (R_{max}), que l'on pourra donc également observer. On s'intéresse particulièrement à l'ASE du RSOA. Sur la figure A1.1, nous avons défini la puissance d'ASE pour une longueur d'onde, $P_{ASE}(\lambda)$. Plus précisément, $P_{ASE}(\lambda)$ est la moyenne de la densité spectrale du bruit d'émission spontanée sur la bande de fréquences centrée sur λ et correspondant à la résolution de l'analyseur de spectre optique (typiquement 0,2 nm).

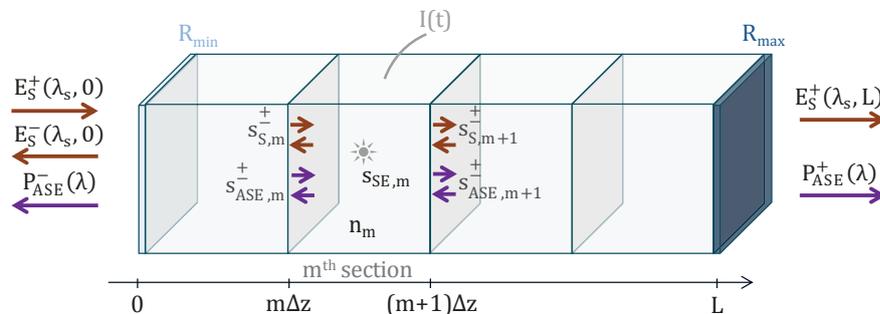


Figure A1.1- Définitions des grandeurs associées à l'algorithme (selon Connelly).

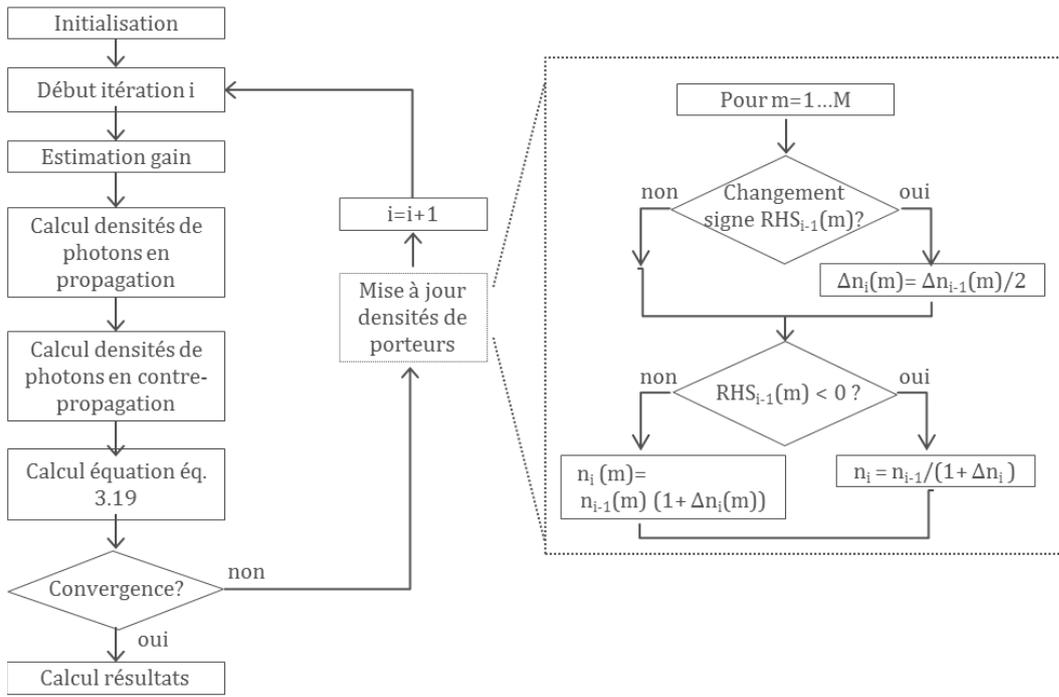


Figure A1.2- Algorithme implémenté (selon Connelly).

Notre algorithme reprend la logique générale de celle développée par Connelly. Une boucle itère jusqu'à ce que la convergence soit atteinte. Dans l'absolue, à l'état stationnaire, la partie droite de l'équation 3.19 (RHS, *Right Hand Side*) est nulle. En pratique, nous avons considéré que la convergence était atteinte lorsque RHS tendait "suffisamment" vers zéro. Pour évaluer ce "suffisamment", nous avons mis en perspective notre paramètre d'erreur contenant RHS (défini en équation A1.1) avec la convergence de la puissance de sortie (figure A1.3). En effectuant un grand nombre d'itérations, nous avons déterminé la valeur $P_{conv,f}$ vers laquelle la puissance converge et imposé l'écart maximal acceptable ΔP_{max} où $\Delta P = |P_{conv} - P_{conv,f}| / P_{conv,f}$. On prend ΔP_{max} de l'ordre de grandeur de la précision d'un puissance-mètre. Les convergences de notre paramètre d'erreur et de la puissance sont semblables. A partir d'un calibrage initial, on peut donc déterminer, a priori, l'erreur ξ_{max} donnant ΔP_{max} . ξ_{max} est notre paramètre de convergence.

$$\xi = \frac{RHS}{I} \frac{1}{qV} \quad (\text{éq. A1.1})$$

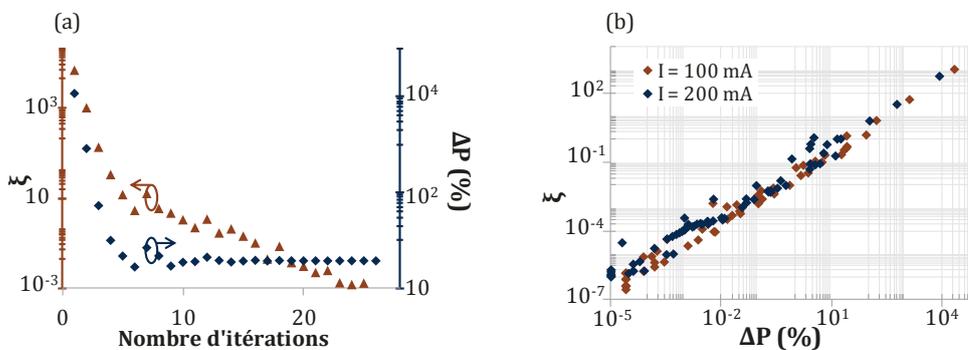


Figure A1.3- Critère de convergence.

La plupart des modèles sont validés via une comparaison avec la courbe de gain. Nous avons préféré utiliser la courbe $P(I)$ en linéaire et plus fréquemment en échelle logarithmique. Il s'agit d'une grandeur plus facilement mesurable. Elle est l'image du gain et il n'y a pas de pertes d'informations quant au comportement du RSOA. A l'aide de ces comparaisons, nous avons fixé les valeurs des paramètres de simulations par un compromis entre le nombre d'itérations nécessaires à atteindre une valeur satisfaisante et l'erreur entre cette valeur et celle obtenue avec un nombre d'itérations plus grand. Par exemple, au-delà de 10 sections les courbes de puissance se superposent tandis que le nombre d'itérations augmente fortement. On se limitera donc à $M=10$. Il est aussi intéressant de remarquer que le pas d'ajustement Δn_i et la densité initiale de porteurs, choisie arbitrairement, n'influencent pas le résultat final.

Les calculs exposés reposent sur la connaissance d'un certain nombre de paramètres. Effectuant la conception, la fabrication et l'épithaxie de nos propres composants, il est aisé de connaître les valeurs de confinement optique, d'indices effectifs et de groupe ainsi que les dimensions géométriques du composant. Les autres groupes, spécialisés plus sur la modélisation que sur le composant lui-même ne disposent pas de la même proximité avec les paramètres matériau. Par exemple, les longueurs de RSOA varient entre 300 μm [1] et 600 μm [2]. Or, à ces longueurs, les effets d'inhomogénéité spatiale restent modérés. Les longueurs de 1 mm, plus enclines à ce type de comportement ont été peu étudiées. Il en est de même avec les valeurs de confinement optique, plus adaptées à des structures *bulk* que MQW. Ces deux paramètres contribuent au comportement typique d'un RSOA et l'interprétation des résultats publiés devra en tenir compte.

