

Extension de portée de systèmes NGPON

SOMMAIRE DU CHAPITRE 3

Introduction au Chapitre 3	150
1. Extension de portée NGPON-1 : 10GPON	151
1.1. Mise en œuvre d'une transmission à 10Gbit/s	151
1.2. Amplification d'une transmission à 10Gbit/s.....	156
1.3. Convergence GPON –NGPON 1	166
2. Extension de portée NGPON-2.....	171
2.1. Extension de portée d'un PON WDM	171
2.2. PON hybride WDM-TDM	176
2.3. Amplification d'une transmission OFDM.....	180
3. Convergence fixe-mobile	191
3.1. Extension de portée de liaisons Radio sur Fibre analogique	193
3.2. Extension de portée d'une architecture RoF numérique - GPON.....	194
Résumé du Chapitre 3	197

Introduction au Chapitre 3

Le chapitre 2 a permis de démontrer la possibilité d'étendre le budget optique grâce à l'introduction d'amplification optique ou de répéteurs optoélectroniques. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la normalisation au sein de l'ITU du standard G984.6. Bien qu'associé au GPON, ce standard est parfois affiché en marge de la planification de la Nouvelle Génération de PON.

Ces nouvelles technologies sont développées pour offrir de nouvelles capacités au réseau d'accès optique, en termes de débit, taux de partage, portée, services. Ils devront par exemple répondre aux critères suivants : fort taux de couplage (≥ 64), débit agrégé jusqu'à 40Gbit/s, grande bande passante par client (1Gbit/s), débits symétriques pour une transmission bidirectionnelle sur lien mono-fibre, longue portée (>20km), passivité, simplicité à renouveler ces équipements, protection basique incluse, etc. Ces motivations sont décrites en détail au chapitre 1.

Cette nouvelle génération de réseau d'accès optique, décrite au chapitre 1, différencie une évolution court-terme des technologies PON à travers le NGPON1, et une génération plus long terme avec le NGPON2.

Les travaux de normalisation associés au NGPON1 ont été en partie définis en 2009 à travers la normalisation du XGPON1 (débit asymétrique d'un 10GPON : 10Gbit/s descendant, 1Gbit/s montant) au sein de l'ITU-T et au sein de l'IEEE, par l'intermédiaire du standard 802.x associé au 10GEAPON. Une seconde partie de normalisation concernant le XGPON 2 (débit symétrique de 10Gbit/s) devrait être finalisée par l'ITU-T pour le mois de Juin 2010.

Le NGPON2 demeure pour l'instant à l'état des prémices de normalisation, mais quelques solutions technologiques apparaissent comme pouvant entrer dans ce cadre : le PON WDM et à multiplexage hybride WDM TDM, ou encore le PON à base de multiplexage OFDM.

Afin de compléter notre étude sur l'extension de portée du réseau d'accès optique, il est donc indispensable d'y intégrer ces nouvelles générations. Nous allons alors chercher à évaluer l'extension de budget optique possible sur un 10GPON, un PON WDM et un PON OFDMA. En y insérant différentes technologies d'amplification optique, le but de cette étude est d'observer le comportement de ces nouvelles technologies en présence de SOA ou EDFA. Il sera en effet difficile de conclure sur l'extension de portée de systèmes NGPON tant qu'ils ne sont pas complètement définis par la normalisation.

Enfin dans le cadre du NGPON2, un autre point important concerne le développement du NGPON, avec le PON existant. Comment réaliser la migration du BPON/GPON/GE-PON vers le NGPON et quelles sont les architectures possibles pour conserver un réseau qui minimisera le nombre de fibres (le NG-PON aura besoin de partager des fibres avec le PON existant, ou avec d'autres réseaux d'accès : cuivre ou mobile) ? Ces questions cherchent encore des réponses auxquelles nous allons tenter de répondre. Nous allons proposer, toujours dans un contexte d'extension de portée, des architectures convergentes au niveau des technologies : GPON avec 10GPON mais aussi GPON avec coexistence de trafics mobiles.

1. Extension de portée NGPON-1 : 10GPON

Le déploiement massif de fibres de plus en plus proche des utilisateurs finaux tient son origine sur l'utilisation incessante de services multimédias de plus en plus gourmands en bande passante notamment via le développement d'Internet. Des besoins croissants, de débits toujours plus élevés sont mis en évidence. Dans ce contexte, des transmissions à 10Gbit/s pour les réseaux optiques passifs (10GPON) apparaissent au sein des organismes de normalisation (IEEE & ITU) dans le but de définir des standards d'une nouvelle génération de réseau d'accès NGPON1. Le 10GPON permettra d'atteindre des débits s'élevant à 10Gbit/s, en utilisant comme pour le GPON un multiplexage temporel (TDM) des signaux montants.

Toutefois, une augmentation du débit à 10Gbit/s implique un apprentissage technologique du marché des composants (lasers, photodiodes et CRD).

On propose alors dans une première partie d'analyser l'impact de la forme de la trame transmise à 10Gbit/s sur la qualité de réception d'une photodiode mode burst dotée d'une CDR à 10Gbit/s.

Dans une optique d'extension de portée du réseau d'accès, nous avons ensuite testé des architectures de 10GPON avec pour objectif ici d'y évaluer l'impact de l'insertion d'amplification optique sur une transmission à 10Gbit/s.

1.1. Mise en œuvre d'une transmission à 10Gbit/s

La transmission des données montantes (des utilisateurs vers le central) est basée comme pour le GPON sur un partage de la fibre à travers un multiplexage temporel.

Le mode de fonctionnement et l'architecture du 10GPON est donc très similaire à celle du GPON décrite aux chapitres précédents.

1.1.1. Eléments de transmission

L'architecture de test d'une transmission monodirectionnelle à 10Gbit/s est illustrée en Figure 117.

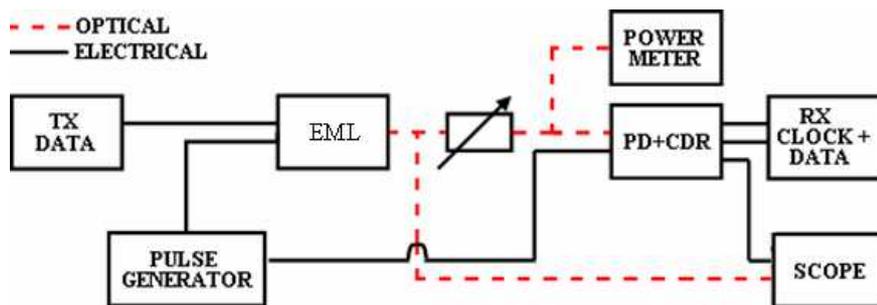


Figure 117 : Illustration d'une transmission monodirectionnelle à 10Gbit/s

Module d'émission

A 10Gbit/s, un Laser à Modulation Externe (EML) est nécessaire. Il combine une diode laser DFB et un Modulateur à Electro-Absorption (EAM) intégré de façon monolithique sur un support semi-conducteur à base d'InP.

La modulation de données (Tx Data) est effectuée par un générateur de trames PRBS à 10Gbit/s du type MP1800A de chez Anritsu.

Le rendement électro-optique de l'EML est également un facteur important. Selon la tension de modulation appliquée, le taux d'extinction doit être au minimum de 6dB selon la norme du 10GEAPON (spécifié par l'IEEE, pas encore spécifié pour le 10GPON de l'ITU-T).

Cette norme a également spécifié la puissance optique de sortie pour le XG-PON 1 : Pour un signal descendant à 10Gbit/s et un signal montant à 2.5Gbit/s, les puissances de sorties des émetteurs doivent être comprises respectivement entre 2 et 6 dBm et 2 et 7dBm. Dans le cas d'un débit symétrique (XG-PON2), ces données sont encore à définir mais devraient être similaires.

Module de Réception

Une photodiode APD ou PIN peut être utilisée pour recevoir les données optiques transmises. Elle doit cependant respecter la norme ITU-T G987.2 qui spécifie, pour le récepteur descendant à 10Gbit/s, une sensibilité de -28dBm et une saturation à -8dBm, et pour le récepteur montant, une sensibilité de -27.5dBm et une saturation à -7dBm à 2.5Gbit/s.

De plus, similairement au GPON, un circuit de récupération des signaux de données et d'horloge est indispensable pour traiter les données reçues par la photodiode. Un circuit d'adaptation électrique est souvent nécessaire : TIA ou LIA (Limiter amplifier).

L'évaluation des données ainsi reçues (Rx Data) est ensuite réalisée par un détecteur d'erreur à 10Gbit/s intégré au MP1800A d'Anritsu. La transmission sera considérée sans erreur pour un taux d'erreur binaire inférieur à $1,1 \cdot 10^{-3}$, si on considère l'implémentation future d'un FEC spécifié par la norme.

Implémentation du mode Burst

Pour les signaux montants, la mise en place du mode burst à 10Gbit/s s'avère plus laborieuse que pour le GPON. En effet, le récepteur ne recueillant pas l'information en continu, il lui sera difficile de fournir instantanément une synchronisation de phase complète. En d'autres termes, les périodes d'inactivité sur la transmission peuvent entraîner une altération temporelle qui conduirait à une interprétation erronée des symboles et d'accroître ainsi le BER de la transmission.

Pour parer à cet obstacle, on peut envisager d'utiliser des composants prévus initialement pour une modulation continue ou encore d'intégrer à la MAC du récepteur, une fonction de remplissage de la trame mode burst afin que celle-ci soit vue par le bloc de réception comme une transmission continue.

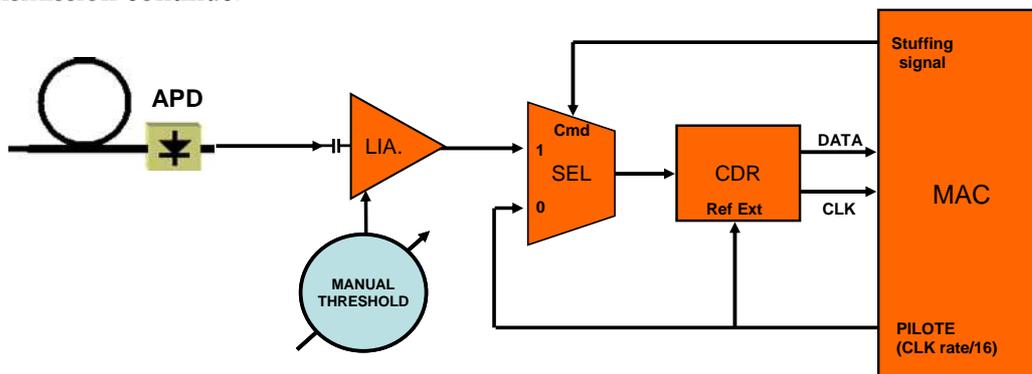


Figure 118 : Schéma descriptif du module de réception mode burst implémenté

Le fonctionnement du récepteur mode burst est illustré en Figure 118. Un amplificateur limiteur (LIA) et un sélecteur 2 vers 1 sont insérés entre une photodiode 10Gb/s APD-TIA et une CDR disponibles commercialement. Le sélecteur est contrôlé par la couche MAC et adresse le signal

pour la CDR d'après le signal provenant du LIA et une horloge de référence. Il assure ainsi un remplissage électrique au cours de la partie inutilisée du cycle des bursts. Ce remplissage est réalisé en créant un signal aléatoire "stuffing signal" à la fréquence de l'horloge de référence du système, préparant ainsi pour la CDR, le niveau de couplage AC et la synchronisation de phase pour le prochain préambule.

Le seuil de décision du LIA est ajusté manuellement afin d'optimiser les performances de la transmission selon le taux d'extinction des données transmises.

Ces modifications permettent d'utiliser cette CDR avec un signal quasi-continu dans une configuration mode burst.

Circuit de contrôle des burst

Dans le cas d'une émission en mode burst, un détecteur d'enveloppe intégré dans le générateur de trames permet de générer un signal d'enveloppe des paquets émis. Ce signal va permettre d'allumer le laser uniquement pendant l'émission des données du burst et de l'éteindre pendant l'absence de paquet afin d'annuler le niveau "0" du laser.

A l'OLT, ce signal d'enveloppe permet au récepteur de synchroniser le remplissage sur la partie non utilisée des burst.

Un générateur d'impulsions, permettant de dupliquer ce signal et de l'ajuster en longueur, délai et tension, est utilisé pour distribuer de façon optimale les signaux d'enveloppe à l'émetteur et au récepteur.

A terme, ces fonctions devront être intégrées séparément dans le module d'émission à l'ONT et de réception à l'OLT.

Dans ces conditions, la Figure 119 schématise la structure du burst optique émis par l'EML (a) et de celui reçu par la CDR (b).

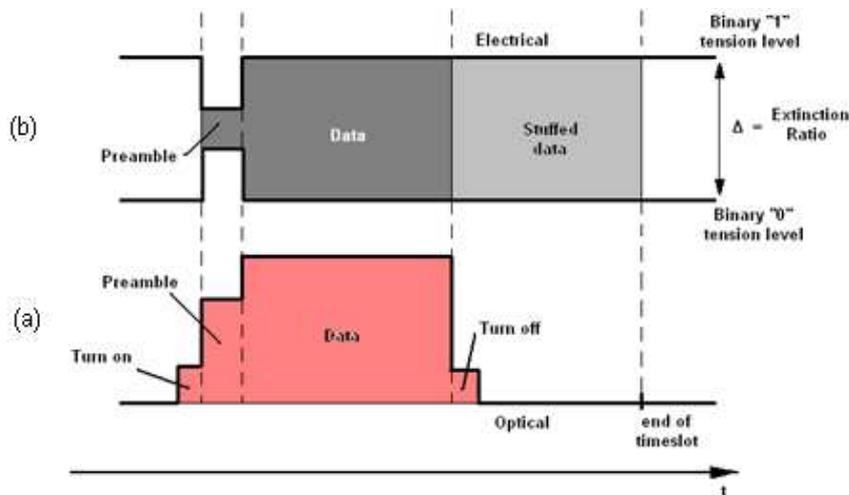


Figure 119 : Burst optique émis par l'EML (b) et reçu par la CDR après remplissage (a)

1.1.2. Evaluation de la transmission

Suivant le schéma d'expérimentation présenté en Figure X (plus haut), nous avons évalué l'impact du taux d'extinction (ER), de la longueur du préambule (Pr) et de la longueur du burst sur la qualité de la transmission en back-to-back.

Un EML émet à une longueur d'onde centrale de 1550nm pour une puissance optique de +4dBm. Sa fréquence de coupure à -3dB est de 8GHz. Une modulation NRZ y est appliquée par

une séquence PRBS de longueur $2^{15}-1$ dans la partie utile des paquets. Les paquets sont émis sur une période de $125\mu\text{s}$ à un débit de 10.3125Gb/s (1289088 bits).

En réception, la photodiode utilisée est une APD intégrée dans le module de récepteur mode burst décrit au paragraphe précédent. Le seuil de décision du récepteur est réglé manuellement pour chaque taux d'extinction à un taux d'erreur optimum (autant d'erreurs en insertion qu'en omission).

Le taux d'extinction est mesuré sur un diagramme de l'œil observé à l'oscilloscope pour une transmission continue en fonction de la tension de modulation appliquée sur l'EAM.

Pour un taux d'extinction de 6, 9 et 11 dB, les cas de longueur de burst de 10, 50 et 96% du cycle du burst (respectivement 12.5, 62.5 et 120 μs) et pour des préambules de 8192, 1024 et 512 bits ont été étudiés.

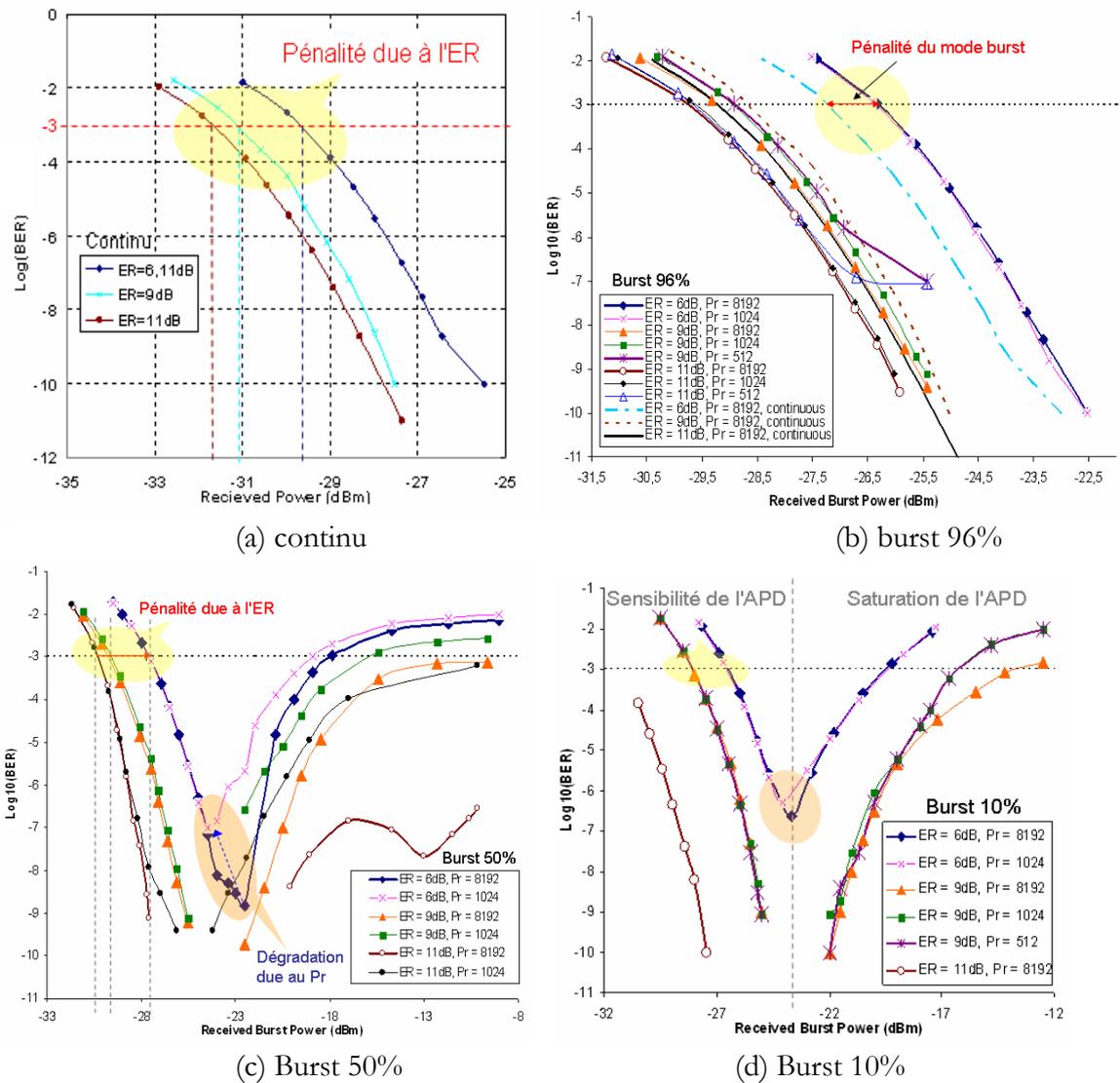


Figure 120 : Courbes de BER mesurées en B2B pour des ER de 6, 9 et 11dB et différentes longueurs de préambule regroupées par type de modulation: modulation continue (a), burst de 96% (b), burst de 50% (c) et burst de 10% (d)

En faisant varier la puissance optique reçue à l'APD à l'aide d'un atténuateur variable, on obtient les résultats présentés en Figure 120, en mesurant le BER à la réception pour une transmission en mode continu (a), en mode burst de longueur 96% (b), 50% (c) et 10% (d).

En Figure 120, (a) on peut remarquer l'impact du taux d'extinction sur la performance d'une transmission continue. A un BER de 10^{-3} , on observe une pénalité de 0.8 dB, pour un ER passant de 11 à 9dB et une pénalité de 1.5dB pour un ER passant de 9dB à 6dB. Le taux d'extinction a donc une forte influence sur la performance d'une transmission continue. On retiendra tout de même que pour le pire cas spécifié par la norme, c'est-à-dire pour un ER de 6dB, un budget optique de 34dB est possible avec une sensibilité de -30dBm et aucune saturation du récepteur. Ces résultats sont tout à fait conformes aux paramètres d'une transmission descendante spécifiée par la norme ITU-T G987.2 quelle que soit la classe de budget optique N1, N2 ou E.

Cette pénalité liée à une dégradation du taux d'extinction est également observée dans les mêmes proportions pour une transmission en mode Burst. Quelles que soient la longueur du burst et la longueur du préambule, on n'observe aucune saturation du récepteur pour un taux d'extinction de 11dB. Les pires performances sont logiquement relevées pour un taux d'extinction de 6 dB.

Toutefois le passage en mode rafale semble affecter la qualité de transmission, car comme on peut le remarquer sur la Figure 120 (b), pour un burst de 96%, un ER de 6dB, on observe une pénalité de l'ordre de 0.8dB. Cependant, on doit relativiser cette remarque au fait que cette pénalité est de l'ordre de l'erreur de mesure estimée à +/-1dB, du fait du réglage manuel du seuil de décision du récepteur.

Impact de la longueur du préambule

En observant chacune de ces courbes, on remarque que raccourcir la longueur de préambule va dégrader les performances de transmissions, dans le sens où la puissance de saturation devient plus faible, et la sensibilité du récepteur légèrement plus élevée, ce qui laissera moins de marge pour le budget optique entre un client proche et un client lointain.

On peut relier cette dégradation au couplage AC de l'APD au LIA qui provoque une dérive de la composante continue pendant la réception du préambule, ce qui par conséquent dégrade également le seuil de décision du LIA.