Outre ces paramètres facilement appréciables, d'autres sont plus difficiles à appréhender. Il s'agit des coefficients A_{SHR} , B_{rad} et C_{Aug} d'une part et de la suppression non linéaire du gain et des pertes internes d'autre part. Le tableau A1.1 montre la grande variabilité des valeurs choisies dans la littérature. N'étant pas directement mesurables, ils font l'objet d'approximations ou servent de variables d'ajustement pour faire correspondre simulations et mesures.

GRANDEUR	UNITE	VALEURS EXTREMES	VALEUR MOYENNE
A_{SHR}	s^{-1}	10^6 [3] à 10^9 [4]	$\sim 10^8$
B_{rad}	m^3s^{-1}	(0,25 [5] à 8,5 [4]). 10^{-16}	$\sim 10^{-16}$
C_{Auger}	m^6s^{-1}	(2 [6] à 975[7]). 10^{-41}	$\sim 10^{-41}$
α_{int}	m^{-1}	400 [7] à 7000 [8]	
ϵ	m^3	(0,3 [7] à 11 [9]). 10^{-23}	$\sim 10^{-23}$

Table A1.1- Principales grandeurs approchées du modèle RSOA.

Un dernier élément rarement considéré est l'intégration d'un *taper* ou convertisseur de mode dans la géométrie du composant. Lors de nos mesures, nous avons néanmoins remarqué la contribution non négligeable de celui-ci. Seul Connelly [10] a intégré un convertisseur "simple" consistant à réduire linéairement la dimension du guide actif. Pour inclure les particularités de nos *tapers*, nous avons légèrement modifié notre code initial, en définissant un second guide. Les variations spatiales sont connues et celles du confinement et de l'indice optique sont extraites des simulations *Fimmwave*.

[1] Y. Boucher and A. Sharaiha, "Spectral properties of amplified spontaneous emission in semiconductor optical amplifiers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 36, no. 6, pp. 708-720, June 2000. doi: 10.1109/3.845728

[2] M. J. Connelly, "Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 3, pp. 439-447, Mar 2001. doi: 10.1109/3.910455

- [3] C. Antonelli, A. Mecozzi, W. Li and L. A. Coldren, "Efficient and Accurate Modeling of Multiwavelength Propagation in SOAs: A Generalized Coupled-Mode Approach," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 9, pp. 2188-2197, May1, 1 2016. doi: 10.1109/JLT.2016.2519240
- [4] P. P. Baveja, D. N. Maywar, A. M. Kaplan and G. P. Agrawal, "Self-Phase Modulation in Semiconductor Optical Amplifiers: Impact of Amplified Spontaneous Emission," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 46, no. 9, pp. 1396-1403, Sept. 2010. doi: 10.1109/JQE.2010.2048743
- [5] L. Occhi, L. Schares and G. Guekos, "Phase modeling based on the α -factor in bulk semiconductor optical amplifiers," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 788-797, May-June 2003. doi: 10.1109/JSTQE.2003.818346
- [6] W. Mathlouthi, P. Lemieux, M. Salsi, A. Vannucci, A. Bononi and L. A. Rusch, "Fast and Efficient Dynamic WDM Semiconductor Optical Amplifier Model," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 11, pp. 4353-4365, Nov. 2006. doi: 10.1109/JLT.2006.884217
- [7] P. Morel and A. Sharaiha, "Wideband Time-Domain Transfer Matrix Model Equivalent Circuit for Short Pulse Propagation in Semiconductor Optical Amplifiers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 45, no. 2, pp. 103-116, Feb. 2009. doi: 10.1109/JQE.2008.2001935
- [8] G. Giuliani and D. D'Alessandro, "Noise analysis of conventional and gain-clamped semiconductor optical amplifiers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 9, pp. 1256-1263, Sept. 2000. doi: 10.1109/50.871703
- [9] Z. Liu, M. Sadeghi, G. de Valicourt, R. Brenot and M. Violas, "Experimental Validation of a Reflective Semiconductor Optical Amplifier Model Used as a Modulator in Radio Over Fiber Systems," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 9, pp. 576-578, May1, 2011. doi: 10.1109/LPT.2011.2117414
- [10] M. J. Connelly, "Wideband dynamic numerical model of a tapered buried ridge stripe semiconductor optical amplifier gate," in *IEE Proceedings - Circuits, Devices and Systems*, vol. 149, no. 3, pp. 173-178, 2002. doi: 10.1049/ip-cds:20020323

ANNEXE B

MESURE D'EMISSION SPONTANEE SIMPLIFIEE

La mesure de l'émission spontanée est une méthode de caractérisation expérimentale qui apporte de précieuses informations à la fois, sur le comportement matériau du semiconducteur et sur celui de la propagation de l'onde le long du ruban. Elle fut mise en place dès les premiers lasers, dans les années 1970 et n'a cessé d'être reprise [1]. Depuis la fin des années 1990, l'EPFL (en collaboration avec Alcatel Alsthom Research) a acquis une connaissance fine de cette méthode appliquée aux SOA [2]. A l'EPFL comme à Tyndall [3], un autre groupe ayant travaillé sur le sujet, la mesure est destructive: une fenêtre est gravée le long du ruban afin d'accéder plus précisément à la zone émettrice. De plus la méthode d'acquisition est relativement complexe.

Nous avons adopté une méthode plus souple et non destructive, quoique moins précise, afin de dégager le comportement du composant d'un point de vue semi-quantitatif. Elle consiste à récolter, à l'aide d'une fibre, l'émission spontanée sur la tranche et non au-dessus ou en dessous du ruban (figure A2.1 et A2.2). Les composants sont clivés proche du ruban pour limiter les pertes au travers de l'InP. La résolution spatiale ainsi que la précision du positionnement de de la fibre sont limités par son diamètre, ce qui est suffisant pour nos besoins.

Les mesures typiques réalisées sont des mesures spectrales et de puissance en fonction du courant. Les mesures spectrales nécessitent une résolution de 1 nm et un moyennage sur plusieurs courbes afin de supprimer le bruit de mesures, inhérents à de telles puissances (inférieures à -50 dBm). Les mesures P(I) n'exigent pas de réglage particulier. En un point donné, si le couplage est optimal et stable dans le temps, les mesures sont comparables. Dans le cas contraire, il faut appliquer une normalisation en tenant compte du facteur d'efficacité de collecte. Une autre manière est de faire l'hypothèse, réaliste, que la puissance mesurée est uniforme tout le long du ruban pour de très faibles courants (de 1 à 4 mA).

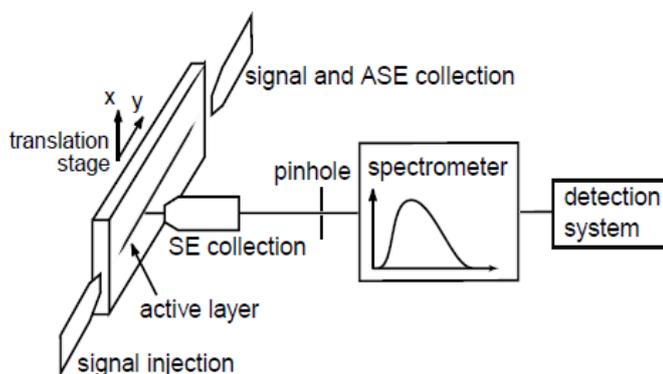


Figure A2.1- Mesure d'émission spontanée développée par l'EPFL [d'après Fehr-OAA99].