Cependant l'impact de la longueur du préambule est relatif à la longueur du paquet. En effet pour un paquet de 50%, soit 644544 bits, une longueur de préambule de 8192 bits représente 1,3% de la longueur du paquet, alors que pour un paquet de 128909sbits (10%), ce préambule occupe une place de 6,4% dans le paquet total. Cela permet d'expliquer le fait qu'un préambule plus court a un impact plus marqué sur la transmission d'un burst à 50%.

Impact de la longueur du paquet

En comparant les courbes des Figure 120 (b), (c) et (d), on remarque que la longueur du burst n'agit pas sur la qualité de la transmission. En effet pour un même taux d'extinction et une même longueur de préambule, la puissance de saturation et la sensibilité du récepteur sont similaires. On peut donc en conclure que cette technique de conversion du mode burst en continue est robuste à une variation de la longueur du burst.

Performances en budget optique

Le Tableau 25 synthétise les performances en budget optique selon la longueur du burst, la longueur du préambule et le taux d'extinction. Le budget optique est calculé suivant la puissance émise par l'EML qui varie selon la longueur du burst et le taux d'extinction, et la sensibilité du récepteur relevée pour un BER de 10^{-3} sur les courbes précédentes.

Cet affichage en fonction du budget optique permet de confirmer que la longueur du burst n'a pas d'impact sur le budget optique, contrairement à la longueur du préambule qui, quand elle diminue, augmente le budget optique minimum (saturation du récepteur). Le taux d'extinction affiche lui un effet important sur les budgets optiques minimum et maximum possibles d'où une forte variation de la gamme de budgets possibles. Seuls quelques cas sont compatibles avec la classe N1 du XGPON (14-29dB), les autres cas sont limités par la saturation du récepteur qui est facilement contrôlable en atténuant l'émission des utilisateurs les plus proches du central.

Finalement, on retiendra une performance de 30dB de budget optique pour un taux d'extinction de 6dB, une longueur de préambule de 1024 et un burst de 12.5µs qui est le pire cas de cette évaluation.

		Pr = 8192 bits		Pr = 1024 bits		Pr = 512 bits	
		OB.O.S. (dB)	OB.Sens. (dB)	OB.O.S. (dB)	OB.Sens. (dB)	OB.O.S. (dB)	OB.Sens. (dB)
10% of BC	ER=6dB	23,85	30,45	23,70	30,25	-	-
	ER=9dB	17,35	32,25	19,75	32,00	19,75	32,00
	ER=11dB	IL	34,47	-	-	-	-
50% of BC	ER=6dB	22,40	31,50	22,90	31,50	-	-
	ER=9dB	13,65	33,60	20,95	33,60	-	-
	ER=11dB	IL	34,20	14,20	34,10	-	-
96% of BC	ER=6dB	IL	29,97	IL	30,07	-	-
	ER=9dB	IL	32,87	IL	32,77	IL	32,52
	ER=11dB	IL	33,47	IL	33,37	IL	33,42

B.C.: Burst Cycle I.L.: Insertion Loss O.S.: Overshoot Sens.: Sensitivity

Tableau 25 : Synthèse des Budget Optique (OB) obtenus à un BER de 10^{-3}

Toutefois ces performances sont reportées dans le cas d'une transmission en back-to-back. A l'heure actuelle, cette architecture n'est pas robuste en présence de longueur de fibre pour des raisons de gigue temporelle non compensée par la CDR. Or, l'insertion de fibre dans le montage est indispensable et nous avons déjà démontré son impact sur des transmissions à 10Gbit/s [61], mettant en évidence de nouvelles pénalités observées sur le budget optique.

1.2. Amplification d'une transmission à 10Gbit/s

La notion de GPON étendu avec des Extender Box a été définie au chapitre précédent et apparaît depuis 2009 dans le standard de l'ITU-T G984.6. Dans l'hypothèse où le 10GPON sera déployé par la suite, en s'appuyant le modèle du GPON, on devra également envisager une extension de portée du 10GPON. Nous avons donc débuté une étude sur l'extension de portée de systèmes 10GPON, basée sur l'amplification optique. Cette technique est préférée à une

conversion Optique Electro Optique car d'une part, les amplificateurs optiques sont transparents au débit de la transmission, et d'autre part, les modules d'émission-réception sous forme de XFP ne sont pas encore disponibles pour une telle application. De plus, contrairement au GPON, le coût d'un répéteur OEO à 10Gbit/s risque d'être plus élevé que celui d'un amplificateur optique.

1.2.1. Choix des amplificateurs

Parmi les amplificateurs adaptés au réseau d'accès optique, cités au chapitre 2, le choix va s'effectuer selon leurs bandes spectrales, leurs gains, leurs facteurs de bruit (NF) et leurs puissances de saturation.

La bande spectrale affectée aux signaux descendants du 10GPON (1570-1580nm), contrairement au GPON, est cette fois adaptée à un EDFA qui offre les meilleures performances en termes de gain et de facteur de bruit. En réalité, notre transmission se trouve en marge de la bande d'amplification de l'EDFA mais nous allons montrer que l'amplification d'un signal 10GPON descendant est tout de même possible avec un EDFA.

Pour les signaux montants (1270nm-1280nm), un SOA (ou un PDFA si cette technique arrive à se développer) est la seule solution adaptée.

Nous avons donc testé les performances d'une architecture 10GPON étendue par un EDFA et un SOA pour une transmission descendante en mode continu et une transmission montante en mode burst.

Les amplificateurs utilisés ont été caractérisés en NF et gain ainsi que spectralement et leurs principales caractéristiques à 25°C sont résumées dans le Tableau 26.

Caractéristiques des amplificateurs utilisés	Mode continu à 1550nm @ 300mA ; Pin=-30dBm		Mode burst à 1310nm @ 300mA ; Pin=-20dBm
	EDFA Manlight	SOA Covega	SOA Alphion
NF (dB)	5	7	6,5
Gain (dB)	42	12,5	18,5
Lambda centrale (nm)	1550	1550	1310
Largeur spectrale (nm)	40	80	60

Tableau 26 : Principales caractéristiques des amplificateurs utilisés

Pour amplifier une transmission descendante (1570-1580nm), en mode continu, nous avons utilisé un EDFA provenant du fabricant Manlight, et un SOA fabriqué par Covega. Ils présentent des caractéristiques très différentes qui devront nous permettre de mettre en évidence des performances différentes.

Pour une transmission montante (1270-1280nm), nous n'avons testé pour l'instant qu'un seul amplificateur : un SOA fabriqué par la société Alphion. A terme, il faudra envisager de tester d'autres amplificateurs disponibles dans cette bande d'amplification.

1.2.2. Amplification en mode continu

La mise en œuvre d'une expérimentation de l'amplification de signaux à 10Gbit/s en continu est schématisée par la Figure 121.

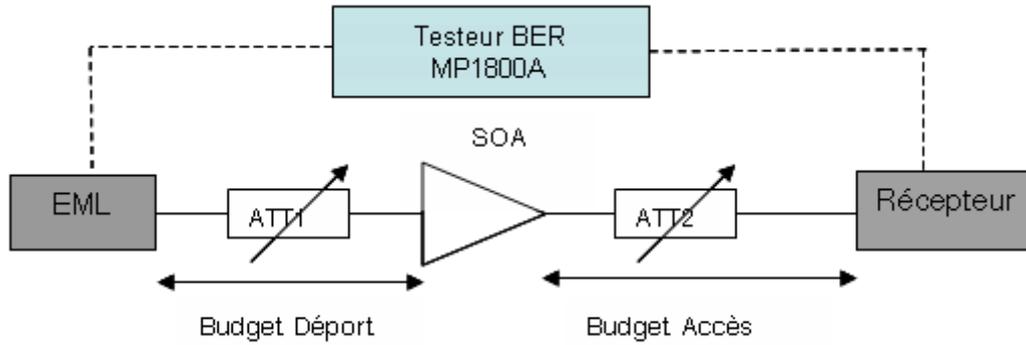


Figure 121 : Schéma d'expérimentation de l'amplification de signaux à 10Gbit/s

Les modules d'émission et de réception sont ceux testés au paragraphe précédents : EML, photodiode APD et CDR avec fonction de remplissage.

De la même façon que pour les tests réalisés sur GPON, nous avons évalué la performance de cette transmission en mesurant le taux d'erreur binaire en fonction du budget optique possible en accès et en déport. Une séquence PRBS de longueur $2^{15}-1$ est insérée dans les données modulant l'EML et les données reçues sont comparées à celle émises afin d'établir le BER instantané. Ensuite en variant le budget optique à l'aide des atténuateurs "att 1 et 2", nous pouvons dresser des courbes de BER en fonction de la puissance reçue au récepteur et des cartographies de budget optique.

Pour valider une bonne transmission, un taux d'erreur inférieur à 10^{-3} est requis dans la pire configuration, soit pour un taux d'extinction de 6dB. Nous avons en effet pu remarquer au paragraphe 1.1.2 de ce chapitre que c'est le cas le plus pénalisant sur cette transmission. Dans ce cas, on obtient une sensibilité du récepteur de -28,6dBm. L'EML émettant à 5,6dBm, cela représente un budget optique de 34,2dB sans amplification.

Pour les mêmes raisons et similairement aux études menées sur le GPON (cf Chapitre 2), nous avons cherché à augmenter ce budget optique en y insérant de l'amplification optique à l'aide d'un EDFA ou d'un SOA.

1.2.2.1. Amplification à l'aide d'un EDFA

Contrairement au GPON, le signal descendant d'un 10GPON est défini par la norme G987.2 autour de 1577nm, qui est cette fois à la limite de la bande spectrale d'amplification d'un EDFA. Nous avons donc choisi de tester ce type de d'amplificateur qui permet d'offrir un gain maximum pour augmenter le budget optique du 10GPON.

Cependant, il est important de noter que l'EML utilisé pour notre dispositif de test émet à une longueur d'onde de 1550nm, qui est donc plus centrée sur le spectre de l'EDFA que celle spécifiée par la norme.

Tout d'abord, le fonctionnement de l'EDFA Manlight a été optimisé pour un courant de polarisation de la diode de pompe constant à 300mA. Au-delà de ce courant, aucune amélioration des paramètres n'a lieu : même facteur de bruit, sensiblement le même gain et le même budget optique obtenu. En deçà, ces performances sont réduites.

Ensuite, pour des budgets déport fixés à 15dB, 20dB, 25dB et 30dB, nous avons mesuré le BER de la transmission avec EDFA, en faisant varier la puissance reçue à la photodiode à l'aide de l'atténuateur présent sur le budget accès. Nous obtenons ainsi les courbes de BER présentées en Figure 122.

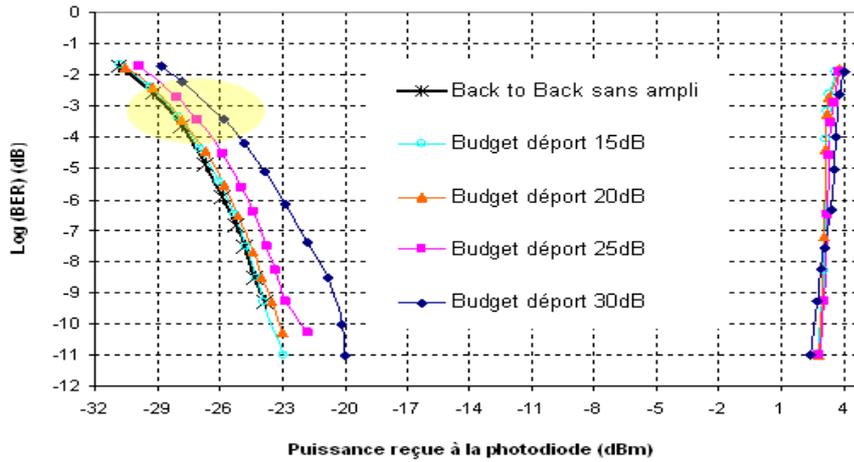


Figure 122 : Courbes de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec et sans EDFA

Ces courbes nous permettent d'observer la réponse du récepteur à une transmission continue d'un signal à 10Gbit/s à travers un amplificateur à fibre dopée Erbium. En comparaison à la courbe de back to back sans amplification, on remarque une pénalité sur la sensibilité de l'APD de plus en plus élevée à mesure que le signal entrant dans l'amplificateur est fortement atténué (budget déport élevé). En effet, le rapport signal à bruit étant affaibli en entrée de l'amplificateur, il est d'autant plus dégradé en sortie de l'EDFA.

De plus, le réglage du seuil de décision de la photodiode est réalisé manuellement et optimisé en back to back. Si on abaisse ce seuil, cela permettra de détecter, à une meilleure sensibilité, des signaux dont l'OSNR est plus faible. Il faudrait donc envisager l'implémentation d'un réglage automatique du seuil de décision de la photodiode sur ce type de récepteur.

Enfin nous avons dressé une cartographie de BER en fonction des budgets optiques de déports et d'accès. Ces résultats sont présentés en Figure 123. Les limites de la zone de fonctionnement sont établies avec les mêmes critères qu'au paragraphe 3.3.1.1 du Chapitre 2 : Saturation et sensibilité du récepteur, gain et bruit d'ASE apportés par l'amplificateur.

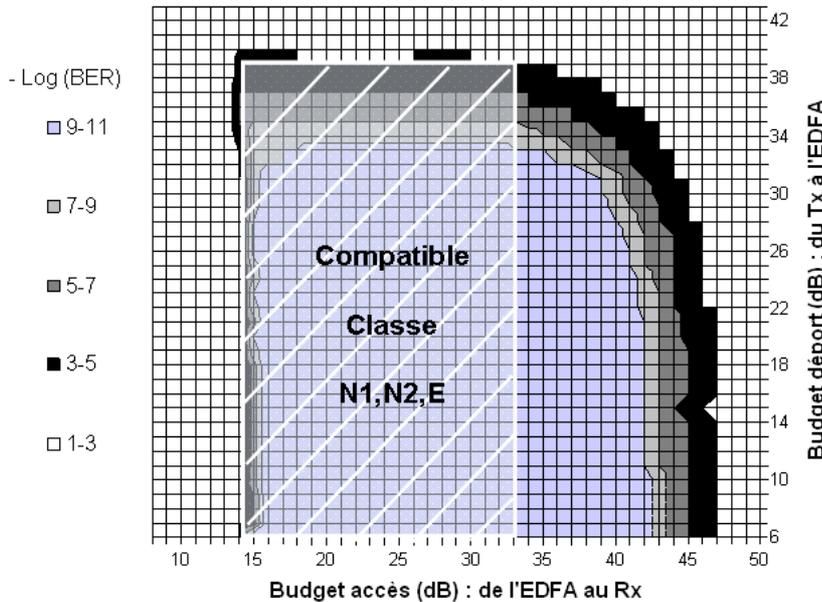


Figure 123 : Cartographie de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec EDFA

Cette cartographie montre que l'on peut établir une transmission à 10Gbit/s pour un budget accès suivant les classes N1 (14-29dB), N2 (16-31dB) et E (18-33dB) du 10GPON, avec un budget déport supplémentaire 39dB.

On remarquera aussi que le budget accès peut être étendu jusqu'à 45dB grâce à l'EDFA pour un budget de déport toujours conséquent : 27dB.

Ces performances sont liées au gain très élevé de l'EDFA (40dB) mais aussi à sa puissance de saturation qui permet d'obtenir un signal s'élevant à 18dBm en sortie de l'amplificateur.

Au total, sur cette architecture présentant la transmission du signal descendant à 1550nm, d'un 10GPON amplifié par un EDFA, un budget optique maximum de 72dB est possible en garantissant un BER inférieur à 10^{-3} .

Cette performance devrait cependant être réduite pour un signal à 1577nm qui se trouverait en marge de la bande d'amplification de l'EDFA testé. Ne disposant pas à cet instant d'EML à cette longueur d'onde, cette étude fait aujourd'hui partie des travaux à venir sur ce type de transmission. De plus, l'utilisation d'un EDFA bande L, décrit au chapitre 2 (page 91), peut également être envisagée pour amplifier une transmission à 10Gbit/s à 1577nm. Ce type d'évaluation sera mis en œuvre par la suite en se basant sur le même type de mesures que nous venons de réaliser.

1.2.2.2. Amplification à l'aide d'un SOA

Nous avons ensuite mis en place le SOA Covega sur l'architecture précédente. Nous avons tout d'abord testé cet amplificateur pour plusieurs courants de polarisation : 100mA, 200mA et 300mA, et nous avons observé qu'il présentait des performances optimales pour un courant de 300mA. Par exemple, la différence de performance entre 200mA et 300mA, se traduit par 3dB de gain supplémentaire et un NF plus faible de 0,5dB à 300mA, qui permettent de fournir un meilleur rapport signal à bruit sur une plus grande plage de variation de budget optique.

Ensuite, de la même façon que pour l'EDFA, nous avons établi les courbes de BER pour des budgets de déport fixés à 15dB, 20dB, 25dB et 30dB. Ces résultats sont présentés en Figure 124.

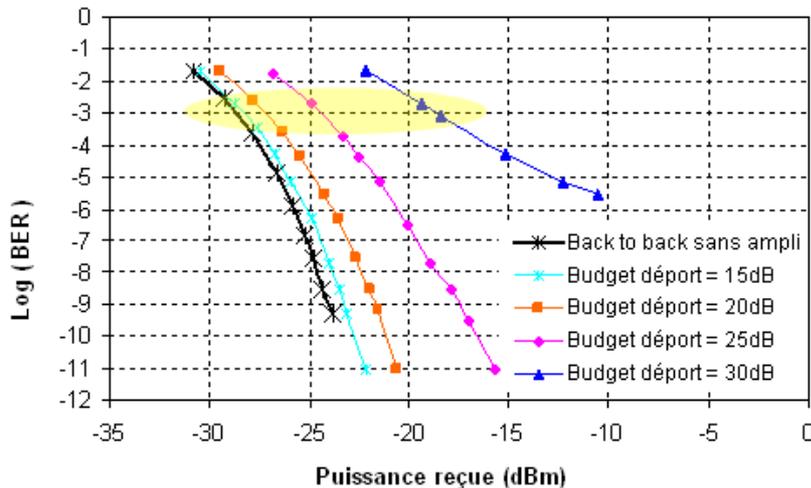


Figure 124 : Courbes de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec et sans SOA

On remarque le même type de comportement qu'avec un EDFA mais de façon plus marquée. En effet, la sensibilité de la photodiode subit une pénalité plus forte avec le SOA car ce dernier a un gain beaucoup plus faible (20dB) que l'EDFA. L'OSNR en sortie de l'amplificateur s'en retrouve alors d'autant plus dégradé.

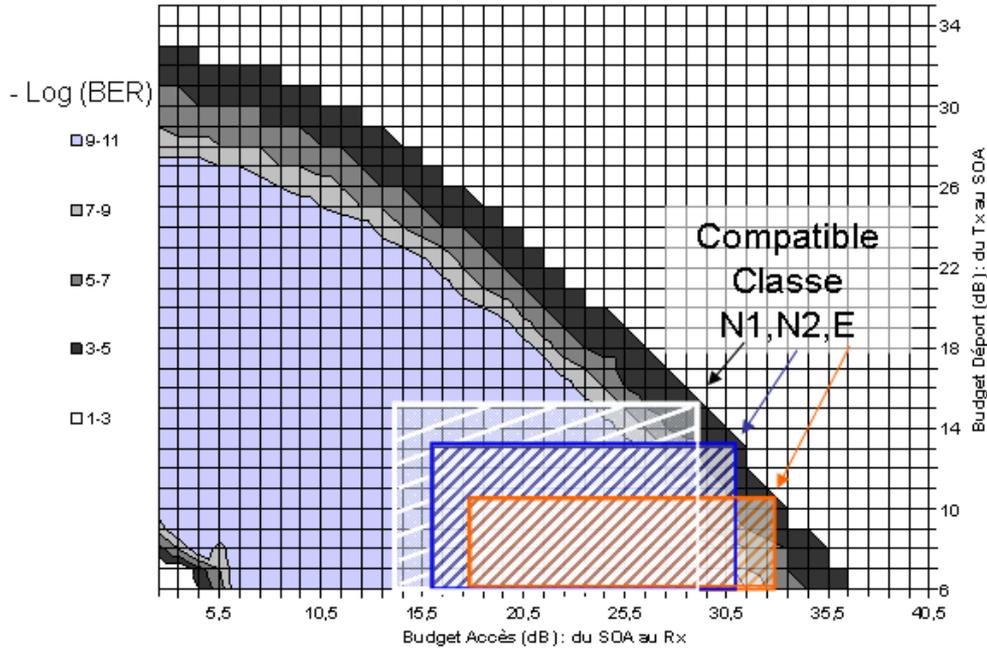


Figure 125 : Cartographie de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec SOA

En termes de budgets optique, cette cartographie de BER, affichée en Figure 125, montre que l'amplification par SOA permet d'atteindre des budgets d'accès compatibles avec les classes N1 (14-29dB), N2 (16-31dB) et E (18-33dB) avec un déport supplémentaire respectivement de 15dB, 13dB et 10,5dB.

Un budget optique total maximum de 44dB est possible, montrant ainsi un résultat similaire à celui du GPON (cf. Chapitre 2, 3.3.1.1).

Nous pensons tout de même pouvoir améliorer ces résultats en utilisant un SOA présentant de meilleures performances : un gain plus élevé pour un facteur de bruit similaire. Cela fera l'objet d'une prochaine étude avec un SOA dont le gain s'élève à 20dB.

On peut d'ores et déjà conclure que l'amplification par SOA d'une transmission continue à 10Gbit/s a un comportement similaire à celui observé sur GPON. Le SOA étant transparent au débit, c'était donc un résultat attendu. On retiendra surtout que le SOA est un bon candidat pour amplifier des transmissions du type GPON mais aussi 10GPON.

1.2.2.3. Implémentation d'un filtrage optique

Nous avons déjà démontré l'impact de la dégradation de l'OSNR provenant d'un amplificateur inséré sur une transmission GPON ou 10GPON. Dans le but de limiter cette dégradation du budget optique lié au bruit d'ASE, nous avons cherché à déterminer l'apport d'un filtrage optique de ce bruit inhérent aux amplificateurs.

Pour cela, nous avons inséré 3 types de filtres optiques sur l'architecture précédente avec SOA, placés juste en sortie de ce dernier. Dans le cas où le filtrage montrerait un intérêt certain, il pourrait être intégré en sortie de ce module d'amplification.

Des filtres centrés autour de 1550nm, de type CWDM de largeur 11nm, passe bande de largeur 5nm, et DWDM de largeur 0,8nm (AWG) ont été mis en place sur l'architecture de test. Nous avons ensuite repris nos mesures de BER afin d'afficher les courbes de BER en présence de chaque type de filtre. Ces résultats sont affichés en Figure 126, pour les deux cas extrêmes de budgets de déport 15dB et 30dB qui affichent respectivement le meilleur OSNR et le pire OSNR relevés sans filtrage en sortie du SOA.

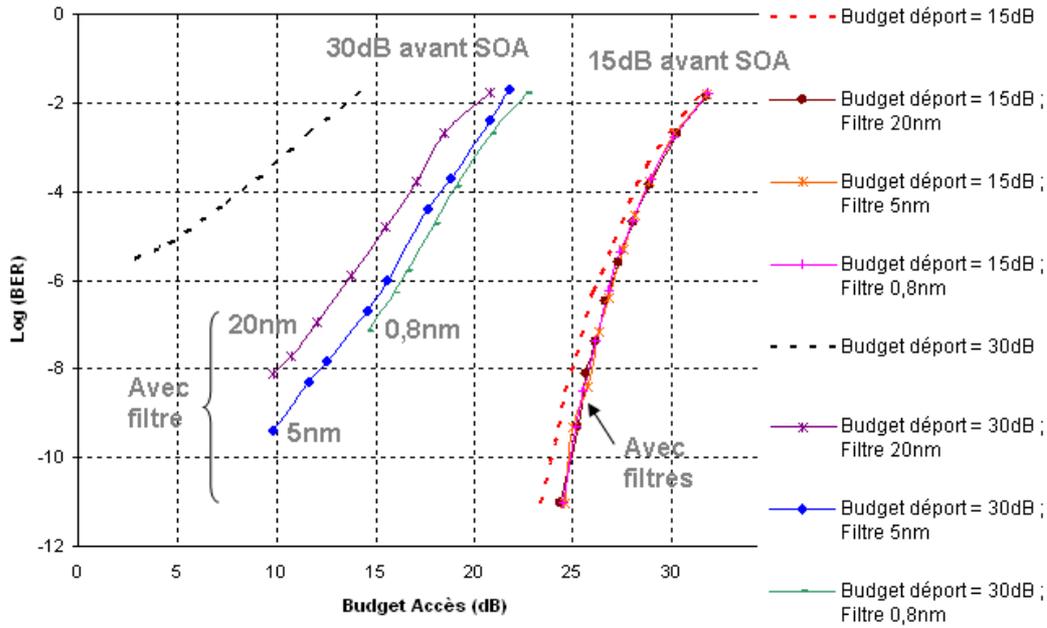


Figure 126 : Courbes de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec SOA + filtres

Sur cette figure, on peut remarquer un gain significatif de budget accès apporté par le filtrage optique dans le cas d'une faible puissance en entrée du SOA (30dB d'atténuation avant l'amplificateur). Dans ce cas, le SOA est peu saturé et produit beaucoup d'émission spontanée ce qui implique une forte contribution d'ASE et un mauvais ONSR en sortie de l'amplificateur. Pour un BER de 10^{-3} , on peut alors atteindre un budget optique en accès de 17,5dB soit un gain de 7dB, apporté par un filtrage CWDM. Avec un filtrage plus fin, de 5nm ou 0,8nm, on obtient respectivement encore 2 à 2,5dB supplémentaires, soit un budget d'accès de l'ordre de 20dB.

Ce gain s'avère beaucoup moins important pour une plus forte puissance injectée dans le SOA, soit pour 15dB d'atténuation avant le SOA. On observe un gain d'à peine 0,5dB sur le budget accès, quel que soit le type de filtre utilisé.

Si on imagine maintenant ces résultats représentés sur la cartographie de budget, on aurait un zone de fonctionnement moins biseauté pour un fort budget de départ donc une zone plus rectangulaire qui faciliterait ainsi l'application des règles d'ingénierie, avec un budget maximum pouvant atteindre 50dB.

L'apport d'un filtrage très fin, comparé au coût supplémentaire qu'il engendre, fait du filtre de largeur 5nm ou du filtre DWDM, de piètres candidats pour nos applications de réseau d'accès. De plus, un filtrage aussi fin imposerait l'implémentation d'un contrôle de température des émetteurs afin de garantir une grande stabilité en longueur d'onde des lasers. Par ailleurs, le standard G987.2 établit une plage de variation possible de la longueur d'onde descendante émise de 1570nm à 1580nm. Pour respecter cette contrainte, l'implémentation d'un filtre d'une largeur inférieure à 10nm sera impossible.

On peut conclure qu'un filtrage optique de type CWDM peut s'avérer utile dans le cas d'une amplification par SOA d'un signal continu descendant d'un 10GPON.

1.2.3. Amplification en mode burst dans le cadre du XGPON2

Le XGPON 2 défini au chapitre 1, section 3.2.1.2 (page 59), vise à offrir un débit symétrique de 10Gbit/s.

Nous avons commencé par démontrer la faisabilité d'une transmission montante en mode burst à 10Gbit/s et nous venons de conclure sur l'amplification de son signal descendant à ce même débit.

Afin de valider les expériences d'extension de portée dans le cadre du XGPON 2, nous devons également démontrer la possibilité d'obtenir des résultats similaires sur une transmission bidirectionnelle à 10Gbit/s donc aussi bien pour l'amplification des signaux descendants que montants, avec cette fois la difficulté de l'implémentation du mode burst à 10Gbit/s.

Nous avons pour objectif de réaliser le même type de tests que pour une transmission continue : détermination des courbes de BER et de la cartographie de budget optique pour établir la performance de l'amplification optique sur une transmission à 10Gbit/s en mode burst.

Une première étude dont les résultats sont présentés ci-après, a été menée à l'occasion d'une collaboration aux travaux de thèse de Zineb Belfqih [61]. Au moment de la publication de ces résultats [62], la norme du 10GPON ne spécifiait pas encore l'utilisation possible d'un FEC ni la gamme de puissance d'émission des sources optiques. Nous avons donc pris soin de réadapter ces résultats pour obtenir des conclusions conformes au standard G987.2 soit à un BER de 10^{-3} et pour une source émettant au maximum à 7dBm. En effet, ce standard définit une puissance émise à l'ONU de 7dBm pour un signal montant modulé à 2,5Gbit/s dans le cadre du XGPON1. Ce paramètre est encore indéterminé pour le XGPON2 mais devrait être du même ordre.

Cette fois, nous n'avons pas utilisé le module de réception possédant la fonction de remplissage des burst, présenté précédemment (section 1.1.1, chapitre 3), mais des composants discrets prévus essentiellement pour une transmission continue.

Les sources optiques utilisées dans les deux ONU de l'étude, dont l'émission doit être à 1310nm, sont des lasers à modulation directe (DML). Celle-ci est réalisée à l'aide d'un contrôleur de courant. Pour un courant de polarisation de 200mA, les DML émettent une puissance optique de 12dBm. Pour le calcul du budget optique, nous y avons soustrait 5dB afin d'être conforme à la norme G987.2 (7dBm).

La réception est réalisée à l'aide d'une photodiode APD suivie d'un TIA dont le seuil de détectivité (BER de 10^{-3}) est mesuré à -32dBm et la puissance de saturation établie à -2dBm. Un module de récupération d'horloge est composé d'un DC Block et d'un amplificateur électrique permettant d'adapter le niveau électrique du signal nécessaire à la CDR. Celle-ci fonctionne normalement en continu, à un débit de 10,7Gbit/s.

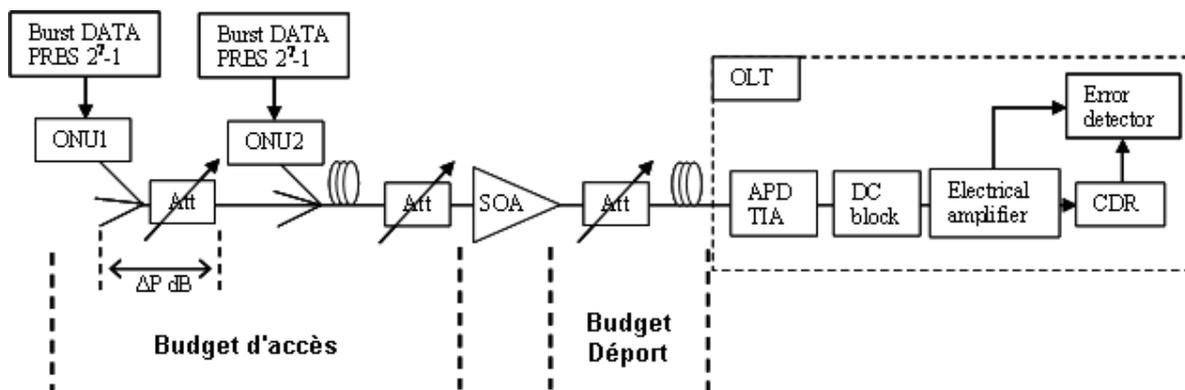


Figure 127 : PON amplifié à l'aide d'un SOA à 10.7Gbit/s

On réalise ainsi une transmission montante en mode burst à 10,7Gbit/s sur 40km de fibre. Dans ces conditions, un budget optique allant de 9 à 39dB est mesuré en insérant une séquence PRBS de longueur 2^7-1 dans les données de chaque burst.

Dans le but de maximiser ce budget optique, nous avons ensuite introduit de l'amplification optique à base de SOA tel qu'illustré sur l'architecture de test présentée en Figure 127. Le SOA utilisé est celui fourni par Alphion dont on a déjà testé les performances sur un GPON et dont on a reporté les principales caractéristiques dans le Tableau 19 (page 108).

Notons l'absence de tout filtre devant la photodiode de réception, par conséquent le bruit de l'émission spontanée amplifiée du SOA n'est pas filtré. Les trames montantes se composent de séquence PRBS 2^7-1 avec un temps total du paquet égal à $4,8\mu s$. Voici la photo des trames montantes avant et après le passage par le SOA.

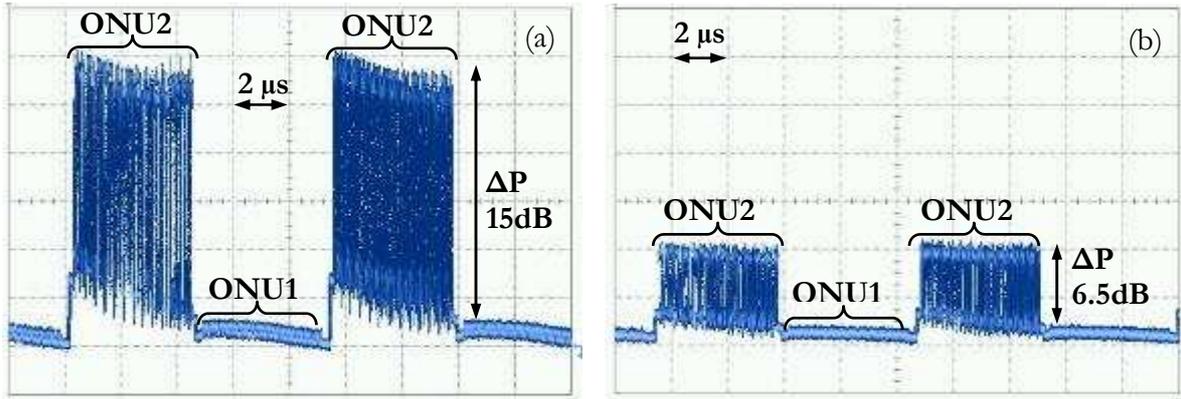


Figure 128 : Trames montantes avant (a) et après le SOA(b)

Le rapport de puissance optique entre 2 ONU " ΔP " avant le SOA est maintenu à 15dB , cette différence est réduite à $6,5\text{dB}$ après le passage par l'amplificateur.

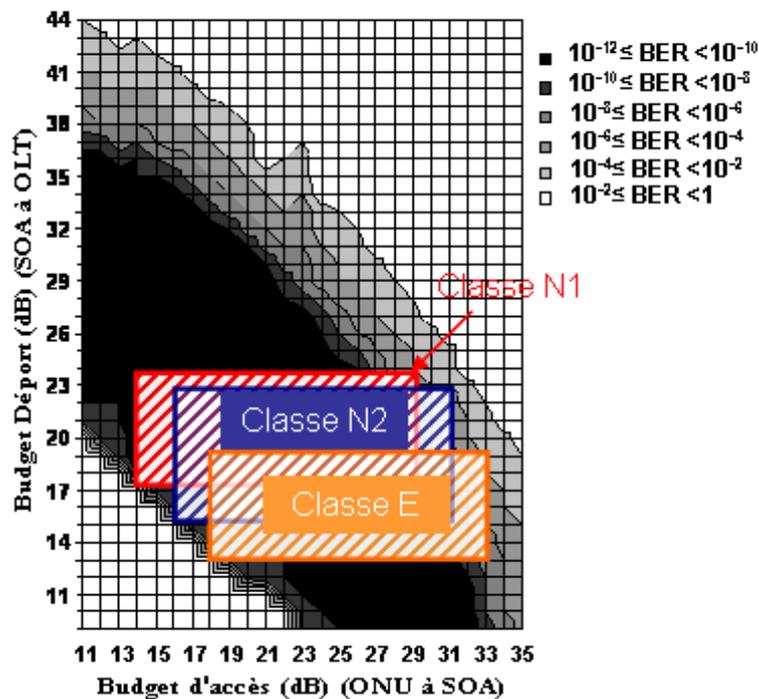


Figure 129 : Evolutions du budget départ en fonction du budget d'accès

Similairement aux études précédentes, nous avons choisi de présenter l'évolution du budget départ en fonction du budget d'accès, mesurés par pas de 1dB , sous forme de zone de travail

pour un BER donné. La Figure 129 présente les résultats obtenus pour cette cartographie de BER.

On observe ainsi une zone de fonctionnement similaire à celles obtenues à l'aide d'un DSOA sur GPON en transmission bidirectionnelle, ou encore d'un SOA sur la transmission descendante d'un 10GPON. Les zones hachurées représentent les zones compatibles avec un budget d'accès de classe N1, N2, et E auxquelles on associe un budget de déport atteignant respectivement 24dB, 23dB et 19dB.

Un budget total maximum de 54dB est obtenu dans cette zone de travail et pour une transmission sans erreurs ($BER < 10^{-3}$).

Afin de visualiser l'évolution du BER en fonction de la puissance reçue par la photodiode, nous avons décidé de tracer quatre courbes de BER pour quatre budgets d'accès fixés à : 17, 27, 29 et 31dB.

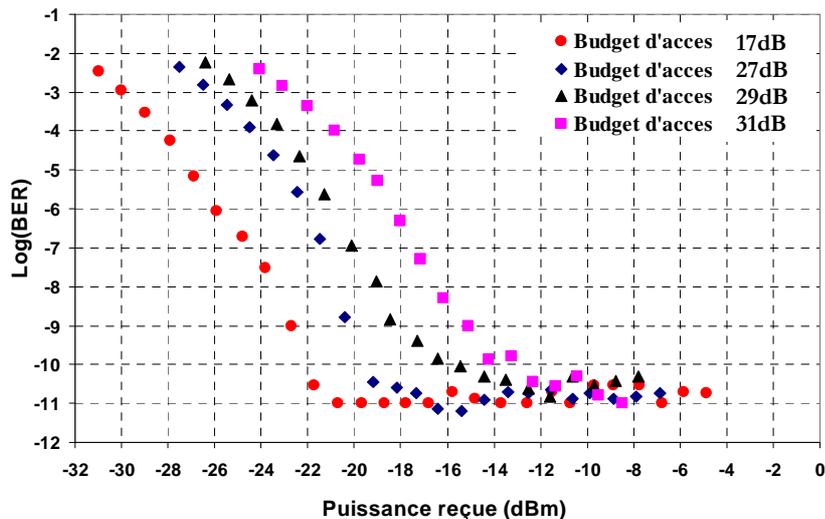


Figure 130 : Courbes de BER en fonction de la puissance reçue à l'OLT

Pour chacune de ces quatre valeurs du budget d'accès, nous avons fait varier le budget de déport grâce à l'atténuateur variable situé après le SOA.

A partir de la Figure 130, on constate que plus le budget d'accès est grand, plus le signal transmis se détériore. En effet, en augmentant le budget d'accès, la puissance d'entrée dans le SOA diminue et par conséquent la contribution de l'ASE en sortie de l'amplificateur est plus élevée. Cela se reflète sur le graphique par le décalage à droite des courbes et donc par la perte en sensibilité à la réception. Si pour un budget d'accès égal à 17dB, un BER de 10^{-3} est obtenu pour une puissance reçue mesurée égale à -30dBm, pour un budget de 31dB et pour le même BER, la puissance reçue baisse de 8dB pour n'atteindre que -22dBm.

Un plancher d'erreurs à un BER de 10^{-10} apparaît sur toutes les courbes tracées quel que soit le budget d'accès fixé. La source de ce plancher est la présence importante du bruit de l'ASE dans le signal reçu par la photodiode qu'aucun filtre optique n'élimine avant la réception.

Les résultats obtenus à travers cette expérimentation ont participé aux premières ébauches mondiales sur l'amplification à 10Gbit/s dans le réseau d'accès. Plus précisément, il s'agit de la première étude intégrant un SOA en ligne pour l'amplification du trafic montant en mode burst et dont le budget total atteint les 54dB. Nous avons obtenu une amélioration de 11,2dB du budget total par rapport aux résultats publiés par le laboratoire japonais NTT [63]. Ces derniers utilisaient un amplificateur à fibre dopée au Praséodyme pour l'amplification du signal optique montant à 1310nm. Ils ont ainsi obtenu un budget total de 42,8dB.

L'étude que nous avons réalisée sur l'amplification des transmissions montantes et descendantes du 10GPON permet d'ores et déjà de proposer un axe d'étude pour de prochaines évaluations de ce type. Ces résultats peuvent notamment être améliorés en utilisant des composants cette fois adaptés à une transmission en mode burst, par exemple en utilisant un module de réception du même type que celui testé pour la transmission continue réalisée précédemment.

1.3. Convergence GPON –NGPON 1

Nous venons de démontrer la possibilité d'étendre le budget optique d'une transmission descendante en continu et montante en mode burst à 10Gbit/s à l'aide d'un SOA. On peut aussi imaginer des architectures de 10GPON étendues de la même façon que pour le GPON à l'aide par exemple d'un Double SOA en attribuant un amplificateur par sens de transmission.

Dans une optique de convergence des réseaux, il serait intéressant de mutualiser l'infrastructure fibre déployée pour le GPON avec les nouvelles générations de PON dont le NGPON1 [64], comme l'a décrit le paragraphe 3.3.1 du chapitre 1 (page 68).

Dans ce contexte, on parle aussi de mutualiser en longueur d'onde les équipements d'extension de portée. Les longueurs d'ondes montantes du GPON et NGPON1 sont situées respectivement autour de 1310nm et 1270nm et pourraient être amplifiées simultanément par un amplificateur (largeur de bande spectrale > 40nm). Par contre, pour les transmissions descendantes du GPON et NGPON1 (respectivement 1490 et 1577 nm), un amplificateur dont la bande spectrale est large de 90nm est nécessaire.

Dans le cadre du projet AROME [52], de récents travaux de recherche ont montré qu'il est possible d'obtenir des SOA dont la largeur spectrale atteint 100nm. Nous pouvons donc envisager d'amplifier à l'aide d'un même SOA, la transmission montante d'un GPON et NGPON1, et à l'aide d'un second SOA, la transmission descendante de ces deux types de PON.

Le tableau suivant rappelle certains paramètres importants des standards G984.2 et G987.2 de l'ITU-T qui diffèrent selon la technologie utilisée.

Transmission descendante	Longueur d'onde	Débit	Budget optique	Pout OLT Max	Pout OLT Min
GPON Classe B+	1490nm	2,5Gbit/s	13-28dB	5dBm	1,5dBm
10GPON Classe N1	1577nm	10Gbit/s	14-29dB	6dBm	2dBm

Tableau 27 : Rappel des paramètres particuliers aux standards GPON et 10GPON

Nous avons commencé à tester ce type de solution en nous concentrant sur l'extension de portée d'une transmission descendante d'une architecture de coexistence GPON-10GPON, illustrée en Figure 131.

Cette architecture est similaire à celles du GPON et du 10GPON étendus par amplification optique, traités séparément auparavant. Vingt kilomètres de fibre sont réparties de part et d'autre de l'amplificateur.