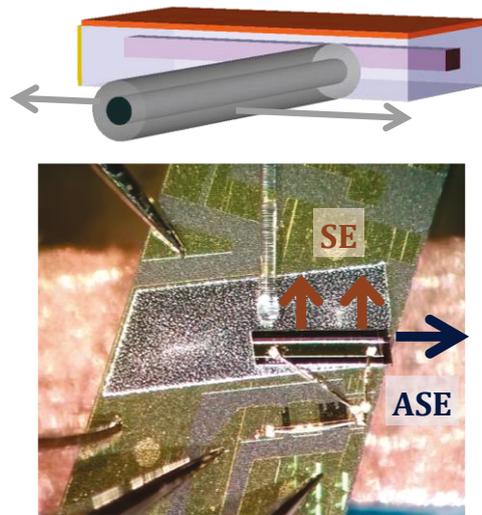


Figure A2.2- Mesure d'émission spontanée au III-V Lab.

[1] F. Girardin and Guang-Hua Duan, "Characterization of semiconductor lasers by spontaneous emission measurements," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 461-470, Apr 1997. doi: 10.1109/2944.605694

[2] J. - Fehr, J. L. Pleumeekers, T. P. Hessler, P. E. Selmann, M. -. Dupertuis, B. Deveaud, J. -. Emery, F. Dorgeuille, F. Pommereau, and B. Dagens, "Observation of longitudinal spatial hole burning and carrier heating in semiconductor optical amplifiers with injection," in *Optical Amplifiers and their Applications*, S. Kinoshita, J. Livas, and G. van den Hoven, eds., Vol. 30 of Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America, 1999), paper ThD13.

[3] Experimental Study of Quantum Dot and Dash Lasers Susannah C. Heck, PhD Thesis, 2009

ANNEXE C

EVALUATION D'UN RSOA SIBH

L'enterrement des rubans avec un matériau semi-isolant est une brique technologique stratégique. Maîtrisée par les laboratoires japonais et coréens, elle n'a été développée quelques années plus tard au III-V Lab. Le chapitre 2 donne quelques détails supplémentaires, et dans le chapitre 3 nous évoquons l'évaluation de ce choix pour le RSOA. Cette annexe présente des caractéristiques plus complètes.

Le seuil RSOA à 20°C est de l'ordre de 20 mA ce qui caractérise à la fois une bonne qualité de matériau et une bonne conception. La largeur du spectre à mi-hauteur est d'une trentaine de nanomètres. En revanche la tenue en température n'est pas meilleure que dans un BRS. Le seuil et la puissance se dégradent fortement. Par exemple, à 100 mA, on perd une quinzaine de dB entre 12°C et 50°C.

De même, le RSOA SIBH est limité à 2,5 Gbit/s et l'ouverture de son œil diminue avec l'augmentation de la température.

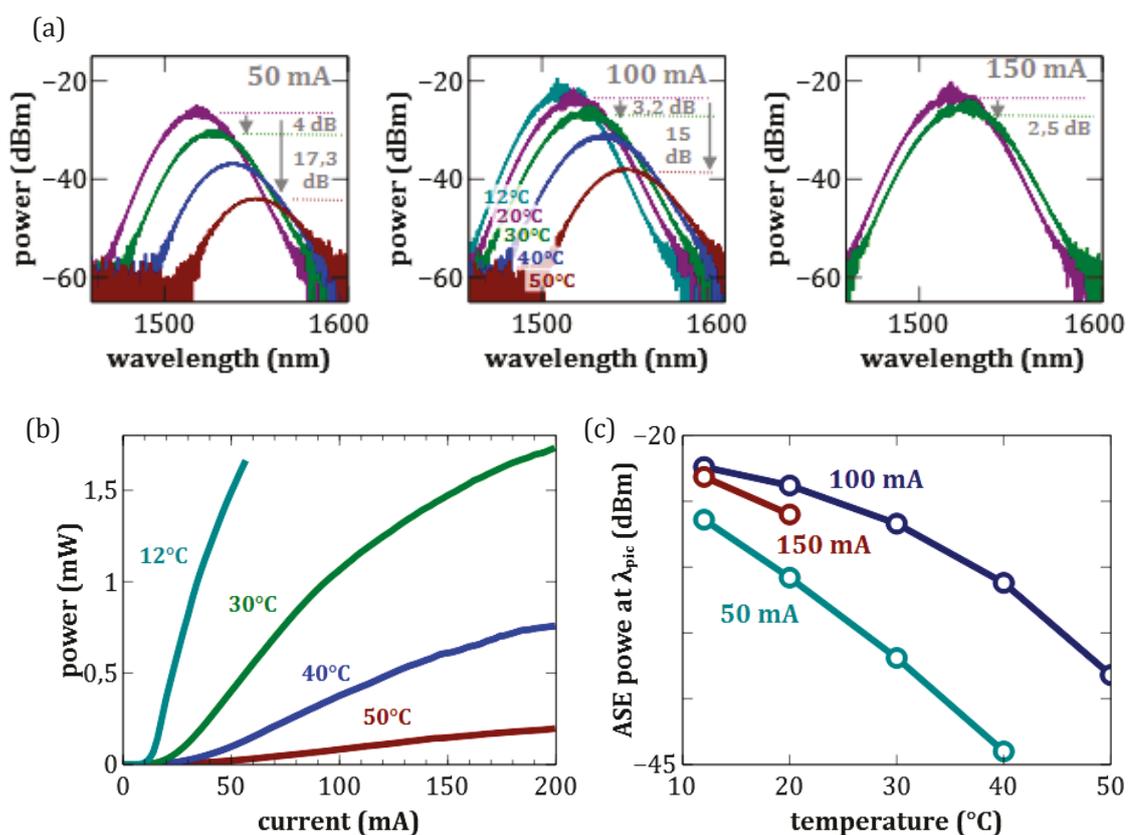


Figure C.1- Caractéristiques statiques d'un RSOA SIBH pour des températures variant de 12 à 50°C : (a) spectres en fonction du courant dans le RSOA, (b) puissance en fonction du courant, (c) puissance totale mesurée pour différents courants.

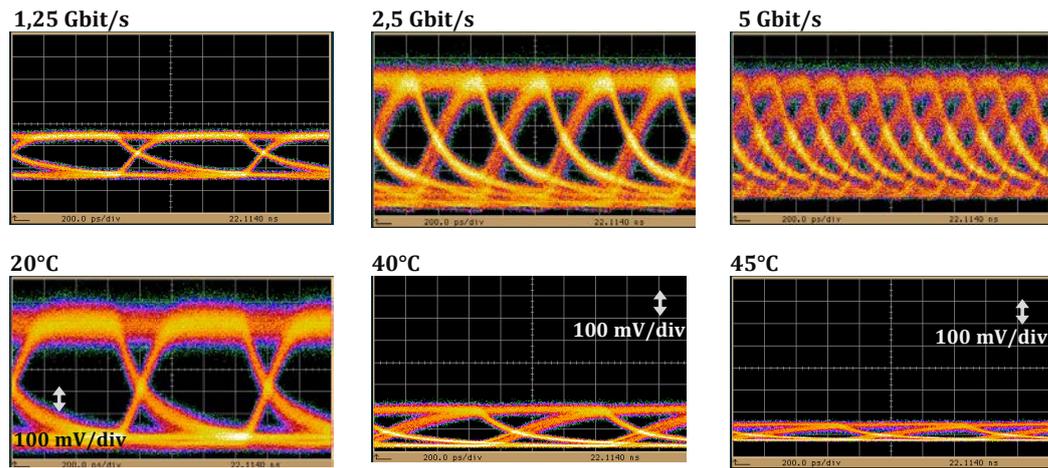


Figure C.2- Diagramme de l'œil d'un RSOA SIBH pour différents débits à 20°C et pour des températures de 20 à 45°C à 1,25 Gbit/s.

Nous rappelons que ces RSOA n'étaient pas optimisés pour nos applications. Nous en concluons donc que l'influence de la structure prime, les différents choix technologiques n'ont qu'une influence secondaire.