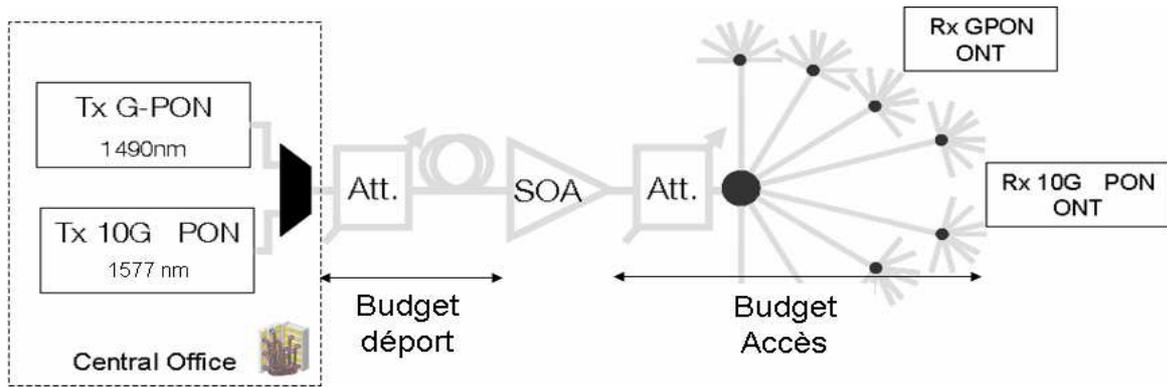


Figure 131 : Architecture de coexistence GPON-10GPON

La mutualisation de ces deux technologies se fait au niveau du central par l'intermédiaire d'un multiplexeur à deux entrées, l'une large de 20nm centrée à 1490nm et l'autre sur une bande de 1528 à 1565nm. Le même type de multiplexage assure la fonction de démultiplexage en réception aux ONT. Cette réception est réalisée par deux photodiodes APD différentes et des CDR continues adaptées. Dans le but de réaliser des mesures de BER de la même façon que pour les études précédentes, nous avons inséré des trames de test dans les données transmises, sous la forme de séquences PRBS 2^7-1 à 2.488Gbit/s pour la transmission descendante GPON et PRBS 2^9-1 à 10.3125Gbit/s pour la transmission descendante à 10Gbit/s. Une transmission sans erreur est considérée pour un $BER < 10^{-9}$ pour le lien GPON et un $BER < 10^{-3}$ pour le lien 10GPON où la norme spécifie l'utilisation possible d'un FEC.

Ensuite, en insérant l'amplificateur sur l'architecture, nous avons réalisé des cartographies de BER en fonction de la variation du budget accès et du budget départ.

Sans amplification optique et en back to back, le récepteur du GPON affiche une sensibilité de -32dBm à un BER de 10^{-9} . Le récepteur du 10GPON a une sensibilité de -31.8dBm à un BER de 10^{-3} . En considérant que les OLT émettent à leur puissance minimale, cela représente un budget optique d'environ 34dB.

Afin d'augmenter la portée de cette architecture, nous avons choisi d'y insérer le SOA Covega, déjà testé pour l'amplification des signaux descendants du 10GPON seul. Nous avons déjà montré le bénéfice apporté par ce SOA à 1550nm. Il s'agit ici d'étudier son comportement lors de l'amplification simultanée de sources à 1490nm et 1577nm. En effet, le multiplexeur, décrit précédemment, a permis de mutualiser l'architecture pour les transmissions descendantes du GPON et 10GPON et de n'utiliser qu'un seul SOA pour les amplifier simultanément. Mis à part ce MUX/DMUX, aucune fonction de filtrage n'a été introduite pour limiter le bruit d'ASE induit par l'amplificateur.

Le spectre optique du SOA utilisé à 430mA et 25°C est présenté en Figure 132 (a) ainsi que sa caractérisation en facteur de bruit et Gain en Figure 132 (b), pour chaque longueur d'onde implémentée.

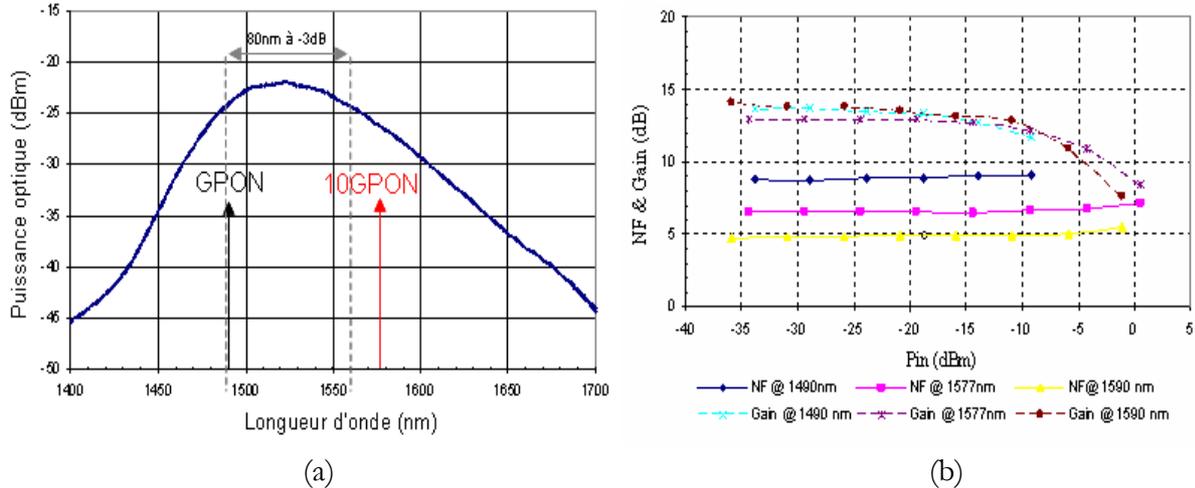


Figure 132 : Relevés du spectre optique du SOA (a) et de ses caractéristiques en NF et gain (b)

Le spectre relevé offre une large bande d'amplification : 83nm mesuré à -3dB du pic de gain situé à 1520nm. C'est donc un amplificateur adéquat pour amplifier la longueur d'onde descendante du GPON à 1490nm. D'après ce spectre, le SOA apportera moins de gain sur la longueur d'onde descendante du 10GPON à 1577nm car elle se situe à 6dB en dessous du pic de gain.

Pourtant, nous avons caractérisé cet amplificateur en facteur de bruit et Gain pour ces longueurs d'onde : à 1490nm il affiche un NF de 8.8dB pour un gain de 14dB ; à 1577nm, il affiche un NF plus faible (7dB) pour un gain également réduit (12.5dB) notamment car la contribution de l'ASE y est plus faible. Le SOA n'amplifie donc pas de la même façon un signal provenant d'un GPON ou d'un 10GPON.

Dans ces conditions, les cartographies de BER en fonction des budgets optiques de départ et d'accès de chaque technologie sont présentées en Figure 133 (a) pour le GPON seul et (b) pour le 10GPON seul.

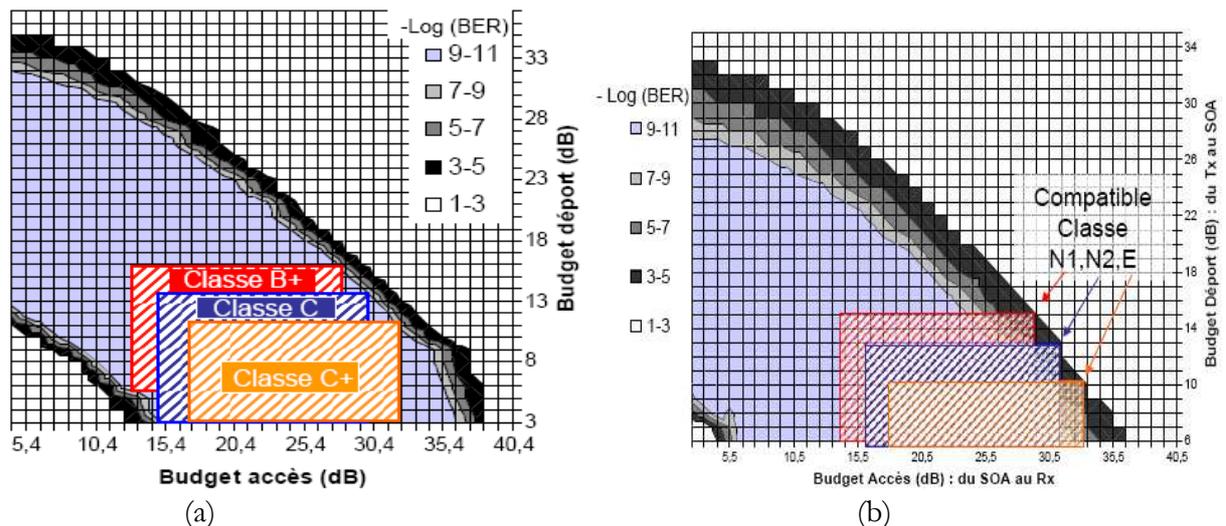


Figure 133 : Cartographies de BER associées aux transmissions GPON seule (a) et 10GPON seule (b) avec le même SOA.

Introduit sur la transmission descendante du GPON seule, ce SOA permet d'étendre un budget accès de type classe B+, C ou C+, par un budget de départ allant respectivement jusqu'à 16dB, 13.5dB et 11dB. Cela représente un budget optique total maximum de 44dB. Ce SOA est alors

moins performant que ceux testés précédemment sur un GPON, puisqu'on ne considère ici que la transmission descendante qui est la moins pénalisante sur le budget optique, comme nous l'avons montré au Chapitre 2 (Figure 73, page 111). Cette "contre performance" est reliée au faible gain et au fort facteur de bruit associés à cet amplificateur à 1490nm.

La performance du SOA amplifiant seulement la transmission descendante d'un 10GPON permet ici de réaliser également un budget total maximum de 44dB, réparti sur un budget d'accès de classe N1, N2 ou E et un budget déport respectivement de 15dB, 13dB et 10dB.

Afin d'observer le comportement de ce SOA amplifiant simultanément les deux technologies, nous avons remesuré les cartographies de BER du lien GPON en présence du signal 10GPON et du lien 10GPON en présence du signal GPON. Ces résultats sont présentés respectivement sur les Figure 134 (a) et (b).

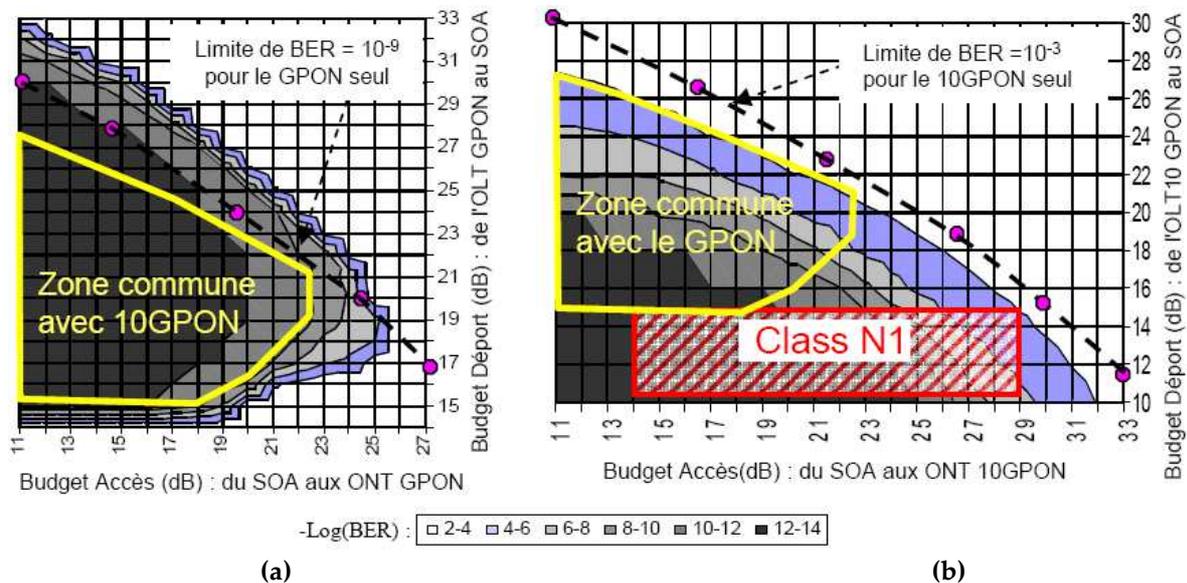


Figure 134 : Cartographies de BER associées aux transmissions simultanées GPON (a) et 10GPON (b), amplifiées par le même SOA.

La cartographie mesurée sur le lien GPON montre qu'il n'est pas possible de conserver un budget d'accès de Classe B+ quand la transmission 10GPON est amplifiée simultanément. La présence du signal à 1577nm a donc détérioré l'amplification de la transmission GPON. Afin de visualiser cette pénalité, la courbe en pointillé reportée sur ce graphe correspond à la limite de la zone de BER inférieur à 10^{-9} pour le GPON seul. On remarque ainsi une forte dégradation pour un budget accès fort ce qui correspond à une forte diminution de l'OSNR à 1490nm en sortie de l'amplificateur, due à la présence du signal à 1577nm.

Concernant les résultats mesurés sur le lien 10GPON en présence du signal GPON, la cartographie de BER montre qu'une architecture de classe N1 est réalisable pour un budget déport de 14,5dB. Ce résultat est similaire à celui obtenu en Figure 133 (b), pour un signal 10GPON amplifié seul par le SOA. La limite à un BER de 10^{-3} du 10GPON amplifié seul par le SOA est reportée sur la Figure 134 (b). En comparant maintenant l'ensemble des résultats obtenus sur 10GPON, on remarque une légère pénalité due à la coexistence du signal GPON dans l'amplificateur. Ces pénalités apparaissent quand la puissance injectée dans l'amplificateur est faible (fort budget déport) et quand l'OSNR est fortement dégradé après amplification (fort budget accès).

On pourrait associer ces phénomènes à plusieurs effets non linéaires présents dans un milieu amplificateur (diaphonie [65], modulation croisée du gain XGM [66] ou Spectral Hole Burning [67]...). Nous ne pouvons à l'instant que constater ces pénalités. Des études plus poussées pour établir des conclusions sur les modalités de ces dégradations devront être menées par la suite.

Ces résultats observés sur GPON et 10GPON sont indissociables les uns des autres. Leurs budget déport et accès varient en même temps et doivent être du même ordre de grandeur pour permettre la convergence d'une telle architecture. Ainsi par corrélation de leurs cartographies de BER, nous avons pu identifier une zone commune où une transmission sans erreur est réalisée sur GPON et 10GPON simultanément. Cela permet d'atteindre un budget accès jusqu'à 20dB pour un budget déport arrivant à 22dB. Cela démontre que la coexistence des transmissions descendantes GPON et 10GPON est réalisable en n'utilisant qu'un seul SOA permettant d'étendre le budget optique total jusqu'à 42dB, mais sans être compatible avec la classe B+ du GPON et la classe N1 du 10GPON.

Enfin, comme l'indique le Tableau 27 (page 166), selon la technologie GPON ou 10GPON utilisée et la classe correspondante (B+ ou N1), les puissances de sortie des OLT diffèrent. Ces écarts de puissances peuvent entraîner des performances fortement différentes surtout quand il s'agit d'amplifier ces signaux par un seul amplificateur où le gain va s'effectuer différemment suivant la longueur d'onde à amplifier mais aussi selon la puissance d'entrée des signaux injectés. Nous avons donc caractérisé cette architecture suivant plusieurs couples de (puissance de) signaux injectés dans le SOA. Ces résultats sont présentés en Annexe 8. On observe le même type de comportement de l'amplificateur, avec un décalage linéaire sur les budgets optiques correspondants à la variation de la puissance injectée. L'écart des puissances émises à l'OLT est alors relativement faible (environ 4dB). Sur cette plage de puissance injectée dans l'amplificateur, celui-ci a un comportement linéaire qui implique ce décalage de budget optique.

Nous pensons que ces performances peuvent être améliorées à l'aide d'un SOA large bande offrant de meilleurs paramètres de gain et facteur de bruit. Seulement, nous allons le constater par la suite, pour obtenir une aussi large bande sur un SOA, une réduction du gain et une augmentation du facteur de bruit sont inévitables.

De nouvelles études doivent être menées afin d'éclairer les modalités du partage de gain du SOA en présence de deux signaux. De plus, afin de maximiser la mutualisation des équipements, il est indispensable de montrer que la coexistence de la transmission montante GPON et 10GPON amplifiée à l'aide d'un seul SOA est possible. L'amplificateur devra être centré autour de 1300nm et avoir une bande passante de 40nm. La contrainte sur la bande passante sera donc moins élevée que pour les signaux descendants, ce qui devrait permettre de conserver un gain et un facteur de bruit suffisamment correct pour amplifier chacune des transmissions sans erreur, comme nous l'avons déjà démontré pour le GPON seul.

Enfin, suite aux derniers travaux de recherche publiés par Mitsubitchi Electric Corporation, il faudrait envisager la mise en œuvre de ce type d'expérimentation pour une transmission montante, avec cette fois des récepteurs bi-débit 1G/10G, conformes au XGPON1. En effet, ce type de récepteur permettra de ne pas différencier, à l'OLT, les modules de réception des transmissions montantes GPON et 10GPON. L'équipe de recherche reporte ainsi un budget optique possible de 33.5dB réalisé sur une transmission montante 1G/10G-EPON et démontre une compatibilité avec la classe PR30 de la norme du 10G-EPON définie par l'IEEE [68 -69].

2. Extension de portée NGPON-2

Nous avons décrit au cours du premier chapitre l'étendue des solutions étudiées dans le cadre du NGPON2 sur un horizon plus lointain que le NGPON1. Elles ont pour point commun d'offrir de meilleures capacités (débit, bande passante par client, portée) au réseau d'accès optique. Ces nouvelles technologies sont basées sur :

- une architecture
 - calquée sur le modèle existant dans le but d'offrir une possibilité de **convergence des topologies et des technologies**
 - complètement ouverte à toute proposition : aucune contrainte de réutilisation de l'infrastructure déjà déployée (zone "verte")
- des techniques de multiplexage différentes :
 - temporel à travers les **PON TDM**
 - en longueur d'onde avec les **PON WDM**
 - en fréquence à travers des techniques de SCM ou OFDM (multiplexage de sous porteuses)
 - par code avec l'OCDMA
- des techniques de modulation variées :
 - modulation d'amplitude de type NRZ
 - modulations vectorielles de type xPSK, QAM
 - modulations du type OFDM, COOFDM, **AMO-OFDM** qui sont en réalité une modulation de phase, associée à un multiplexage fréquentiel. (Par abus de langage, on parle souvent de "modulation OFDM".)

On réalise alors l'ampleur des solutions possibles entrantes dans le cadre du NGPON2 d'autant plus que sa normalisation ne spécifie pour l'instant aucun paramètre lié à ces techniques.

Dans le but d'évaluer l'extension de portée du NGPON2, nous avons choisi d'investiguer les possibilités de l'amplification optique dans le cadre de certaines de ces techniques, à savoir le réseau PON WDM, le multiplexage hybride WDM-TDM et finalement une technique de modulation OFDM.

Enfin, nous allons jauger les capacités de convergence d'architectures étendues de différentes technologies.

2.1. Extension de portée d'un PON WDM

Bien que déployé par certains opérateurs, le PON WDM basé sur un multiplexage en longueur d'onde n'a pas été normalisé. Pourtant, les projets pilotes réalisés proposent le plus souvent un multiplexage de 16 canaux espacés de 1.6nm ou 32 canaux espacés de 0.8nm, modulés à 1.25Gbit/s par longueur d'onde. Chaque longueur d'onde est allouée à un abonné différent. Les performances des émetteurs et des récepteurs permettent une portée de 20km pour un budget optique souvent inférieur à 10dB. (cf Tableau 14, page 71).

De plus, le multiplexage CWDM, proposant des longueurs d'ondes espacées de 20nm, a fait ses preuves depuis le début des années 2000 en montrant un intérêt économique par rapport aux solutions DWDM [70].

On peut d'ailleurs se questionner sur l'augmentation de la portée de tels systèmes. Des solutions bas coût à base d'amplification optique permettraient-elles d'amplifier 32 longueurs d'ondes espacées de 0,8nm ?

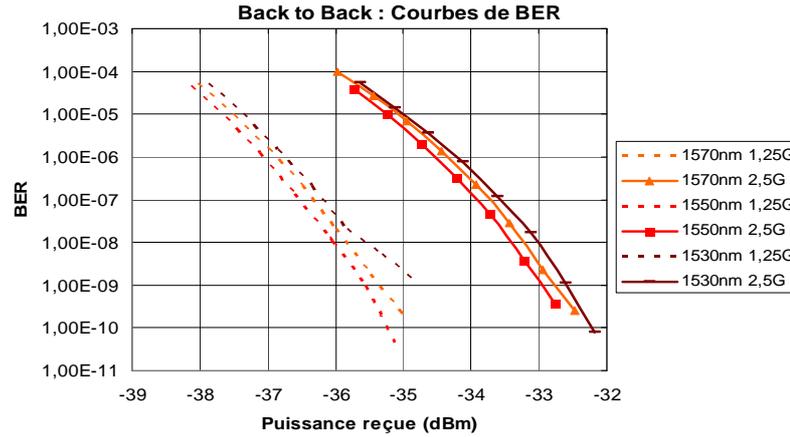
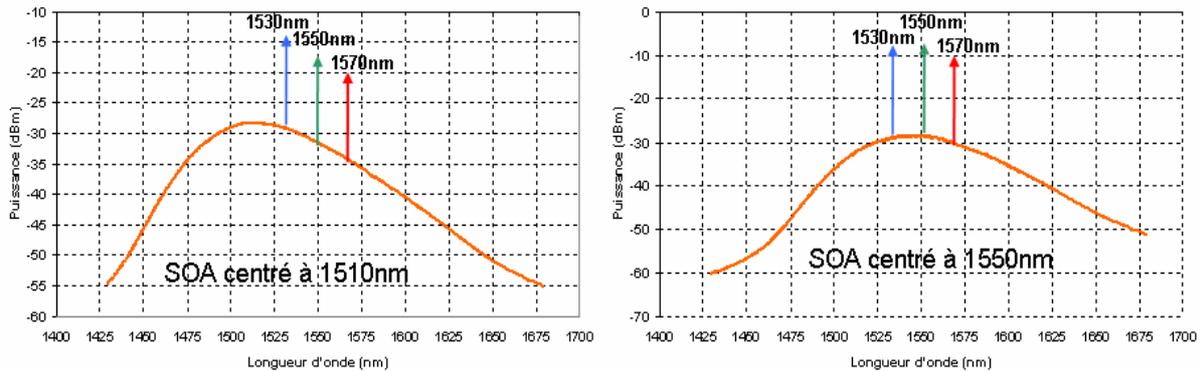


Figure 136 : Caractérisation des émetteurs-récepteurs en back to back

Avant d'évaluer les possibilités d'extension de budget d'un SOA sur une telle architecture, nous avons cherché à observer l'influence des longueurs d'onde transmises sur les paramètres de l'amplificateur (facteur de bruit et gain).

Nous avons choisi d'évaluer la performance de deux SOA dont le maximum de la courbe de gain est situé à 1510nm et 1550nm, amplifiant simultanément, deux longueurs d'ondes espacées de 20nm transmise en sens opposé l'une de l'autre.



* Résolution de l'OSA: 0.1nm

Figure 137 : Spectres des SOA ayant des pics de gain à 1510nm et à 1550nm

Nous avons alterné le couple des longueurs d'onde émises à l'OLT et à l'ONU afin d'observer l'influence du positionnement de ces canaux sur le spectre d'ASE de chaque SOA, comme le montre la Figure 137. Pour chaque couple de longueur d'onde 1570-1550nm, 1550-1570nm, 1550-1530nm, 1530-1550nm, émises respectivement à l'OLT et à l'ONU, nous avons mesuré le facteur de bruit et le gain de cet amplificateur d'après le schéma de mesure de la Figure 138.

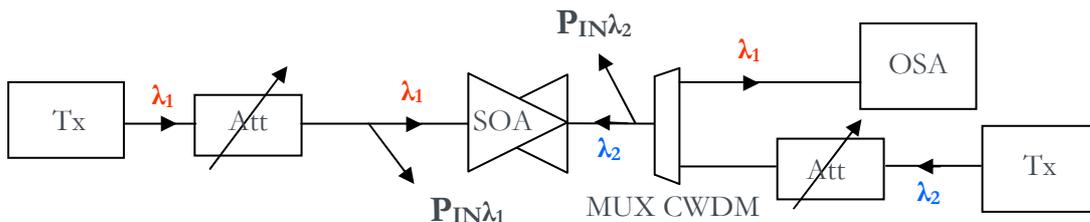


Figure 138 : Schématique de la mesure de NF et Gain d'un SOA amplifiant simultanément une transmission bidirectionnelle

Par la suite, λ_1 est associé à la longueur d'onde descendante et λ_2 à la longueur d'onde montante.

Pour visualiser l'influence de chaque canal, nous avons fait varier la puissance de l'onde injectée dans le SOA pour chaque sens de transmission.

Les courbes de NF et gain résultantes de cette mesure sont présentées en Figure 139, pour le SOA dont le pic de gain est à 1510nm, polarisé à un courant de 250mA, et pour une longueur d'onde descendante λ_1 à 1570nm seule ("unidir") puis en présence d'un signal montant dont la puissance injectée varie.

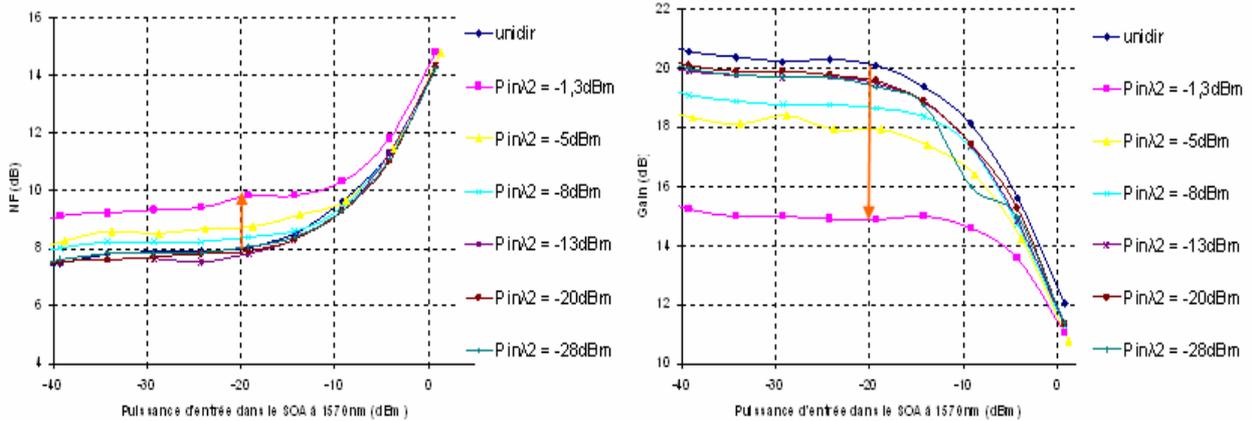


Figure 139 : Courbes de NF et Gain du SOA (pic à 1510nm) pour $\lambda_1 = 1570\text{nm}$ et $\lambda_2 = 1550\text{nm}$

En comparant le NF du SOA en fonctionnement unidirectionnel et bidirectionnel, ces résultats montrent que plus la puissance de la seconde longueur d'onde injectée est élevée, plus le facteur de bruit se dégrade. On passe ainsi d'un NF de 8dB à 9.7dB pour une puissance injectée de -20dBm à λ_1 et -1.3dBm à λ_2 . En prêtant attention aux courbes de gain cette fois, on remarque une perte de gain due à l'amplification "bidirectionnelle" : pour une puissance injectée de -20dBm à λ_1 et la présence de λ_2 avec une puissance injectée de -1.3dBm fait passer le gain de 20dB à 15dB. Ces dégradations sont d'autant plus élevées si les niveaux de puissances des canaux injectés sont déséquilibrés.

On peut donc en déduire une forte dégradation du rapport signal à bruit en sortie d'un amplificateur amplifiant simultanément une transmission bidirectionnelle. Ce comportement est similaire à celui observé lors de l'amplification simultanée de transmissions descendantes GPON et 10GPON. On peut associer ce phénomène à la saturation de l'amplificateur en présence d'un signal injecté fort. En effet, si un des canaux transmis vient saturer le SOA, celui-ci va émettre une forte contribution d'émission spontanée. Cela se reporte alors sur les autres canaux par une dégradation du rapport signal à bruit en sortie de l'amplificateur.

Nous allons à présent évaluer ce SOA en termes d'extension de budget optique sur l'architecture de test présentée précédemment en Figure 135.

Une longueur de fibre de 20km, un SOA et des atténuateurs variables sont insérés entre l'OLT et l'ONU afin d'évaluer le budget étendu possible sur cette architecture. Par similitude avec la classe B+ d'un système GPON, nous avons évalué le budget étendu possible pour des budgets d'accès de 13dB et 28dB. Basé sur des tests de séquence PRBS de longueur 2^7-1 , nous avons dressé sur la Figure 140, les courbes de BER montantes ("UP") et descendantes ("DWN"), en back to back ("B2B") et en présence du SOA fonctionnant en bidirectionnel pour des longueurs d'ondes de 1550nm ("1550") et 1570nm ("1570") et un budget d'accès de 13dB et 28dB. On a ainsi obtenu des budgets étendus indiqués sur la légende de chaque courbe :

- La transmission back to back permet un budget maximum de 35dB sur la transmission descendante et 37,5dB sur la transmission montante.
- Pour la transmission descendante amplifiée, nous avons obtenu un budget étendu de 31,8dB pour un budget accès de 13dB et un budget étendu de 15,4dB pour un budget accès de 28dB.
- Pour la transmission montante amplifiée, des budgets étendus de 29,5dB et 18dB sont respectivement obtenus pour des budgets accès de 13dB et 28dB.

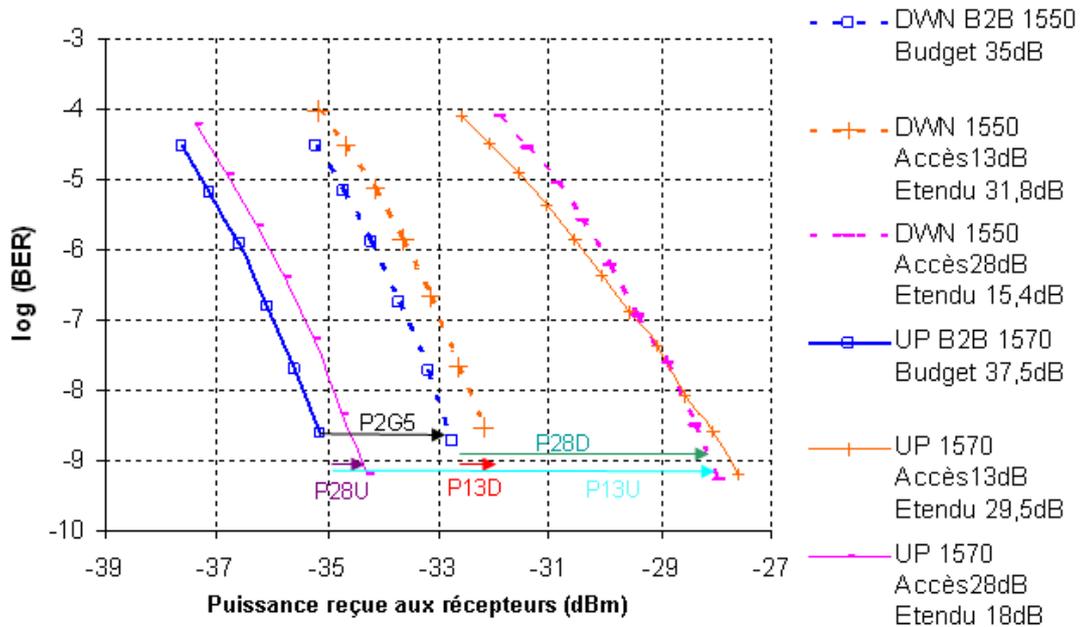


Figure 140 : Courbes de BER d'un SOA en bidirectionnel pour un signal descendant à 2,5Gbit.s & 1550nm et un signal montant à 1,5Gbit/s & 1570nm.

Ces courbes permettent d'observer plusieurs pénalités à un BER de 10^{-9} , liées au fonctionnement bidirectionnel de l'amplificateur, que nous avons différenciées sur ce graphe par leur nom :

- **P2G5** correspond à la pénalité de 2dB, conséquente à la différence de débit et de longueurs d'onde des transmissions montantes et descendantes que l'on remarque de manière plus évidente sur la Figure 136.
- **P13D = 0,7dB** : Cela dénomme la pénalité relevée sur la transmission descendante atténuée de 13dB après le SOA qui a permis d'obtenir un budget étendu de 31,8dB. Le signal descendant est atténué de 31,8dB avant le SOA ($\text{Pin}\lambda_{\text{down}} = -34,3\text{dBm}$) et de 13dB après le SOA. Le signal montant à λ_{up} (1570nm) est atténué de 13dB avant le SOA, ce qui correspond à une puissance injectée $\text{Pin}\lambda_{\text{up}}$ de -15,5dBm.
- **P13U = 7dB** : C'est la pénalité relative à la transmission montante atténuée de 13dB avant le SOA qui a permis d'obtenir un budget étendu de 29,5dB. Le signal descendant subit ces atténuations en sens opposé. Pour le SOA, cela correspond à un point de fonctionnement où $\text{Pin}\lambda_{\text{down}} = -32\text{dBm}$ et $\text{Pin}\lambda_{\text{up}} = -15,5\text{dBm}$.
- **P28D = 4,4dB** : Cette fois le BER est mesuré sur la transmission descendante, atténuée de 28dB après le SOA et qui a permis d'obtenir un budget étendu de 15,4dB. Cela correspond à des puissances injectées dans le SOA où $\text{Pin}\lambda_{\text{down}} = -17,9\text{dBm}$ et $\text{Pin}\lambda_{\text{up}} = -30,5\text{dBm}$.
- **P28U = 0,5dB** : Cette pénalité est associée à la transmission montante atténuée de 28dB avant le SOA où on a pu obtenir un budget étendu de 18dB. Dans cette configuration, au niveau du SOA, on a $\text{Pin}\lambda_{\text{down}} = -20,5\text{dBm}$ et $\text{Pin}\lambda_{\text{up}} = -30,5\text{dBm}$.

Une part de toutes ces pénalités (excepté pour P2G5 qui ne met pas en œuvre d'amplificateur) est également relative à l'insertion du SOA et au bruit d'ASE qu'il apporte sur le récepteur en l'absence de filtrage optique.

Nous avons observé le même type de comportement pour les autres couples de longueurs d'onde CWDM avec ce SOA (pic de gain à 1510nm), mais aussi en amplifiant avec un SOA dont le pic de gain est situé à 1550nm et un SOA linéaire. Les résultats de budget optiques obtenus sont présentés en Annexe 5 (page 212).

En conclusion à cette expérience, grâce à un SOA de gain autour de 20dB, nous avons réalisé une transmission bidirectionnelle, descendante à 2,5Gbit/s et 1550nm, montante à 1,25Gbit/s et 1570nm sur un budget optique total atteignant 43,4dB. On pourrait donc envisager d'amplifier à l'aide d'un seul SOA une transmission bidirectionnelle CWDM [72] mais il s'agit ici d'une première approche sur l'amplification WDM à l'aide d'un SOA amplifiant simultanément deux longueurs d'ondes. Le principe du PON WDM étant d'offrir une longueur d'onde par client, on doit envisager d'implémenter plus de longueurs d'onde dans la bande spectrale d'amplification d'un seul SOA.

De plus, nous avons d'ores et déjà démontré l'existence de pénalités sur le gain et le facteur de bruit de l'amplificateur mais aussi sur le budget optique de la transmission de deux longueurs d'ondes bidirectionnelles. Par la suite, il faudra appliquer ce type de test pour les 16 longueurs d'ondes DWDM préconisées pour un PON WDM. En effet, ces pénalités devraient prendre encore plus d'importance en présence de 32 canaux bidirectionnels, où des phénomènes non linéaires sont nombreux sur la transmission [73, 74] et des interférences inter-canal ou FWM (Four Wave Mixing) [75, 76]) devraient prendre part.

En l'absence de normalisation du PON WDM, ces techniques resteront au stade de travaux de recherche pour des applications du réseau d'accès. Cependant, concernant l'amplification de réseau WDM, nous pouvons facilement nous reporter aux travaux déjà menés sur les réseaux longues distances en utilisant des EDFA pour amplifier des longueurs d'onde DWDM aujourd'hui espacées de 0,8nm [77,78].

Enfin, concernant l'amplification de canaux WDM avec des SOA, on voit plus souvent apparaître des amplificateurs réfléchissants dans le cadre d'un multiplexage hybride WDM-TDM que nous avons également mis en œuvre et dont nous rendons compte au paragraphe suivant.

2.2. PON hybride WDM-TDM

Un PON TDM reste peu coûteux par abonné car il partage une seule longueur d'onde entre de multiples clients. Cependant, le sacrifice se fait inévitablement sur la bande offerte à chaque abonné : le nombre typique d'utilisateurs est par exemple limité à 64 pour une technologie GPON.

Un PON WDM, quant à lui, permet d'allouer l'ensemble de la bande passante disponible sur une longueur d'onde à un seul client. Il offre également une grande sécurité et une transparence au protocole. Le PON WDM restant plus coûteux par ses composants, il peut être considéré une fois qu'il sera optimisé, comme la solution pour la future génération de PON qui succèdera au GPON et au GEAPON. C'est pourquoi plusieurs études sont menées afin de combiner TDM et WDM pour un déploiement dans un futur proche [79, 80, 81, 82].

Un réseau PON hybride WDM/TDM, qui combine le WDM et le TDM PON a été introduit. Il permet d'augmenter le nombre d'ONU, tout en conservant une grande bande passante. Comme dans tout réseau d'accès, augmenter la distance de transmission entre OLT et ONU, ou augmenter le taux de partage TDM, impliquera des pertes. Pour compenser celles-ci, il est nécessaire d'introduire un amplificateur.

Nous avons envisagé une architecture utilisant des RSOA (Reflective Optical Semiconductor Amplifier), placés dans un ONU. La lumière est émise par l'OLT puis réfléchi et remodulé par le RSOA à l'ONU. L'intérêt est d'avoir en plus de l'amplification un fonctionnement achromatique des ONU (Cf. Chapitre 1, section 3.3.2.1, page 71).

2.2.1. Réseau Hybride PON WDM/TDM basé sur des RSOA

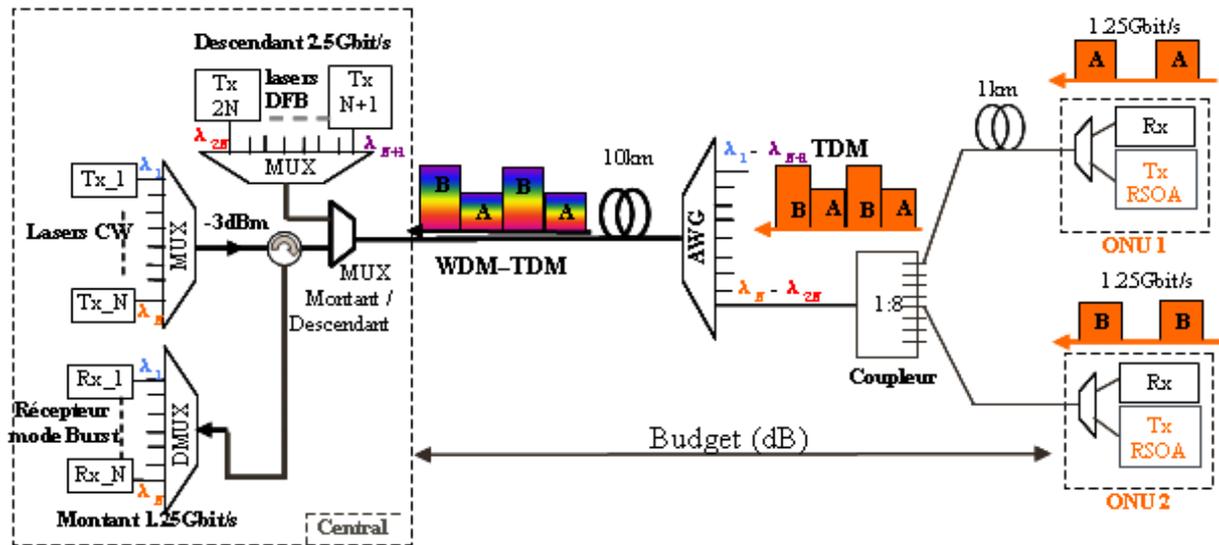


Figure 141 : Architecture d'un réseau hybride PON WDM-TDM

Un réseau hybride mixant WDM et TDM a été conçu tel que le montre la Figure 141. Pour décrire cette architecture, il faut comprendre le rôle de l'AWG (Arrayed Waveguide Gratings), des RSOA et du coupleur. Chaque source laser continue au central fait office de porteuse à différentes longueurs d'onde auxquelles on associe un arbre PON. Ainsi, chaque arbre PON TDM fonctionne à une longueur d'onde différente. L'AWG permet le multiplexage des différents arbres PON en associant par ports les deux longueurs d'onde descendante et montante. Les RSOA, placés au niveau ONU, ont pour fonction de moduler les signaux provenant des sources lasers continues, de réfléchir ces signaux et enfin de les amplifier. Ils forment ainsi des signaux montants amplifiés, modulés à 1,25Gbit/s, que l'on vient multiplexer temporellement par un coupleur 1 vers N. C'est la partie TDM du réseau.

La problématique de la mise en œuvre d'une telle architecture et de ses composants a été étudiée préalablement dans le cadre de la thèse de F. Payoux [83].

Lors de notre expérimentation, nous n'avons testé qu'un seul arbre PON WDM-TDM à 1550nm en présence de deux ONU. Pour détailler techniquement l'architecture, voici les caractéristiques de chaque élément du réseau. Au central se trouvent la source laser continue (CW) qui va servir de porteuses pour la formation des signaux montants à 1550nm. Le circulateur permet de diriger l'aller-retour de ce signal. La réception de ces signaux se fait également au central par une photodiode APD mode burst de sensibilité -31dBm à 1550nm et 1,25Gbit/s. Les signaux

descendants, émis au central par des lasers DFB sont modulés à 2,5Gbit/s et reçus par les ONU par une photodiode APD ou PIN. En ligne, la propriété passive du PON a été conservée puisqu'on utilise uniquement des éléments passifs : un AWG athermique de 32 canaux d'ISL (Intervalle Spectral Libre) 0,8nm, un coupleur 1 vers 8 et une fibre monomode d'atténuation linéique 0,2dB/km qui va traduire l'augmentation de portée en présence de possible rétrodiffusion de Rayleigh. Celle-ci est liée à l'interaction lumière-molécules de Silices entraînant une diffusion du signal se propageant dans la fibre. Ce phénomène et ses conséquences sur notre architecture ont fait l'objet d'études détaillées dans la thèse de doctorat de Zineb Belfqih [61].

Au niveau ONU, les RSOA utilisés sont des modules de type SFF (Small Form Factor), compatibles avec une modulation en mode burst à 1,25Gbit/s. Dans un premier temps, nous les avons caractérisés pour différentes longueurs d'onde de la bande C. Ces courbes sont présentées en Annexe 9. Leur spectre est centré autour de 1550nm avec une bande passante à -3dB d'environ 40nm. A 1550nm, les RSOA ont un gain de 19dB et un NF (Noise Factor) de 9dB pour une puissance d'entrée de -25dBm.

Résultats expérimentaux obtenus

L'expérience est réalisée en présence de deux RSOA ONU qui modulent, en mode burst, le signal montant à deux intervalles de temps différents. Les paquets sont formés de 128 bits d'entête et d'une succession de séquences PRBS 2^7-1 (Pseudo Random Bit Sequence), pour une longueur de 4992 bits, soit une durée totale d'environ 4µs.