ANNEXE D

CONCEPTION ET FABRICATION DE RESEAUX DIRECTEMENT GRAVES DANS LE RUBAN

La réalisation des réseaux est une étape largement pratiquée, principalement pour les lasers monomodes. Un réseau est une succession de dents en quaternaire d'indice similaire à celui des couches de confinement avec un milieu d'indice plus faible (ternaire InP). Le mode optique se réfléchit partiellement à chaque dent ce qui crée une condition de phase et donc une condition sur la longueur d'onde qui se propage. Dans la pratique, les étapes du réseau se déroulent avant la gravure du ruban. Elles impliquent une reprise épitaxiale intermédiaire, une écriture *ebeam* (dimension d'une centaine de nanomètres) et une gravure (lettres A à G, figure 2.5). Les dimensions (largeur, longueur et profondeur) des dents sont des paramètres clés puisqu'ils contribuent à l'indice effectif du mode et à la force du réseau (sa capacité à réfléchir le signal incident). Il est ainsi possible de jouer sur la forme de ces dents selon les fonctionnalités visées [1].

Les réseaux que nous avons introduits sont principalement utilisés dans des DFB SOA et les DFB simples. Ces DFB ont été implémentés, principalement pour apporter un élément supplémentaire dans l'évaluation de nos matériaux. Ils nous serviront aussi à extraire des informations sur les indices optiques des quaternaires.

Conception des réseaux directement gravés

Les DFB SOA s'adressent aux architectures de réseaux d'accès alternatives aux cavités étendues et étudiées dans le cadre du projet européen COCONUT. Placés chez l'utilisateur, le DFB SOA aurait pour rôle de fournir le signal remontant (sortie SOA, en régime de modulation de phase ou d'amplitude) mais aussi de servir d'oscillateur local pour la détection cohérente du signal descendant (sortie DFB). Le principe d'intégrer un amplificateur à un laser directement modulé n'est pas nouveau. Néanmoins les réseaux sont généralement réalisés dans une couche épitaxiale dédiée (figure D.1) ou sur les bords du ruban actif. Ces procédés demandent des croissances épitaxiales et des gravures spécifiques ce qui représente un coût. Nous avons donc réalisé des réseaux gravés dans et en même temps que le ruban (figure D.2), ce qui permettrait l'intégration d'un laser au SOA sans étape supplémentaire.

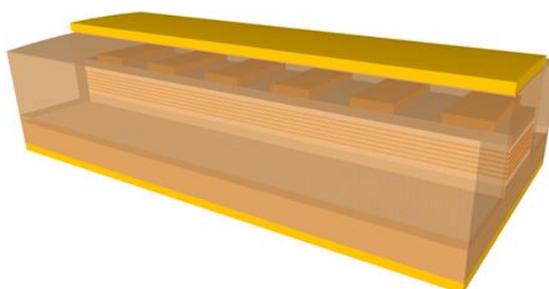


Figure D.1- Exemple de réseaux pour laser à contre-réaction répartie.

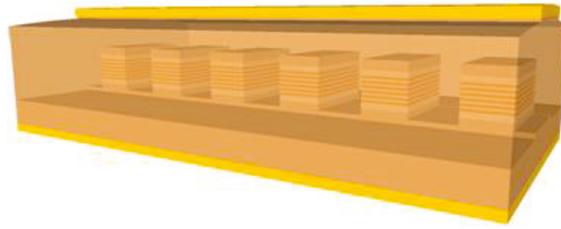


Figure D.2- Réseaux gravés directement dans le ruban actif.

Du point de vue de la conception, ce nouveau procédé impose plusieurs conditions. En effet, les dents fournissent à la fois le gain du laser et le contraste d'indice complexe. Le gain modal se retrouve diminué par les pertes dans l'InP (entre deux dents). Le second paramètre important dans un laser à contre-réaction répartie est la force de son réseau par unité de longueur ou la proportion de signal réfléchi par chaque dent, notée κ . Il dépend, entre autres, de la profondeur de gravure, de l'épaisseur du guide, de l'ordre du réseau, des indices effectifs de chaque milieu ou encore de la longueur d'onde [2-4]. Des expressions approchées existent néanmoins dans la littérature [5, 6], elles reposent sur la différence d'indice effectif entre les deux milieux et sur la longueur d'onde. Le produit de la force de couplage de chaque dent par la longueur du réseau donne la force du réseau de la cavité, elle est notée κL . Le plus souvent, on cherche à la minimiser ($\kappa L \sim 1$ à 2) de manière à distribuer uniformément les photons et les porteurs. L'épaisseur du ruban actif et les indices effectifs sont fixés par la conception de nos RSOA, la profondeur de la gravure est le seul degré de liberté restant. Remarquons qu'une profondeur faible implique de s'arrêter dans les puits quantiques.

Dans nos conceptions, nous avons varié les longueurs, L , et les coefficients de couplage, κ , sur les lasers DFB simples. Dans les DFB SOA, nous avons fixé la longueur du laser à $250 \mu\text{m}$. Compte-tenu des incertitudes sur les indices et le décalage pic de gain / pic de photoluminescence, nous avons aussi testé plusieurs pas de réseau et plusieurs longueurs d'onde.

Gravure des réseaux dans le ruban actif

Dans le lot 2 (table D.1), les DFB d'ordre 1 n'ont pas ou peu fonctionné. Une analyse MEB indique une gravure partielle du ruban actif (figure D.3) et des cotes approximatives. Puisque les contraintes de fabrication sont imposées par le procédé du RSOA, nous avons joué sur la conception des réseaux. A paramètres identiques, la profondeur de gravure sera plus faible pour les petits taux d'ouverture comme c'est le cas dans un DFB d'ordre 1. Pour avoir plus de souplesse, des DFB d'ordres 3 et 5 ont été ajoutés. Le ratio largeur de la dent / pas du réseau fut ajusté pour limiter les pertes dans l'InP tout en garantissant une ouverture suffisante. Les ordres de grandeur sont donnés dans le tableau D.1.

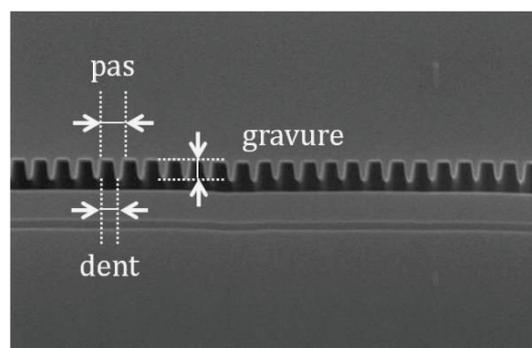


Figure D.3- Réseaux DFB du lot 2.

ORDRE	1	3	5
PAS	200 à 215 nm	615 à 645 nm	1020 à 1075 nm
OUVERTURE	50 %	40 %	20 %

Table D.1- Dimensions des DFB du lot 3.

Mesurée au MEB, la gravure des réseaux est de 1 μm environ. Les pieds des DFB d'ordre 3 et 5 apparaissent bien ouverts contrairement au DFB d'ordre 1. La gravure y apparaît nette sur 500 nm seulement, ce qui reste satisfaisant (figure D.4). Le suivi à l'AFM (figure D.5) des dimensions du pas et de la dent après chaque étape indique pour certains cas des écarts. Nous les expliquons par des effets de proximité lors de l'insolation de la résine électrosensible. Des électrons sont rétrodiffusés ce qui insole la zone voisine et agrandit la dimension initiale. Pour des applications où la longueur d'onde doit être strictement contrôlée, ce phénomène est contourné en n'écrivant qu'un pixel sur deux. Dans notre cas, nous tiendrons simplement compte de ces écarts dans nos rétro-simulations.