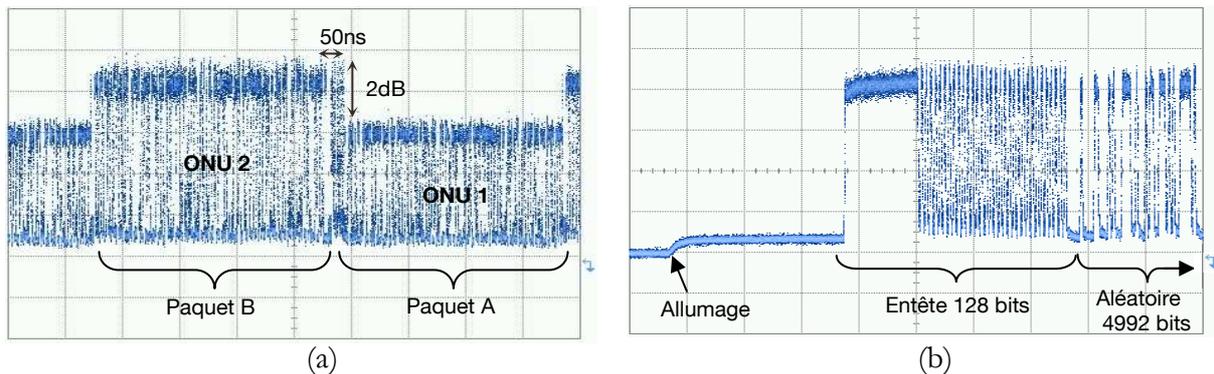


Figure 142 : Image des paquets modulés par les RSOA : (a) paquets A et B ; (b) réglage de l'allumage du RSOA

Pour limiter les effets de la rétrodiffusion de Rayleigh, nous avons imaginé une architecture avec deux fibres dans la partie transport : on insère entre le circulateur et la réception du signal montant, une fibre de 10km.

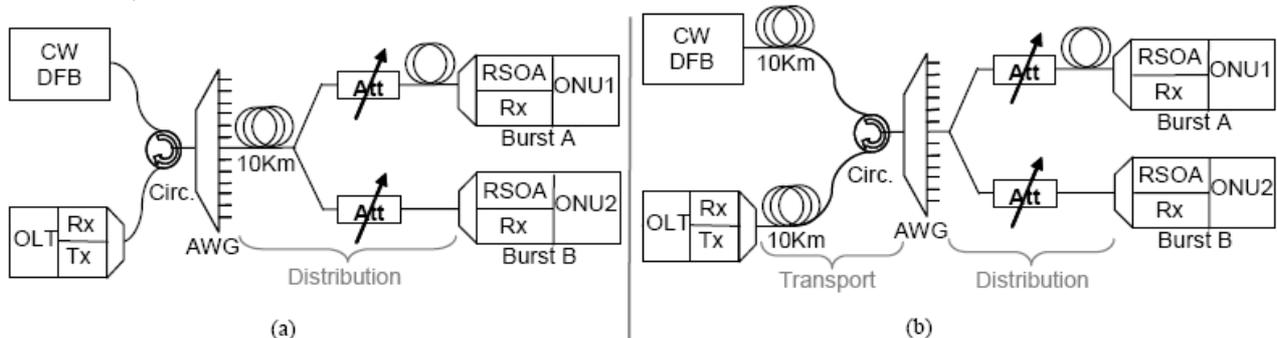


Figure 143 : Architecture avec 10 km de fibre en distribution (a) et double fibre en transport (b)

Ainsi l'isolation du circulateur empêche la rétrodiffusion de Rayleigh de perturber la transmission en ligne. Nous avons également ajouté une fibre de 10km entre la source continue et l'autre branche du circulateur pour équilibrer la position du central. La Figure 143 schématise cette architecture (b) et celle avec une fibre en distribution (a).

Le signal continu provient d'une source accordable réglée pour accorder ses longueurs d'onde à l'AWG. Les pertes d'insertions cumulées sur l'architecture s'élèvent à 15dB. Des atténuateurs variables sont insérés en ligne afin de simuler le budget étendu pour chacun des ONU. La puissance optimale injectée dans le RSOA est de -19,5dBm pour l'ONU1 et -20,9dBm pour l'ONU2. Ce point de fonctionnement du RSOA garantit un taux d'erreur binaire inférieur à 10^{-9} , mesuré à la réception de l'OLT et signe d'une transmission considérée sans erreur. On obtient ainsi un budget étendu de 22dB auquel correspondent les courbes de BER présentées en Figure 144.

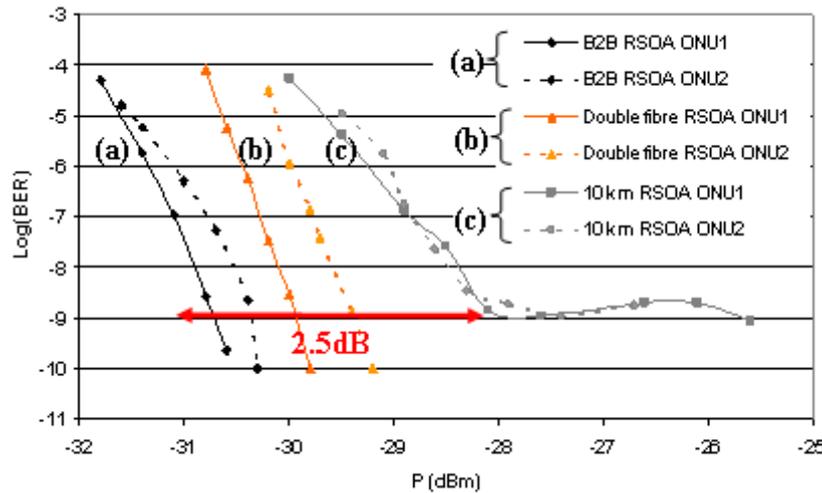


Figure 144 : Courbes de BER d'un ONU

Les courbes (a) représentent les mesures en Back to Back, c'est-à-dire l'architecture testée sans les 10km de fibre. On note que la sensibilité à 10^{-9} , du récepteur à l'ONU1 est de -30,8 dBm et -30,4dBm pour l'ONU2. On obtient dans cette configuration un budget total de 22dB pour l'ONU1, et 20,4dB pour l'ONU2. En insérant une fibre de 10km dans la partie distribution (courbes (c)), on obtient un budget de 21,5dB. On remarque que la fibre introduit une pénalité de 2,5dB, mais on observe également un plancher pour un BER de 10^{-9} . Cela s'explique par les effets de la rétrodiffusion de Rayleigh [84]. Avec les doubles fibres dans la partie transport, on obtient les courbes (b), pour lesquelles on a un budget de 20,9dB pour l'ONU1 et 22.5dB pour l'ONU2 pour un BER $<10^{-9}$. Ce budget permet l'insertion de l'AWG à 32 canaux (3dB), le coupleur 1 vers 8 (10dB) et 40km de fibre SMF (8dB).

Nous avons démontré que l'on peut réaliser une transmission sans erreur, sur une distance de 40km et pour 32×8 ONU soient 256 clients, avec des ONU achromatiques fondés sur des RSOA.

Depuis cette étude réalisée en 2007, des équipes de recherche ont amélioré ces résultats à l'aide d'amplification Raman, réalisant ainsi une transmission à 2,5Gbit/s sur 60km de fibre pour un potentiel de 1024 abonnés sur un PON hybride [85].

Un réseau hybride WDM-TDM basé sur des RSOA s'avère donc être un choix envisageable pour la nouvelle génération de réseau d'accès optique [86].

Dans le cadre du projet européen SARDANA [28], plusieurs études ont intégré ce type d'architecture pour la conception d'un réseau passif à base d'anneau et distribué en arbre PON [87, 88, 89].

Des études concernant l'amplification active [90] ou passive [91,92] en ligne pour ce type d'architecture ont également été expérimentées. Un amplificateur à fibre dopée à pompe déportée (Remotely Pumped Optical Amplifier) peut être intégré sur une architecture PON, tout en conservant le caractère passif du réseau puisque la partie active de l'amplificateur, à savoir la pompe, se trouve déportée au central. Ce signal de pompe est atténué entre le central et la position de l'amplificateur. Cette distance est liée au budget optique maximum de déport possible. Elle impose l'émission de fortes puissances optiques ($>20\text{dBm}$) à l'OLT. Ce type d'amplificateur est disponible dans une bande d'amplification autour de 1550nm et n'est pas utilisable dans les architectures GPON actuelles. Il sera néanmoins tout à fait adéquat pour une migration vers un PON à multiplexage hybride WDM-TDM. Les performances relevées à l'heure actuelle, montrent un budget total de 50dB, réparti entre un budget déport allant de 0 à 18dB et un budget d'accès de 17 à 32 dB [93].

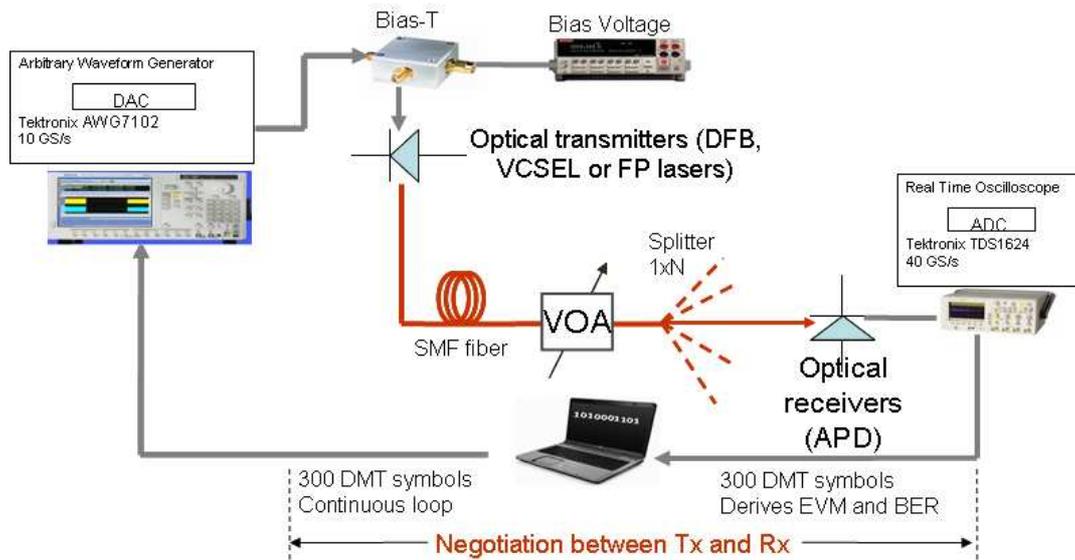
Enfin, ce type d'architecture WDM-TDM fait également partie d'études similaires avec des formats de modulation du type OFDM [94, 95].

2.3. Amplification d'une transmission OFDM

Les futures générations de réseaux d'accès optique, discutées au sein des groupes de normalisation du FSAN ou de l'IEEE, présentent deux objectifs principaux. D'une part, il est nécessaire d'augmenter le débit global jusqu'à 10Gbit/s dans le but de fournir plus de bande passante par client FTTH. D'autre part, on cherche à augmenter la portée et l'éligibilité d'un PON, pour fournir un accès FTTH à plus de clients tout en minimisant les coûts de déploiement. L'objectif étant décrit au chapitre 1 section 3.3.3 (page 73), de récentes activités de recherche en réseau d'accès se concentrent sur le multiplexage fréquentiel AMO-OFDM (Adaptively Modulated Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing). En effet, cette solution permet de multiplier les débits de transmission tout en conservant des composants à basse bande passante RF (Radio Fréquence). En associant cette technique de multiplexage avec de l'amplification optique, cela permettrait de répondre aux exigences de haut débit et longue portée des futures générations de réseau d'accès optique.

2.3.1. Performances des lasers DFB et photodiode APD

Un signal OFDM électrique est généré par un AWG (Arbitrary Waveform Generator). La séquence originale de données est divisée en plusieurs voies parallèles ayant un débit plus faible. Les données dans chacune de ces voies est mappé selon un schéma m-QAM ($m=2,4,8,16,32,64,128$) et module une sous porteuse. Ce démultiplexage permet premièrement de diminuer les effets de la réponse fréquentielle du canal (chaque sous porteuse est soumise à une réponse quasi-plate) et deuxièmement d'optimiser l'occupation de la bande disponible (grâce à l'orthogonalité entre les sous porteuses). L'OFDM a aussi pour avantage de pouvoir être implémenté via l'IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Pourtant, dans les transmissions en bande de base, la source laser doit être modulée par un signal purement réel. Ce signal peut être créé par symétrie hermitienne où une moitié des entrées de l'IFFT doit avoir les complexes conjugués des symboles de données. Une description de la modulation et démodulation OFDM est fournie en Annexe 10.



*DAC: Digital-to-Convertisseur analogique ; ADC: Analogue-to-Digital Converter

Figure 145 : Schéma d'une transmission AMO-OFDM basé sur une architecture TDM PON

Ainsi créé, ce signal OFDM va moduler électriquement les lasers utilisés. Ensuite, comme l'indique la Figure 145, le signal OFDM optique est transmis vers le récepteur. Un atténuateur variable et une fibre monomode dont la longueur variera par la suite sont insérés sur l'architecture afin d'estimer le budget optique possible sur la transmission.

Ce signal est ensuite reçu par une photodiode APD ou PIN avant d'être converti par un convertisseur A/D (Analog to Digital) afin de démoduler le signal OFDM reçu. Aucune compensation de dispersion chromatique n'est mise en œuvre dans cette configuration.

Afin d'évaluer le débit possible sur une liaison OFDM ou plus exactement AMO-OFDM, nous avons choisi de tester deux types de transmission :

- la première utilise un laser DFB que l'on nommera par la suite DFB1 et d'une photodiode APD de bande passante RF 2.5GHz, nommée APD2.5.
- la seconde transmission est réalisée par un laser DFB de 6,9GHz de bande passante RF, et d'une photodiode APD à 8GHz notés respectivement par la suite DFB6.9 et APD8.

Les lasers utilisés dans cette expérience sont disponibles commercialement. Ils ont pour point commun d'émettre à une longueur d'onde de 1540nm. L'AWG a une bande passante de 5GHz.

Afin de réaliser la meilleure transmission possible, les paramètres liés à la modulation AMO-OFDM de chacun des lasers utilisés ont été optimisés. Cela a fait l'objet des travaux de stage de Chloé Million et de thèse de Thanh Nga Duong [96, 97].

Performances optiques de la transmission

Ayant fixé les paramètres précédents, nous avons caractérisé une liaison suivant plusieurs critères. Tout d'abord la transmission est considérée sans erreur quand le BER est inférieur à 1.10^{-4} avec un FEC à la réception qui ramènera ce BER à 1.10^{-10} . Nous avons donc évalué les débits possibles pour chaque combinaison d'émetteur-récepteur avec cet objectif de BER. Les résultats sont présentés en Figure 146.

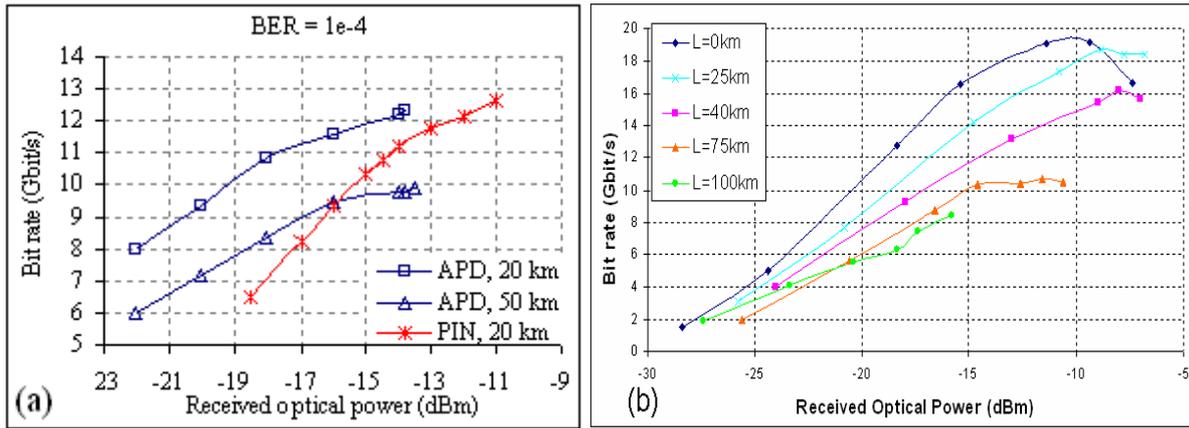


Figure 146 : Evolution du débit OFDM à BER fixe (1.10^{-4}) pour les couples DFB1+APD2.5 [97] (a) et DFB6.9 et APD8 (b)

Pour le laser DFB1 et un récepteur APD2.5 et PIN, (Figure 146 (a)), les débits maximum atteints sont similaires avec l'APD ou la photodiode PIN mais avec une meilleure sensibilité pour la photodiode APD. Pour le couple DFB1 et APD2.5, on a ainsi un débit maximum de 12.3Gbit/s. A plus haute bande passante, c'est à dire pour le couple DFB6.9 et APD8, on obtient un débit supérieur qui atteint 19.3Gbit/s. Nous avons également fait varier la longueur de fibre sur ces liaisons et constater que plus la fibre est longue, plus le débit maximum s'affaiblit. Ceci est lié à la dispersion chromatique.

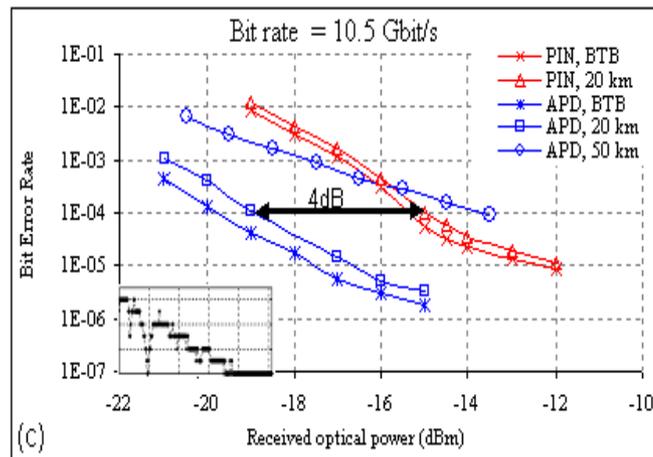


Figure 147 : Evolution du BER à débit fixe (10.5Gbit/s) pour le couple DFB1+APD2.5 en Back to Back ou en présence de 20km, et 50km de fibre [97]

De plus, nous avons évalué la performance de cette transmission en mesurant la variation du BER en fonction de la puissance reçue à la photodiode à un débit cible de 10Gbit/s. La Figure 147 présente ces résultats avec l'émetteur DFB1 et récepteurs APD2.5 et PIN. On en retiendra que la sensibilité de la photodiode APD2.5 à 10Gbit/s, à un BER de 10^{-4} est de -19.7dBm en back to back et que celle de la photodiode PIN est de -15.5dBm. La photodiode PIN est moins performante en budget optique que l'APD, on a donc écarté ce récepteur pour la suite des études réalisées.

Nous avons réalisé le même type de mesures pour le couple laser DFB6.9 et APD8. Une sensibilité de -20.5dBm est mesurée pour la photodiode APD8 à 10Gbit/s ($BER=1.10^{-4}$).

2.3.2. Insertion de l'amplification optique

Comme l'a décrit le chapitre 1, le principe d'un OFDMA PON n'est pas encore normalisé. Il nous est donc impossible de définir un sens de transmission (montante ou descendante) sur notre liaison qui est ici unidirectionnelle. Similairement à nos précédents travaux sur l'amplification de GPON, présentés au chapitre 2, nous allons désormais chercher à étendre le budget optique d'une transmission OFDM, en l'occurrence celle présentée au paragraphe précédent. Nous avons choisi de tester deux types d'amplificateurs optiques, un SOA et un EDFA afin d'observer leurs comportements respectifs. L'architecture schématisée en Figure 148 a donc été mise en place. A défaut de pouvoir différencier le budget accès et le budget déport, nous avons défini le lien optique avant amplification comme le "tronçon 1".



Figure 148 : Schéma d'expérience de l'amplification d'une transmission OFDM

Après ce premier tronçon, le signal OFDM est amplifié via un SOA ou un EDFA. Ensuite, le signal OFDM amplifié traverse de nouveau un atténuateur variable et de la fibre monomode, constituant le tronçon 2 de la liaison optique. Aucun filtrage optique n'a été inséré pour limiter le bruit d'ASE reçu par la photodiode.

Caractéristiques des amplificateurs SOA et EDFA

La figure suivante présente les résultats de la caractérisation du NF et du gain des amplificateurs en fonction de leur puissance injectée.