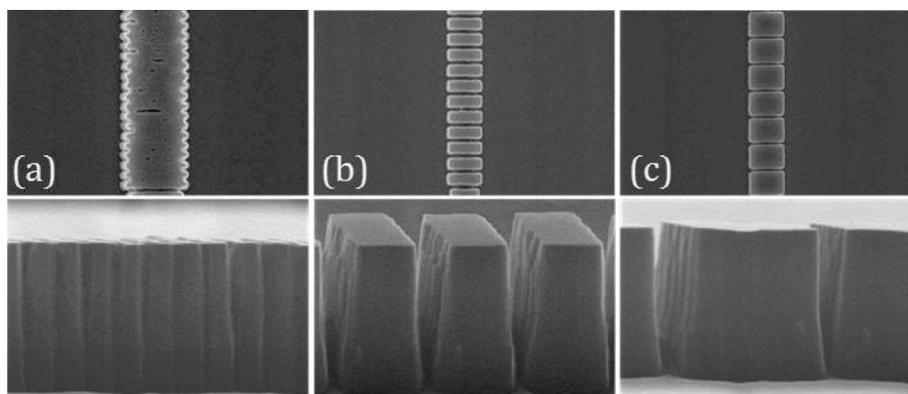
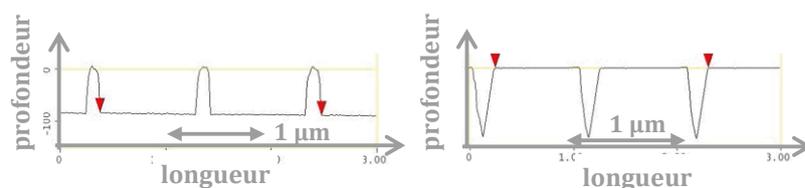


Figure D.4- Réseaux après deux gravures du ruban et retrait du masque, (a) ordre 1, (b) ordre 3, (c) ordre 5.

Figure D.5- Mesure d'un réseau d'ordre 5 après écriture *ebeam* (a) et après gravure (b).

- [1] A. Accard, O. Drisse, B. Dagens, H. Sillard, "Optoelectronic component comprising a diffraction grating with a transverse structure", EP 1936412A1, 25 juin 2008
- [2] H. Kogelnik, E. Ippen, A. Dienes and C. Shank, "Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 373-379, Mar 1972. doi: 10.1109/JQE.1972.1076964
- [3] A. Yariv, T. Nussmeier and J. Kiefer, "Frequency response of intracavity laser coupling modulation," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 9, no. 6, pp. 594-597, Jun 1973. doi: 10.1109/JQE.1973.1077555
- [4] W. Streifer, D. Scifres and R. Burnham, "Coupling coefficients for distributed feedback single- and double-heterostructure diode lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 11, no. 11, pp. 867-873, Nov 1975. doi: 10.1109/JQE.1975.1068539
- [5] G. P Agrawal, N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, 2nd Edition, Kluwer academic publisher 1993
- [6] L. A. Coldren, S. W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits", John Wiley & Sons, 1995

ANNEXE E

DFB SOA DOUBLE SORTIE POUR RESEAU COHERENT UDWDM PON

De manière plus générale que les RSOA, le III-V Lab (et Nokia Bell Labs) est impliqué dans la recherche des solutions pour les réseaux d'accès. Notamment au travers du projet européen COCONUT pour les réseaux multiplexés en longueur d'onde ultra-dense, d'espacement entre canal de 6,25 à 12,5 GHz. Le but de ce projet est d'augmenter la portée et le nombre d'utilisateurs avec de forts budgets optiques.

Diverses solutions basées sur des RSOA, des EML et des DML ont été explorées. La démonstration finale s'est faite à l'aide des DFB-SOA réalisés pendant cette thèse. La sortie SOA est utilisée pour la transmission du signal remontant tandis que la sortie DFB sert d'oscillateur local pour la détection cohérente du signal descendant (figure D.1). La modulation du signal remontant est appliquée sur le SOA. La fréquence radio-fréquence est appliquée sur le DFB.

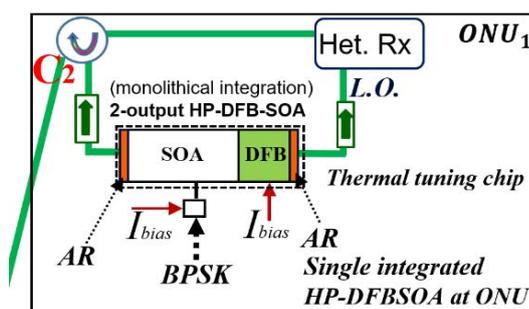


Figure D.1- Rôle du DFB-SOA dans l'architecture COCONUT [1].

Dans ce composant, les réseaux sont gravés dans la couche active, en même temps que la gravure du ruban. Leur présence est donc transparente pour la fabrication du RSOA et le coût de fabrication reste limité. En raison d'incertitudes sur la fabrication des réseaux d'ordre 1 (cf chapitre 2), nous avons choisi d'implémenter un réseau ordre 3. La longueur du DFB est de 250 μm , celle du SOA de 500 μm et la longueur totale comprenant les deux adaptateurs de mode est de 1 mm. Les facettes sont traitées anti-reflets. Pour permettre de la modulation haute fréquence sur les deux sections, une piste adaptée a été rajoutée (figure D.2). Enfin, la structure choisie fut celle de la plaque aluminium bande C.

La bande passante du soa est de 2,2 GHz, améliorée par l'injection du signal DFB qui réduit le temps de vie des porteurs. Le seuil est d'une trentaine de milliampères et la réjection du mode secondaire supérieure à 45 dB (figure D.3).

Lors de la démonstration finale du projet COCONUT [1], le SOA fut modulé à 2,5 Gbit/s au format BPSK. Après 10 km de transmission dans une boucle dans Pise, la pénalité est de 3,2 dB.

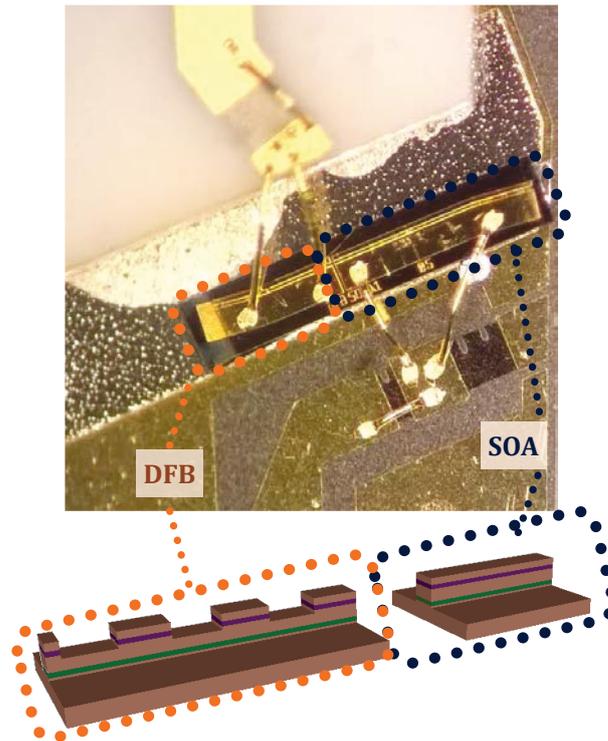


Figure D.2- Photo et schéma du DFB-SOA.

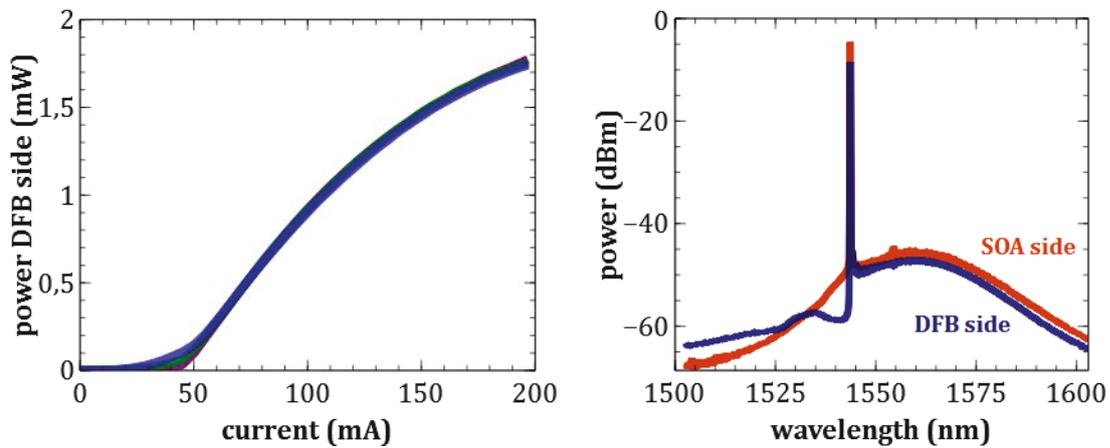


Figure D.3- Caractéristiques statiques du DFB-SOA.