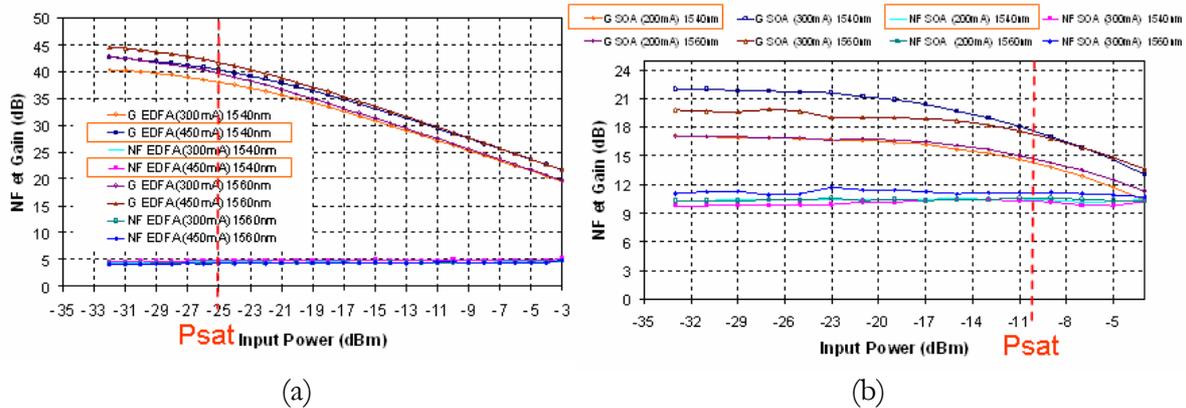


Figure 149 : Courbes de NF et Gain de l'EDFA (a) et du SOA (b)

Nous avons optimisé les performances de l'EDFA pour un courant de pompe de 450mA. Sa bande spectrale optique est large de 35nm, centrée à 1548nm. Pour la longueur d'onde qui nous intéresse, i.e. 1540nm, la puissance de saturation en entrée est de -25dBm, son NF de 4dB et son gain est de 40dB à une puissance d'entrée de -30dBm.

Nous avons optimisé les performances du SOA à un courant de polarisation de 200mA. Il a une bande spectrale optique large de 50nm, centrée à 1560nm. D'après la Figure 149, à 1540nm, sa puissance de saturation en entrée est de -10dBm, son facteur de bruit de 10dB associé à un gain de 17dB pour une puissance d'entrée de -30dBm.

Après avoir mis en œuvre, optimisé et testé la transmission AMO-OFDM, nous allons observer le comportement et évaluer les performances de ces amplificateurs SOA et EDFA, suivant la bande passante RF de la liaison optique définie précédemment :

- 2,5GHz qui permettrait de réaliser une transmission jusqu'à 10Gbit/s (DFB1 + APD2.5)
- 5GHz qui permettrait de réaliser une transmission de l'ordre de 20Gbit/s. (DFB6.9 et APD8)

2.3.3. Comportement de l'amplification jusqu'à 10Gbit/s

Nous avons inséré un amplificateur optique entre le laser DFB1 et la photodiode APD2.5. Premièrement avec un SOA et ensuite avec un EDFA, nous avons tout d'abord évalué le débit réalisable sans erreur de transmission ($BER < 10^{-4}$), puis nous avons mesuré le budget possible à certains débits sur ces deux systèmes.

2.3.3.1. Evaluation du débit possible à un BER de 10^{-4}

Le laser DFB1 émet une puissance optique de 2.4dBm. Pour plusieurs budgets optiques du tronçon 1, donc plusieurs puissances injectées dans les amplificateurs, nous avons mesuré le débit atteint pour une transmission considérée sans erreur donc à un BER de 10^{-4} , en fonction de la puissance reçue à la photodiode APD2.5. Les résultats de ces mesures avec un SOA et un EDFA sont présentés respectivement en Figure 150 (a) et (b).

A partir de ces mesures nous avons pu retracer ces courbes en fonction du budget optique de chaque tronçon donc en fonction du budget optique total, d'où les courbes présentées en Figure (c) pour le SOA et en (d) pour l'EDFA.

Nous allons voir que ces deux types de courbes permettent d'afficher plusieurs comportements des amplificateurs.

Tout d'abord, quel que soit l'amplificateur on remarque que chaque courbe suit relativement la même forme "en cloche" que celle de la liaison sans amplificateur. En effet, il apparaît que la photodiode a une puissance de saturation qui s'élève rapidement avec le débit.

Ensuite on remarquera que contrairement à l'EDFA qui atteint un débit maximum pour (environ) la même puissance reçue à l'APD, avec un SOA, le débit maximum est atteint pour une puissance reçue croissante avec la puissance injectée dans le SOA. Il y a donc une pénalité due à l'insertion du SOA, que l'on pourrait associer au fait que le SOA apporte un bruit important qui vient dégrader le rapport signal à bruit du signal OFDM optique et donc le débit possible.

Ensuite, quand les amplificateurs sont en régime non saturé ($P_{inEDFA_{sat}} < -25dBm$; $P_{inSOA_{sat}} < -10dBm$), on n'observe aucune pénalité sur la puissance reçue mais une perte du débit maximum, quel que soit l'amplificateur.

Finalement, avec un SOA, nous observons une perte de 2.3Gbit/s sur le débit maximum atteint, que l'on pourrait attribuer en partie au bruit d'ASE de l'amplificateur (NF élevé) mais aussi à la réponse temporelle de l'amplificateur.

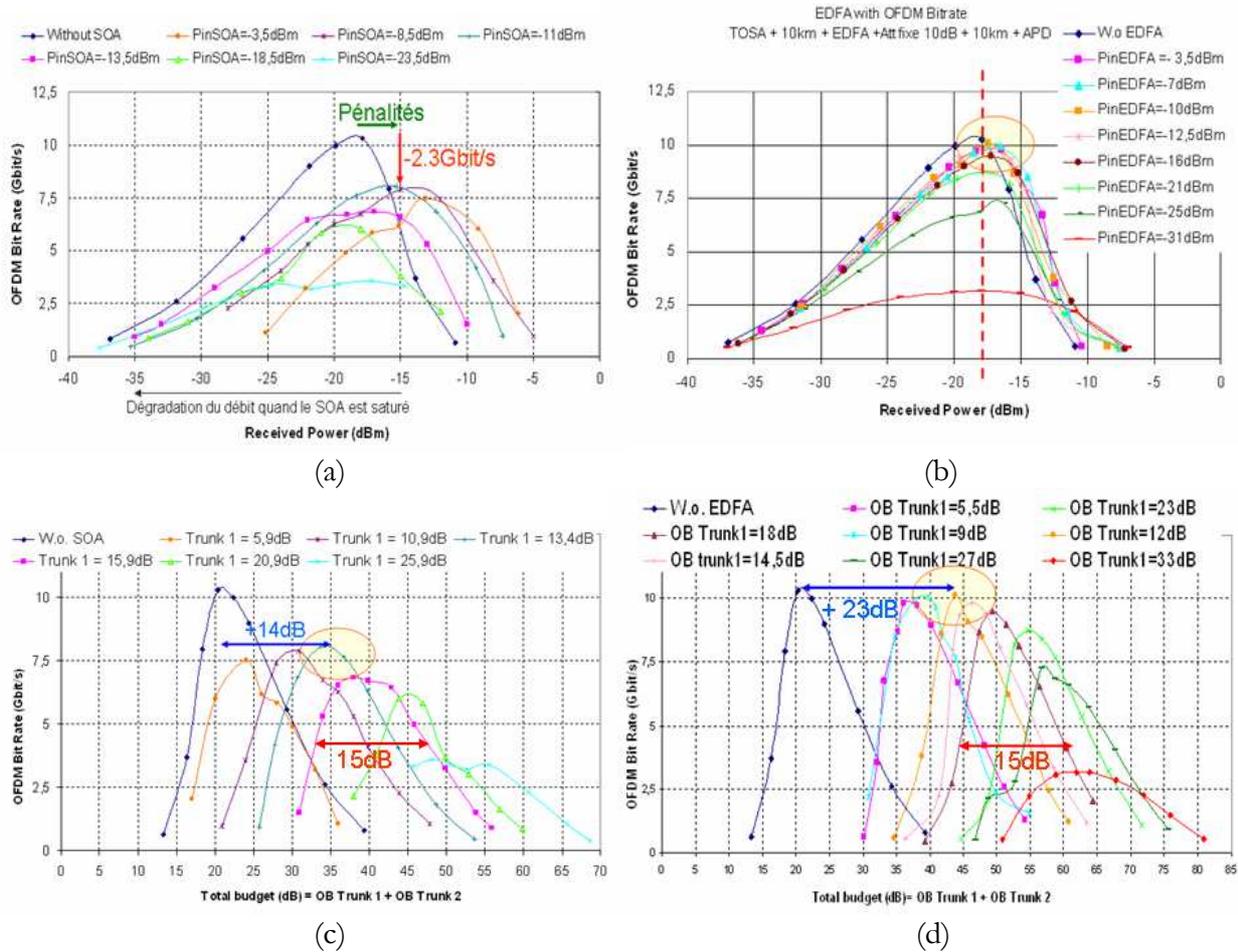


Figure 150 : Débits OFDM atteints à un BER de 10^{-4}
 - en fonction de la puissance reçue à l'APD avec un SOA (a) et un EDFA (b)
 - en fonction du budget optique total avec un SOA (c) et un EDFA (d)

N.B 1 : Les puissances reçues à l'APD sont mesurées sur le pic laser à l'OSA et ne prennent donc pas en compte la part de puissance d'ASE que la photodiode reçoit sur toute sa bande de réception.

N.B 2 : Nous avons inséré un atténuateur fixe de 10dB pour protéger la photodiode d'un éblouissement fatal qui pourrait survenir avec le fort gain de l'EDFA. Cet atténuateur est pris en compte dans le calcul du budget optique.

2.3.3.2. Mesure le l'impact du bruit d'ASE

Afin d'évaluer l'impact du bruit d'ASE sur la transmission avec un SOA, nous avons introduit des filtres optiques dans l'architecture :

- un filtre large de 5nm, de bande passante [1536-1541] nm, de pertes d'insertion IL= 0.6dB
- un filtre Gaussien centré à 1539nm, de largeur 1nm à -3dB et 12nm à -20dB et IL=3dB
- un AWG, de bande passante 0.8nm centré au pic laser ; IL= 6dB

Pour le cas d'une puissance injectée dans le SOA de -11dBm (meilleur résultat de débit), nous obtenons les résultats présentés en Figure 151 en fonction du budget optique total.

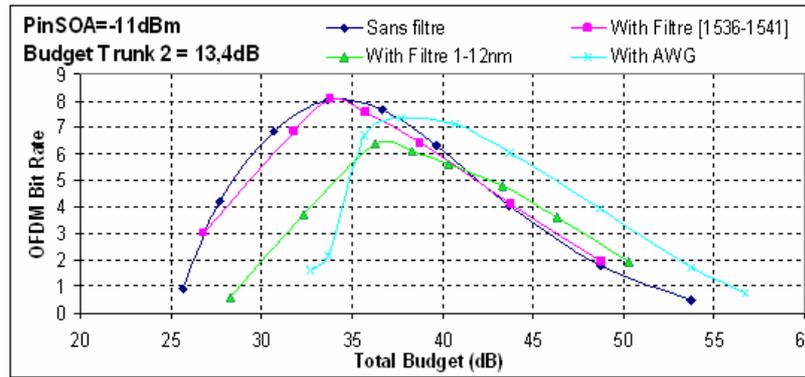


Figure 151 : Débit OFDM en fonction du budget optique total à un BER=10⁻⁴, selon plusieurs types de filtre : 5nm, Gaussien ou AWG.

On remarque sur cette courbe que l'insertion des filtres n'apporte aucune amélioration du débit. Au contraire, un filtre trop fin réduit le débit maximum obtenu sans filtre. Le débit maximum est pourtant toujours atteint pour une même puissance reçue à la photodiode, donc pas pour le même budget optique, à la différence que les pertes de chaque filtre sont intégrées dans le calcul du budget total affiché sur ces courbes.

Le filtre le plus large (5nm) ne pénalise pas le débit de la transmission mais n'améliore pas non plus le budget optique total. On ne peut donc pas relier le bruit d'ASE aux pénalités de débit et de budget signalées sur la transmission OFDM avec SOA.

Les causes de ces pénalités restent donc indéterminées pour l'instant. D'autres investigations devraient mettre en évidence plusieurs des phénomènes susceptibles d'expliquer ce comportement et notamment l'impact du filtrage optique. A-t-il un lien avec la réponse fréquentielle non linéaire du filtre ? Des tests avec un filtre flat top et un autre filtre gaussien et un AWG avec moins de pertes d'insertion devraient apporter des éléments de réponse. De même, il serait intéressant d'observer l'évolution et l'impact de l'OSNR en entrée et en sortie de l'amplificateur sur les courbes précédentes. Cela devrait pouvoir expliquer certaines dégradations. Une étude sur l'importance de la puissance RF à la réception, et notamment le PAPR (Peak to Average Power Ratio) devrait également éclaircir certains points qui permettront d'améliorer les performances de l'amplification de signaux OFDM.

Pour l'instant, sans filtre, en termes de budget optique, on obtient donc au mieux un gain sur le budget optique total de 14dB à 8Gbit/s avec un SOA et de 23dB à 10Gbit/s avec l'EDFA. Par exemple, avec l'EDFA, cela permet de réaliser une transmission à 10Gbit/s sur 43dB de budget optique avec des composants de 2,5GHz de bande passante RF, donc des composants moins coûteux que ceux d'une transmission à 10Gbit/s en NRZ.

Cependant, pour calquer l'architecture GPON, on souhaiterait disposer d'une variation de 15dB de puissance entre un client proche et un client éloigné. Dans ce cas, du fait de la forme en cloche des courbes, le débit serait limité à 4Gbit/s pour assurer une bonne transmission avec ou sans amplificateur.

Finalement, on a remarqué au paragraphe précédent que l'influence de la dispersion chromatique est importante. On se doit donc de traiter ce point plus en détail.

2.3.3.3. Evaluation du budget possible à débit fixe

Grâce à tous ces résultats, considérant un compromis entre budget optique et débit, nous pouvons imaginer une application de cette technique pour le futur réseau d'accès optique. On

prend comme hypothèse qu'un OFDMA PON va calquer ses classes de budget optique sur celle du GPON, en particulier du côté accès (client), avec par exemple une classe B+ définie pour un budget optique d'accès de 13 à 28dB. Afin de vérifier la comptabilité de notre transmission avec cette classe, nous avons mis en place une expérience qui permet de mesurer le BER en fonction du budget optique à certains débits cibles. Similairement à l'étude faite sur l'extension de GPON, cela nous a permis de dresser des cartographies de budget optique en fonction du BER.

Avec un SOA

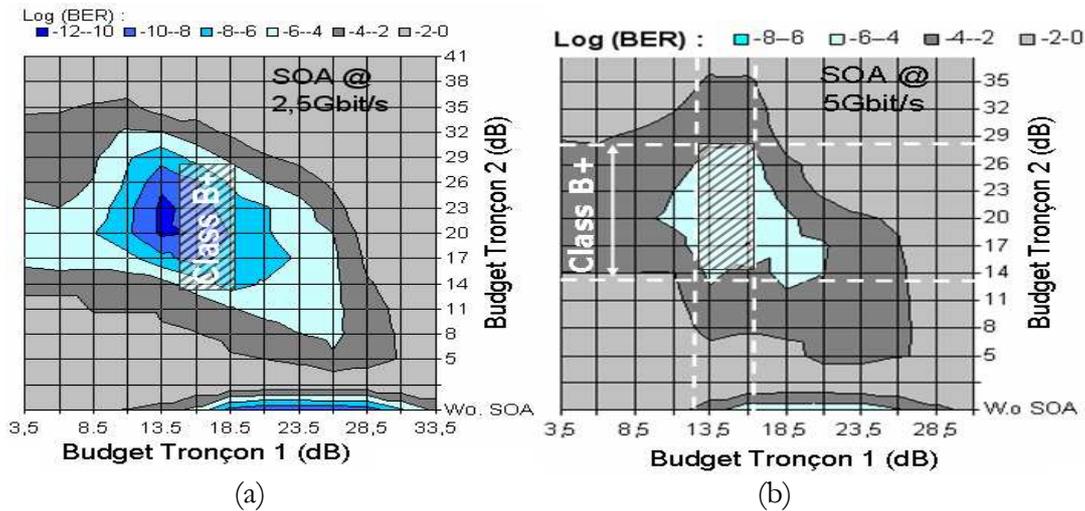


Figure 152 : Cartographie de budget optique en fonction du BER à 2.5Gbit/s (a) et 5Gbit/s (b) avec SOA

La figure précédente présente les résultats obtenus avec un SOA à 2.5Gbit/s et 5Gbit/s. On définit la zone de fonctionnement pour un BER < 1.10⁻⁴ correspondant aux zones claires des cartographies.

Quel que soit le débit, on remarquera tout d'abord qu'un budget de classe B+ n'est pas possible sur le tronçon 1, ce qui implique que ce tronçon 1 ne pourra pas être considéré comme une architecture d'accès mais que son budget peut être assimilé à du budget de déport. Dans cette configuration, le SOA ne peut alors amplifier que le sens descendant d'un PON OFDMA.

Par contre ces résultats montrent qu'il est possible d'obtenir un budget de classe B+ sur le tronçon 2 :
 à 2.5Gbit/s pour un budget tronçon 1 de 15.7dB à 18.7dB
 à 5Gbit/s pour un budget tronçon 1 de 12dB à 16dB.

Dans cette configuration, le SOA ne peut amplifier uniquement que le sens descendant d'un PON OFDMA.

Avec un EDFA

La Figure 153 présente les résultats obtenus avec un EDFA à 2.5Gbit/s, 5Gbit/s et 7.5Gbit/s. La zone de fonctionnement est toujours définie pour un BER < 1.10⁻⁴.

On remarquera tout d'abord que comme pour le SOA, la transmission à 7.5Gbit/s n'est pas compatible avec une classe B+. L'EDFA apporte un fort gain sur le budget du tronçon 1, mais ne suffit pas à atteindre les 28dB nécessaires à cette compatibilité.

A l'inverse du SOA, cette fois avec l'EDFA, le budget optique du tronçon 2 n'est pas compatible avec la classe B+. Par contre, sur le tronçon 1, on peut envisager une architecture d'accès de classe B+ pour un déport sur le tronçon 2 de 30 à 44dB à 2,5Gbit.s et de 26 à 34dB à 5Gbit/s.

L'EDFA est donc un bon candidat pour amplifier des transmissions OFDM montantes, permettant ainsi de réaliser une liaison à 5Gbit/s sur 62dB de budget optique avec des composants de 2,5GHz de bande passante.

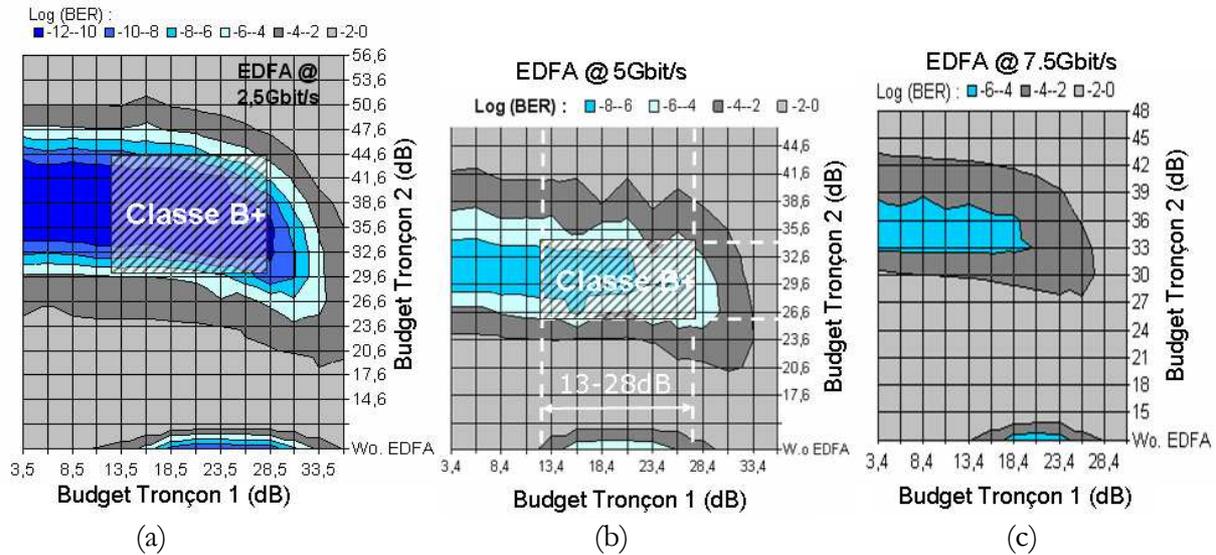


Figure 153 : Cartographie de budget optique en fonction du BER à 2.5Gbit/s (a), 5Gbit/s (b) et 7.5Gbit/s (c) avec un EDFA

On a donc obtenu d'importants budgets optiques à haut débit en présence de 20km de fibre. Il convient désormais de s'assurer que ce budget optique dépensé en longueur de fibre soit robuste à la dispersion chromatique. Pour cela nous avons choisi de tester des composants d'émission et réception qui permettent d'obtenir un débit OFDM jusqu'à 20Gbit/s, ce qui devrait accentuer les effets de la dispersion chromatique.

2.3.4. Comportement de l'amplification à des débits jusqu'à 20Gbit/s

Afin d'obtenir des débits supérieurs à 10Gbit/s, nous avons mis en œuvre un banc de test identique au précédent mais avec un laser DFB et une photodiode APD qui ont pour bande passante RF respectivement 6.9GHz ("DFB6.9" et 8GHz ("APD8"). Sans amplification cela correspond donc à la transmission testée et présentée au paragraphe 2.3.1 (page 180). Cette architecture nous a permis d'atteindre des débits de 19.6Gbit/s pour un budget optique de 16dB. Toujours dans le but d'augmenter le budget optique de la transmission, nous avons inséré les mêmes amplificateurs que précédemment, et évalué de la même manière les performances de ces transmissions.

2.3.4.1. Evaluation du débit possible à un BER de 10^{-4}

En variant la puissance d'entrée dans le SOA ou l'EDFA ainsi que la puissance reçue à la photodiode, nous avons mesuré les débits maximum possibles ainsi que le budget optique total sans fibre. Comme le montrent les Figure 154 (a) et (b), en amplifiant respectivement avec un SOA et un EDFA, pour un BER fixé à $1,2 \cdot 10^{-4}$, nous avons obtenu des courbes caractéristiques du comportement des amplificateurs.