- [1] GuangYong Chu, Anaëlle Maho, Iván Cano, Victor Polo, Romain Brenot, Hélène Debrégeas, and Josep Prat, "First demonstration and field trial on multi-user UDWDM-PON full duplex PSK-PSK with single monolithic integrated dual-output-DFB-SOA based ONUs," *Opt. Lett.* 41, 4696-4699 (2016)

ANNEXE F

RSOA POUR CAVITES EXTERNES CONTINUES

Dans les cavités auto-alimentées, le RSOA est directement modulé. Il existe cependant d'autres applications de cavités externes où il fonctionne en continu. Dans la plupart de ces configurations, le RSOA est utilisé pour former un laser accordable large bande et bas-coût. Pour former un laser continu, les configurations Littrow et Litman peuvent s'adapter. Il s'agit de réseaux externes couplés par optique en espace libre [1].

Les applications modulées pour les réseaux métropolitains connaissent un fort intérêt. Le RSOA, source de gain, y est placé bout-à-bout avec une cavité externe. Deux approches se développent en parallèle, l'une basée sur une cavité en silice [2], l'autre sur une cavité en silicium [3] à laquelle nous avons contribué.

La valeur ajoutée de cette solution se trouve plus dans les fonctions assurées par la cavité externe que par le RSOA. Celui-ci doit fournir un fort et large gain afin de réduire le seuil (et donc la consommation). Une attention particulière doit être néanmoins apportée au couplage afin de réduire les pertes.

De plus, nous avons adapté notre design afin d'ouvrir plus de possibilités lors de l'intégration. Dans la figure E.1, la facette traitée anti-reflets est couplée à la cavité et le signal total est récupéré à la facette dite miroir du RSOA. Nous y avons placé un adaptateur de mode afin d'obtenir plus de puissance. Plusieurs valeurs de réflectivités miroir ont aussi été proposées. Cette configuration est destinée aux transmissions en mode paquets. La bascule en longueur d'onde est de l'ordre de la nanoseconde grâce à deux cavités parallèles sélectionnées via un atténuateur optique intégré.

Un autre design alternatif basé sur un RSOA à deux branches pourrait aussi être employé (figure E.2).

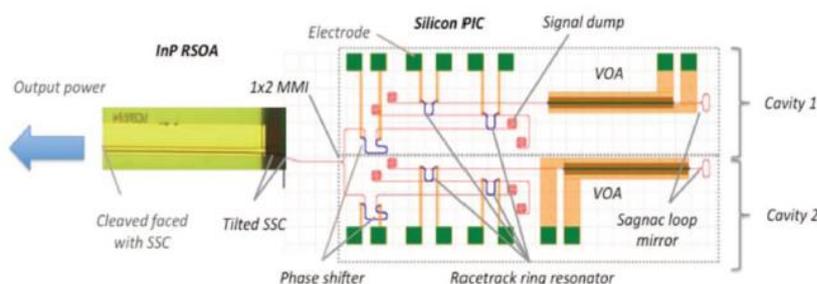


Figure E.1- Cavité silicium et RSOA mis bout-à-bout avec sortie du signal à la facette miroir [4].

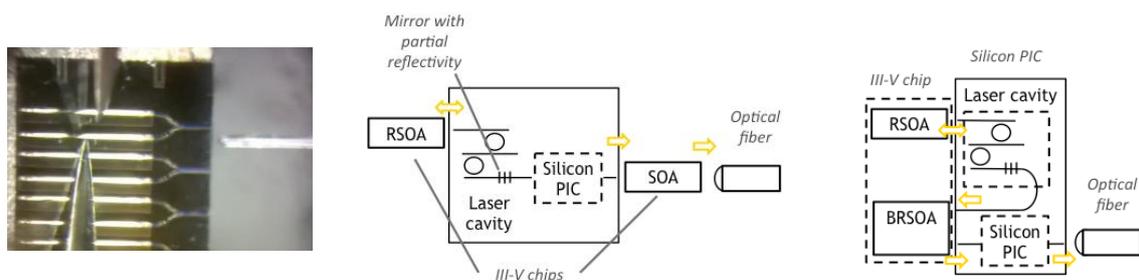


Figure E.2- RSOA à deux branches et applications (d'après [5]).

En intégrant un laser de réflectivité variable (figure E.3 (a)), les équipes de Bell Labs aux Etats-Unis réussirent des transmissions jusqu'à 40 Gbit/s et jusqu'à 20 km à 25 Gbit/s au format simple OOK avec 28 nm d'accordabilité [6]. Une intégration plus poussée (figure E.3 (b)) permit de monter à 80 Gbit/s et 100 km via une modulation PDM-QPSK et du traitement du signal avancé à la réception [7].

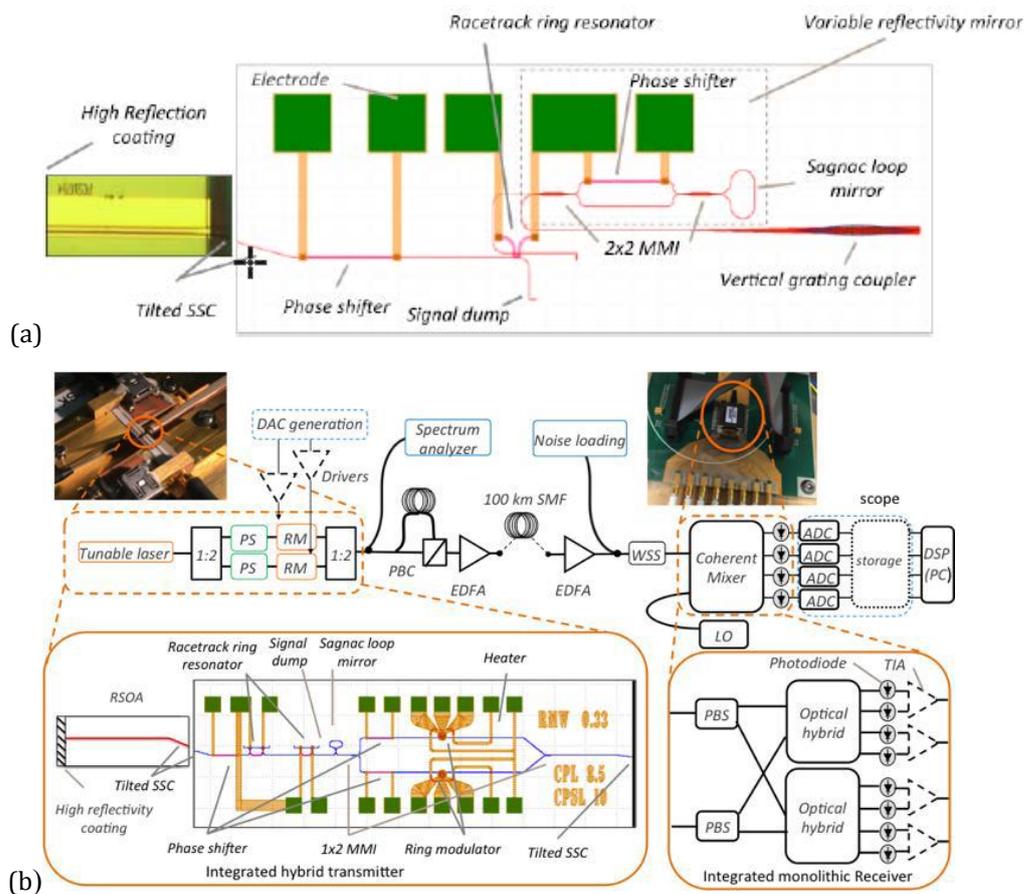


Figure E.3- Valorisation des RSOA dans des émetteurs accordables intégrés hybrides [6, 7].

- [1] Extended range tuning elements for a microelectromechanical systems external cavity laser, R R A Syms and A Lohmann and W Huang, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 1464-4258
- [2] H. Debregeas *et al.*, "2kHz Linewidth C-Band Tunable Laser by Hybrid Integration of Reflective SOA and SiO₂ PLC External Cavity," *2014 International Semiconductor Laser Conference*, Palma de Mallorca, 2014, pp. 50-51. doi: 10.1109/ISLC.2014.158
- [3] G. de Valicourt, C-M. Chang, M. Eggleston, A. Melikyan, C. Bolle, N. Kaneda, Y. K. Chen, S. Chandrasekhar, A. Maho, R. Brenot and P. Dong, "Hybrid integrated wavelength and reflectivity tunable III-V/Silicon transmitter," *J. Lightwave Technol.*, to be published
- [4] G. de Valicourt, j. simsarian, A. Maho, R. Brenot, c. chang, K. Kim, a. Melikyan, P. Dong, and Y. Chen, "Dual Hybrid Silicon-Photonic Laser with Fast Wavelength Tuning," in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper M2C.1.
- [5] G. de Valicourt, A. Maho, A. Le liepvre, R. Brenot, A. Velázquez and Y. K. Chen, "Novel bidirectional reflective semiconductor optical amplifier," *2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)*, Niigata, Japan, 2016, pp. 1-3
- [6] Guilhem de Valicourt, Chia-Ming Chang, Young-Kai Chen and Sethumadhavan Chandrasekhar Anaelle Maho; Romain Brenot; Po Dong, "10-40 Gbit/s Hybrid III-V/Si wavelength-tunable transmitter for short- and long-reach communications," *ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication*, Dusseldorf, Germany, 2016, pp. 1-3.
- [7] G. de Valicourt, M. S. Eggleston, C. Zhu, J. Lee, C. M. Chang, J. Sinsky, K.W. Kim, Y. K. Chen, A. Maho, R. Brenot and P. Dong "80Gb/s PDM-QPSK PIC-to-PIC Experiment based on Fully Integrated Hybrid Silicon-based Wavelength-tunable Transmitter and Monolithic Coherent Receiver", *OFC 2017*, accepted to be published

VALORISATION SCIENTIFIQUE

Journaux à comité de lecture

- (1) **Anaëlle Maho**, Gaël Simon, Sophie Barbet, François Lelarge, Fabienne Saliou, Philippe Chanclou, Paola Parolari, Lucia Marazzi, Marco Brunero, Mario Martinelli, Simon Arega Grebewold, Juerg J. Lightwave Technol. Leuthold, and Romain Brenot, "Demystification of the Self-Seeded WDM Access," *J. Lightwave Technol.* 34, 776-782 (2016)
- (2) Guang Yong Chu, **Anaëlle Maho**, Iván Cano, Victor Polo, Romain Brenot, Hélène Debrégeas, and Josep Prat, "First demonstration and field trial on multi-user UDWDM-PON full duplex PSK-PSK with single monolithic integrated dual-output-DFB-SOA based ONUs," *Opt. Lett.* 41, 4696-4699 (2016)
- (3) G. de Valicourt, C-M. Chang, M. Eggleston, A. Melikyan, C. Bolle, N. Kaneda, Y. K. Chen, S. Chandrasekhar, **A. Maho**, R. Brenot and P. Dong, "Hybrid integrated wavelength and reflectivity tunable III-V/Silicon transmitter," *J. Lightwave Technol.*, to be published
- (4) Paola Parolari, Lucia Marazzi, Marco Brunero, Mario Martinelli, Romain Brenot, **Anaëlle Maho**, Sophie Barbet, Giancarlo Gavioli, Gael Simon, Sy Dat Le, Fabienne Saliou, and Philippe Chanclou, "C- and O-Band Operation of RSOA WDM PON Self-Seeded Transmitters up to 10 Gb/s [Invited]," *J. Opt. Commun. Netw.* 7, A249-A255 (2015)
- (5) F. Saliou, G. Simon, P. Chanclou, M. Brunero, L. Marazzi, P. Parolari, M. Martinelli, R. Brenot, **A. Maho**, S. Barbet, G. Gavioli, G. Parladori, S. Gebrewold, and J. Leuthold, "125-km Long Cavity Based on Self-Seeded RSOAs Colorless Sources for 2.5-Gb/s DWDM Networks," *J. Lightwave Technol.* 33, 1602-1607 (2015)
- (6) Parolari, P.; Marazzi, L.; Brunero, M.; Martinelli, M.; Brenot, R.; **Maho, A.**; Barbet, S.; Gavioli, G.; Simon, G.; Saliou, F.; Chanclou, P., "10-Gb/s Operation of a Colorless Self-Seeded Transmitter Over More Than 70 km of SSMF," *Photonics Technology Letters, IEEE* , vol.26, no.6, pp.599,602, March15, 2014
- (7) L. Marazzi , P. Parolari , M. Brunero , M. Martinelli , P. Chanclou , Q. Deniel , F. Saliou , S. D. Le , G. Gavioli , R. Brenot , S. Barbet , **A. Maho** , S. A. Gebrewold , D. Hillerkuss , J. Leuthold , "O-Band 10-Gb/s Operation of a Reflective Semiconductor Optical Amplifier Based Self-Seeded Transmitter for Optical Access Applications », *Fiber and Integrated Optics_ Vol. 33, Iss. 3, 2014*
- (8) Gebrewold, S.A.; Bonjour, R.; Barbet, S.; **Maho, A.**; Brenot, R.; Chanclou, P.; Brunero, M.; Marazzi, L.; Parolari, P.; Totovic, A.; Gvozdic, D.; Hillerkuss, D.; Hafner, C.; Leuthold, J. Self-

Seeded RSOA-Fiber Cavity Lasers vs. ASE Spectrum-Sliced or Externally Seeded Transmitters—A Comparative Study. *Appl. Sci.* **2015**, 5, 1922-1941.

Conférences internationales

(1) **A. Maho** and R. Brenot, "On the Stimulated Regime of Semiconductor Optical Amplifiers," *2014 International Semiconductor Laser Conference*, Palma de Mallorca, 2014, pp. 223-224. doi: 10.1109/ISLC.2014.244

(2) **A. Maho**, K. Mekhazni, S. Barbet, F. Lelarge, and R. Brenot, "Impact of Temperature on Spatial Hole Burning and Modulation Bandwidth of Reflective Semiconductor Optical Amplifier," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, OSA Technical Digest (2016) (Optical Society of America, 2016), paper SM4R.8.

(3) **A. Maho**, S. Barbet, K. Mekhazni, and R. Brenot, "Novel Approach for Self-Seeded Cavity based on Reflective Electro Absorption Modulator Semiconductor Optical Amplifier," *ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication*, Dusseldorf, Germany, 2016, pp. 1-3.

(4) G. de Valicourt, C. M. Chang, M. S. Eggleston, A. Melikyan, C. Zhu, J. Lee, J. E. Simsarian, S. Chandrasekhar, J. Sinsky, K.W. Kim, **A. Maho**, R. Brenot and P. Dong, Y. K. Chen "Hybrid III-V/Silicon Integration: Enabling the Next Generation of Advanced Photonic Transmitters", OFC 2017, Invited to be published

(5) G. de Valicourt, M. S. Eggleston, C. Zhu, J. Lee, C. M. Chang, J. Sinsky, K.W. Kim, , Y. K. Chen, **A. Maho**, R. Brenot and P. Dong "80Gb/s PDM-QPSK PIC-to-PIC Experiment based on Fully Integrated Hybrid Silicon-based Wavelength-tunable Transmitter and Monolithic Coherent Receiver", OFC 2017, accepted to be published

(6) Guilhem de Valicourt, Chia-Ming Chang, Young-Kai Chen and Sethumadhavan Chandrasekhar **Anaëlle Maho**; Romain Brenot; Po Dong, "10-40 Gbit/s Hybrid III-V/Si wavelength-tunable transmitter for short- and long-reach communications," *ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication*, Dusseldorf, Germany, 2016, pp. 1-3.

(7) G. de Valicourt, **A. Maho**, A. Le liepvre, R. Brenot, A. Velázquez and Y. K. Chen , "Novel bidirectional reflective semiconductor optical amplifier," *2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)*, Niigata, Japan, 2016, pp. 1-3.

(8) G. de Valicourt, C. Gui, A. Melikyan, P. Dong, C-M. Chang, **A. Maho** , R. Brenot, and Y. K. Chen, "Hybrid silicon-based tunable laser with integrated reflectivity-tunable mirror," *2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)*, Niigata, Japan, 2016, pp. 1-3.

(9) G. de Valicourt, j. simsarian, **A. Maho**, R. Brenot, c. chang, K. Kim, a. Melikyan, P. Dong, and Y. Chen, "Dual Hybrid Silicon-Photonic Laser with Fast Wavelength Tuning," in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper M2C.1.

- (10) A. Lelievre, R. Brenot, G. Duan, and **A. Maho**, "Fast Tunable Silicon Ring Resonator Filter For Access Networks," in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper Tu3E.5.
- (11) Brenot, R.; **Maho, A.**; Barbet, S.; Marazzi, L.; Parolari, P.; Martinelli, M.; Gebrewold, S.; Leuthold, J.; Simon, G.; Saliou, F.; Chanclou, P., "Demystification of self-seeded WDM access," in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015*, vol., no., pp.1-2, 22-26 March 2015 doi: 10.1364/OFC.2015.W1J.1
- (12) F. Saliou, G. Simon, P. Chanclou, M. Brunero, L. Marazzi, P. Parolari, M. Martinelli, R. Brenot, **A. Maho**, S. Barbet, G. Gavioli, G. Parladori, S. Gebrewold, and J. Leuthold, "Self-Seeded RSOAs WDM PON Field Trial for Business and Mobile Fronthaul Applications," in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper M2A.2.
- (13) Brunero, M.; Parolari, P.; Marazzi, L.; Martinelli, M.; Brenot, R.; **Maho, A.**; Barbet, S.; Gavioli, G.; Parladori, G.; Gebrewold, S.; Leuthold, J.; Saliou, F.; Simon, G.; Chanclou, P., "WDM PON RSOA-based self-tuning transmitters: An insight from the EU FP7 ERMES project," in *Transparent Optical Networks (ICTON), 2015 17th International Conference on*, vol., no., pp.1-4, 5-9 July 2015 doi: 10.1109/ICTON.2015.7193396
- (14) Gaël Simon, fabienne saliou, philippe chanclou, romain brenot, anaëlle **maho**, sophie barbet, didier erasme, laurent bramerie, « bruit de battement de sources self-seeded a cavite kilometrique pour le multiplexage en longueur d'onde », JNOG 2015
- (15) P. Parolari, L. Marazzi, M. Brunero, M. Martinelli, **A. Maho**, S. Barbet, F. Lelarge, R. Brenot, G. Gavioli, G. Simon, F. Saliou, Q. Deniel, and P. Chanclou, "Operation of a RSOA WDM PON Self-seeded Transmitter Over More than 50 km of SSMF up to 10 Gb/s," in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper W3G.4.
- (16) M. Brunero, L. Marazzi, P. Parolari, **A. Maho**, R. Brenot and M. Martinelli, "Experimental evaluation of burst-mode operation of a RSOA-based self-seeded transmitter," *2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Cannes, 2014, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2014.6964107
- (17) Parolari, P.; Marazzi, L.; Brunero, M.; Gatto, A.; Martinelli, M.; Brenot, R.; **Maho, A.**; Barbet, S., "10-Gb/s amplified self-seeding WDM PON transmission exploiting RSOAs," *Networks and Optical Communications - (NOC), 2014 19th European Conference on*, vol., no., pp.47,50, 4-6 June 2014
- (18) Simon, G.; Saliou, F.; Chanclou, P.; Brenot, R.; **Maho, A.**; Barbet, S.; Erasme, D.; Grillot, F., "Observation of a Random Fiber Laser Induced by Rayleigh Backscattering," *Semiconductor Laser Conference (ISLC), 2014 International*, vol., no., pp.104,105, 7-10 Sept. 2014
- (19) P. Parolari, L. Marazzi, M. Brunero, M. Martinelli, G. Gavioli, R. Brenot, **A. Maho**, S. Barbet WDM PON Self-Tuning Transmitter Operation at 10 Gb/s in C and O Bands, Fotonica, Naples 2014
- (20) M. Brunero, P. Parolari, L. Marazzi, A. Gatto, M. Martinelli R. Brenot, **A. Maho**, Amplified Self-Seeding Transmitter Based on RSOAs for Fronthaul Fotonica, Naples 2014
- (21) Gatto, A.; Parolari, P.; Marazzi, L.; Brunero, M.; Barbet, S.; **Maho, A.**; Brenot, R.; Gavioli, G.; Galli, P.; Martinelli, M., "Off-set filtering for enhanced transmission in RSOA based WDM-PON,"

Transparent Optical Networks (ICTON), 2013 15th International Conference on , vol., no., pp.1,4, 23-27 June 2013

(22) Romain Brenot, Alban Lelievre, **Anaëlle Maho**, Guang-Hua Duan, “Self-tuned laser cavity: from a network-embedded configuration to silicon integration (*Invited Paper*)”, SPIE Optics + Optoelectronics, 15-18 April 2013, Prague

Brevets

- Un brevet en 1^{er} auteur a été déposé (référence EP16200581.3) ;
- Un second brevet en second auteur est en cours de dépôt ;
- Un troisième brevet en second auteur est en cours de soumission.

Sources appliquées aux cavités auto-alimentées pour les nouveaux réseaux d'accès multiplexés en longueur d'onde

Résumé : Les réseaux d'accès sont particulièrement concernés par les montées en débit dans un contexte exigeant et compétitif. En 2013, les verrous technologiques autour des cavités auto-alimentées limitaient leur expansion. Notre propos fut de les aborder selon une approche "composant".

A partir de caractérisations croisées entre des RSOA variés et de simulations, nous avons montré :

- l'importance du seuil du RSOA sur les performances globales ;
- les rôles de l'émission spontanée, de la densité de porteurs, des recombinaisons Auger et de la hauteur des barrières ;
- la sensibilité des RSOA fort gain au *ripple*.

Livrés à nos partenaires, les RSOA bande O menèrent à des résultats à l'état de l'art tandis que les RSOA aluminium ne tinrent les promesses espérées. Nous cherchâmes alors à trouver des solutions alternatives. Comparativement au RSOA, Fabry-Pérot comme EAM-RSOA limitent le *chirp* et sont de plus grande bande passante. Toutefois, intégrés en cavité, ils ne dépassèrent pas les 2,5 Gbit/s pour un BER restreint. Pourtant, pris séparément, RSOA et EAM autorisent des débits jusqu'à 20 Gbit/s. Nous pensons qu'en remplaçant le tronçon de fibre par de l'optique en espace libre confirmerait le potentiel de ce concept.

Mots clés : RSOA, RSOA-EAM, cavité auto-alimentée, cavité étendue, laser

Emitting sources for self-seeded cavities in the next generation wavelength multiplexed access networks

Abstract: Today, access networks have to face higher data bit rates with strong constraints and competitors. In 2013, self-seeded cavities were limited by some issues that we have tried to solve from a component point of view.

Thanks to experimental observations on various RSOA and thanks to simulations, we have shown:

- the impact of RSOA threshold on the global performances,
- the influence of the spontaneous emission, of the carrier density, of Auger recombination as well as the barrier bandgap,
- how high gain RSOA were sensitive to ripple.

Delivered to our partners, O band RSOA led to state-of-the-art results whereas aluminum RSOA were disappointing. We looked for short/mid-terms solutions. Compared to RSOA, both of the Fabry-Perot and the RSOA-EAM reduce the chirp and display an enhanced bandwidth. Yet, integrated in the cavity, they were limited at 2.5 Gbit/s with a high BER. Nonetheless each of the EAM and the RSOA could support up to 20 Gbit/s. We believe we could prove such data bitrates by replacing the feeder fiber between the two components by a free space link.

Keywords: RSOA, RSOA-EAM self-seeded cavity, km-long laser, laser