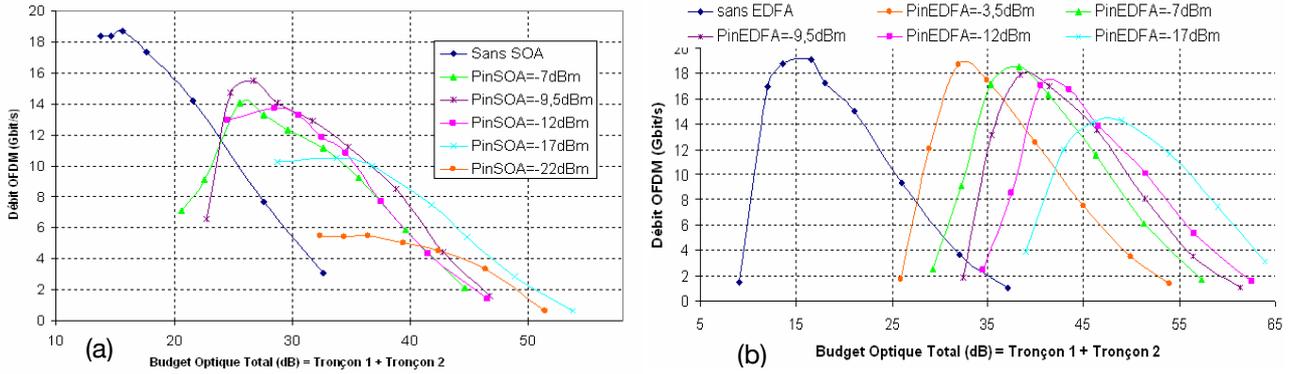


Figure 154 : Evaluation en débit et budget optique pour un BER = $1,2 \cdot 10^{-4}$ avec un SOA (a) et un EDFA (b)

En amplifiant avec un SOA (Figure 154 (a)), nous observons une dégradation minimum du débit maximum à 16Gbit/s pour un budget optique de 27dB. De plus, le débit maximum décroît quand le budget optique croît (la puissance en entrée dans l'amplificateur décroît). Le débit décroît également à faible budget optique à cause de la saturation de la photodiode et de l'amplificateur.

Comme le montre la Figure 154 (b), l'EDFA grâce à un meilleur gain et facteur de bruit, présente de meilleurs résultats : un débit maximum de 19Gbit/s est obtenu pour un budget total de 37dB. Nous avons donc un comportement similaire des deux amplificateurs quel que soit le débit de la transmission OFDM.

2.3.4.2. Evaluation du budget possible à débits fixes

En mesurant le BER à la réception de l'APD, nous avons précisément évalué le potentiel d'extension de budget en fonction des débits OFDM et des puissances d'entrée dans les amplificateurs. Nous avons ainsi dressé des cartographies de BER en fonction budget optique avant et après amplification pour différents débits OFDM : 2.5, 5, 7.5 et 10Gbit/s. D'après ces résultats (non présentés car d'allures similaires), en considérant une architecture déployée de type Classe B+ (budget optique de 13 à 28dB) avant un EDFA (tronçon 1), on peut ensuite obtenir une extension de budget de 20 à 32dB à 10Gbit/s, soit un budget total de 56dB à 10Gbit/s. Un SOA permet d'obtenir des résultats considérables à plus faible débit : à 5Gbit/s, 17dB d'extension de budget sont possible sur le tronçon 1 en considérant cette fois une architecture de Classe B+ après amplification.

Nous pouvons ainsi conclure qu'un SOA conviendrait à l'amplification des signaux très haut débit descendants du central vers les clients, tandis qu'un EDFA assurerait la transmission montante.

2.3.4.3. Tolérance à la dispersion chromatique

D'après les résultats précédents, les amplificateurs optiques associés à une modulation de format OFDM permettent d'obtenir des débits considérables pour des budgets optiques élevés. Cette extension de budget optique peut être utilisée pour augmenter le taux de partage du réseau d'accès optique mais aussi sa portée totale. Pourtant, pour une transmission à 10Gbit/s (NRZ) sur une telle fibre, la dispersion chromatique agit en théorie à partir d'environ 20km de fibre. Ainsi, dans le but d'évaluer les effets de la dispersion chromatique, nous avons caractérisé notre système en variant les longueurs de fibre (Figure 155).

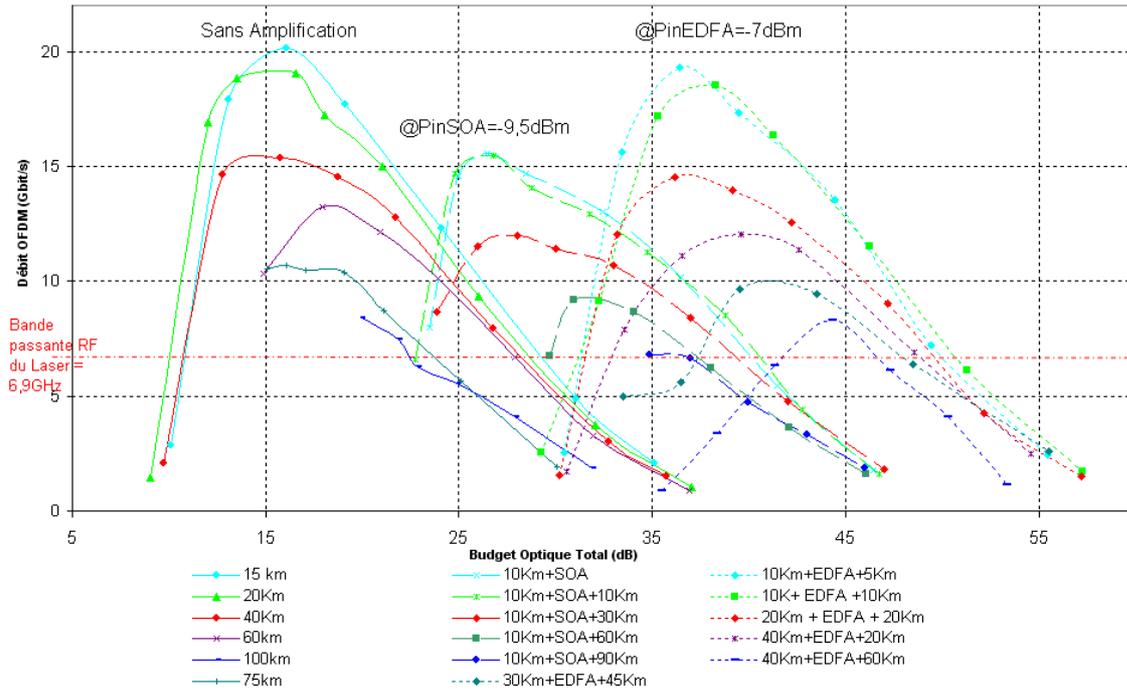


Figure 155 : Evaluation des effets de la dispersion chromatique sur le débit OFDM et le budget optique total sans amplification, avec un SOA et un EDFA.

Nous avons réalisé les mêmes types de mesures qu'auparavant en insérant des tronçons de fibre de différentes longueurs de part et d'autre des amplificateurs. Nous remarquons que la longueur de fibre a un effet sur le débit maximum possible. Sans amplification le débit maximum décroît de 20Gbit/s (pour 15km) à 11Gbit/s (pour 75 km) mais avec un budget optique quasi identique. Ce phénomène est observé dans les mêmes proportions en présence d'un SOA ou d'un EDFA. Les applications d'extension de portée du réseau d'accès OFDMA seront ainsi limitées en distance surtout par la dispersion chromatique.

2.3.5. Synthèse et conclusions sur l'amplification de signaux OFDM

Budget optique (dB) à un BER de 10^{-4}	Modulation	Sans ampli		SOA		EDFA	
		max	classe B+	max	classe B+	max	classe B+
Débit 2,5Gbit/s	TDM NRZ 2,5GHz	35	35	49	46	62	62
	OFDM 2,5GHz	34	34	60	60	71	71
	OFDM 5GHz	34	34	51	51	64	64
Débit 10Gbit/s	TDM NRZ 10GHz	36	36	45	45	77	63
	OFDM 2,5GHz	20	0	35	0	45	0
	OFDM 5GHz	25	25	37	37	56	56

N.B. : Les émetteurs-récepteurs diffèrent selon le type de modulation. N'ayant pas encore de résultats en mode burst, les résultats en TDM à 10Gbit/s sont présentés pour une modulation continue. La transmission NRZ à 2,5Gbit/s est relative au GPON donc bidirectionnelle. De plus, les mesures de budget optique sont répertoriées dans le chapitre 2 pour un BER de 10^{-9} , on a donc ajouté 2dB de budget supplémentaire afin d'atteindre un BER de 10^{-4} qui est un facteur commun à ce tableau. Enfin, les amplificateurs utilisés étaient différents pour une transmission TDM et OFDM.

Tableau 28 : Synthèse des résultats obtenus avec amplification

Les résultats obtenus précédemment sont résumés dans le Tableau 28. Pour comparaison avec les budgets optiques du NRZ, nous y avons ajouté les résultats d'extension de budget obtenus avec et sans amplification des signaux NRZ (résultats provenant des mesures présentées au paragraphe précédent). Il s'agit là d'avoir une comparaison intuitive sachant que les composants utilisés pour chaque expérimentation peuvent différer en de nombreux points : puissance de sortie du laser, sensibilité de la photodiode, performances des amplificateurs, etc.

Ce tableau permet de synthétiser les résultats d'extension de budget, obtenus à l'aide d'amplificateur optique SOA et EDFA.

Les résultats d'évaluation d'extension de budget optique à l'aide d'amplificateurs optiques SOA et EDFA, sur une transmission de signaux haut-débits en modulation OFDM sur 20km de fibre sont présentés. Ils montrent que l'on peut atteindre des débits de 19Gbit/s pour un budget optique total atteignant 60dB. En conservant des composants à faible bande passante RF et de ce fait à moindre coût, ces performances permettent de répondre aux exigences des futures générations de réseau d'accès FTTH en fournissant un haut débit sur une longue distance tout en prenant garde aux effets de la dispersion chromatique.

3. Convergence fixe-mobile

Sachant que l'on tend vers la convergence dans les services et dans le réseau de transport, nous avons étendu ce concept aux réseaux d'accès. En effet, le NGPON2 devrait intégrer des études de convergence d'architecture ou de systèmes de nouvelle génération, tel que nous l'avons décrit au chapitre 1 à travers les schémas de convergence des topologies ou des technologies [98]. Nous allons chercher à évaluer ces possibilités de convergence à travers des architectures à portée étendue.

Afin de faciliter le déploiement des systèmes de nouvelle génération intégrés dans le NGPON, nous avons étudié la possibilité de convergence d'une solution existante et de la génération NGPON1, à savoir la coexistence d'un GPON et 10GPON sur une même infrastructure fibre, étendue à l'aide d'un seul SOA large bande placé en ligne (cf section 1.3, page 166).

Enfin, nous proposons également d'évaluer la possibilité de convergence d'architectures fixes et mobiles dont la portée est étendue à l'aide d'amplification optique ou régénération optoélectronique.

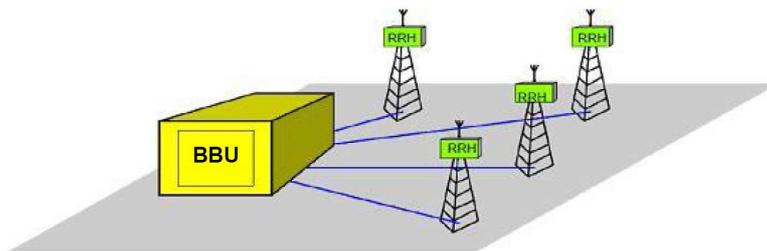
Des infrastructures optiques sont aujourd'hui déployées pour améliorer le réseau de téléphonie mobile et faciliter le développement de systèmes 3G et 3.5G (116 millions d'utilisateurs 3G dénombrés par l'IDATE en fin 2008).

La RoF (pour Radio-over-Fiber) est une technologie qui permet de transporter des signaux radio sur un lien en fibre optique. Par rapport aux câbles cuivres traditionnels et aux transmissions RF, elle offre des avantages tels qu'une large bande de fréquence et une faible atténuation linéique, permettant de propager des signaux très haut-débits sur des très longues distances. La Radio sur Fibre est un choix évident pour les futures communications mobiles.

Les stations de base distribuées reposent sur le principe du déport des signaux radios mobiles sur une fibre optique. Cependant, l'insertion d'une liaison RoF dans un système de répartition de signaux radiofréquences doit nécessairement respecter les critères de qualité de transmission imposés par les normes des technologies utilisées (GSM, UMTS...) qui ont été établis à priori pour des transports uniquement RF (Radio Frequency).

Grace à la faible atténuation linéique de la fibre, on peut donc envisager des longueurs de fibre importantes ce qui va permettre de centraliser les équipements. L'intelligence est concentrée, ce qui limite les handovers [99]. En effet, plusieurs cellules sont alors gérées par un même équipement central. Cette technique permet l'anticipation des réseaux du futur et la réalisation de solutions de convergence des réseaux d'accès fixes et mobiles.

Les performances des stations de base distribuées, en liaison point-à-point, permettent d'offrir un support capable de transmettre les débits des réseaux mobiles à venir. Il existe également des liaisons radio point-à-multipoints réalisées entre la plateforme (BBU : Base Band Unit) et plusieurs sites d'antenne (RRU: Remote Radio Unit). Ce type de liaison est illustré en Figure 156.



*BBU: Base Band Unit (central) ; RRU ou RRH : Remote Radio Unit ou Host (antenne)

Figure 156 : Un équipement central gérant plusieurs RRH (RRU)

Ce principe offre une flexibilité favorable aux opérateurs confrontés à des contraintes de déploiement, liées notamment aux difficultés d'acquisition des sites ou à des limitations physiques de câblage sur différents sites, et leur permet de fournir une couverture radio à leurs abonnés.

Nous avons ainsi expérimenté la mutualisation du trafic fixe et mobile sur un même tronçon de fibre. Cette solution de convergence présentée en Figure 157 est avantageuse dans le cas d'un déploiement FTTx existant et peut être aussi la base du déploiement des futurs réseaux.

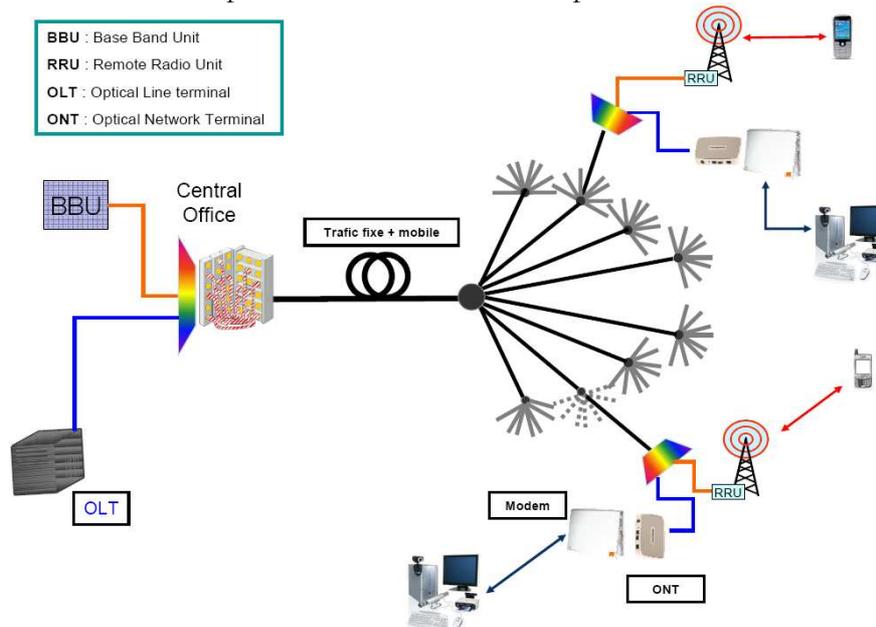


Figure 157: Architecture de convergence des réseaux d'accès fixe et mobile

Le transport du signal peut se faire de manière analogique ou numérique. Dans le premier cas, le signal radiofréquence vient directement moduler le laser, dans le second cas le signal RF est numérisé puis utilisé pour moduler le laser par exemple en NRZ. La complexité et la maturité des techniques de transmission RF dépend également de fréquence des porteuses [100,101].

La RoF analogique a l'avantage de ne pas complexifier d'avantage le réseau en ajoutant un processus de numérisation. La numérisation est un coût supplémentaire à prendre en compte. Néanmoins les lasers DFB utilisés en RoF analogique sont plus onéreux que les SFP que nous pouvons utiliser dans une configuration numérique. Le signal RF est transmis par modulation directe de l'onde optique. La non linéarité de la modulation dégrade sensiblement la qualité de la liaison et restreint la longueur de la fibre. Ces limitations du budget optique rendent difficile l'intégration d'un système PON coexistant avec ce type de technologies.

Dans ce contexte de convergence des réseaux d'accès fixe et mobile et dans le but d'étendre le budget optique entre la station de base et l'antenne, nous pouvons appliquer des solutions d'extension de portée à base d'amplification optique et régénération optoélectronique.

3.1. Extension de portée de liaisons Radio sur Fibre analogique

L'extension du budget optique peut être nécessaire pour la RoF analogique compte-tenu du plus faible budget optique qu'elle permet. Du fait de la complexité de mise en œuvre d'un système radio sur fibre analogique, cette étude fait notamment partie des travaux de doctorat menés par Florian Frank. Il a ainsi reporté la possibilité de transporter, de manière transparente et simultanée, trois porteuses radio UMTS multiplexées en fréquence (FDD : Frequency Division Multiplexing) sur une architecture PON étendue à l'aide d'un SOA qui a permis d'obtenir un budget optique total s'élevant à 47dB [102].

Cependant, il a également mis en évidence la difficulté de conserver un ACLR (Adjacent and Alternate Channel Leakage Ratio) conforme au standard du 3GPP [103], facteur qui permet de traduire le rapport de fuite depuis le canal de référence vers les canaux adjacents. Le budget optique total d'une transmission RoF analogique (préamplificateur EDFA+PIN au module de réception) est ainsi pénalisé de 2,5dB en comparant l'implémentation d'une seule porteuse ou le cas du transport de plusieurs porteuses multiplexées. De plus, l'insertion de 20km de fibre monomode dégrade de 3,5dB le budget optique de la transmission.

Enfin, en prenant en compte simultanément l'Adjacent CLR et l'Alternate CLR (mesurés respectivement à +/-5MHz et à +/- 10MHz de la fréquence centrale de la porteuse), le budget optique se trouve à nouveau réduit de 3dB. Ces pénalités liées à l'ACLR ont tout de même pu être compensées grâce à l'insertion d'une fibre à compensation de dispersion chromatique (DCF) et d'amplification optique supplémentaire.

Il est tout de même possible d'obtenir un budget optique de 30,5dB sur une transmission RoF analogique respectant les spécifications du standard UMTS [104]. Au module d'émission, il est alors nécessaire d'insérer un EDFA positionné en booster en sortie de la DCF. En réception, le signal reçu par une photodiode PIN est également pré-amplifier par un EDFA.

On remarquera donc la difficulté et la complexité mais aussi la possibilité de la mise en œuvre de systèmes basés sur la RoF analogique pouvant s'intégrer sur une architecture de type PON.

Ces résultats montrent donc une possible convergence des réseaux fixes (PON) et mobiles basés sur la RoF analogique mais en impliquant un surcout très important sur les équipements.

Une étude technico-économique de ce type d'architecture devra être réalisée afin de comparer ce type de solution à une solution convergente Digital-RoF-GPON où un surcoût considérable se situe au niveau des fonctions de numérisation du signal.

3.2. Extension de portée d'une architecture convergente RoF numérique - GPON

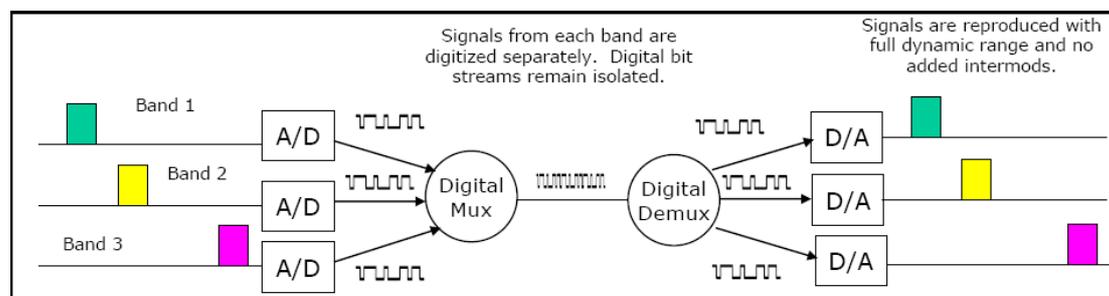


Figure 158 : Schéma de fonctionnement de la RoF numérique [7].

La radio sur fibre numérique (Digital RoF) augmente le budget optique sur la liaison entre la station de base (BBU : Base Band Unit) et l'émetteur-récepteur optique associé à l'antenne radio (RRU : Remote Radio Unit ; ou RRH : Remote Radio Head) en éliminant les phénomènes non linéaires rencontrés en radio sur fibre analogique. Cette augmentation du budget permet l'intégration d'une station de base distribuée dans une infrastructure GPON, telle que l'a décrit la Figure 157.

L'architecture précédente a été testée avec pour équipement d'accès FTTx, un GPON Huawei présenté au chapitre 1, et un système d'accès mobile dénommé FlexWave qui est proposé par le constructeur ADC et offre un débit de 3.072 Gb/s [105]. La mutualisation de la fibre est basée sur l'insertion d'un multiplexage en longueur d'onde afin d'assigner une porteuse optique différente à chaque technologie. Le GPON a ainsi conservé ses mêmes longueurs d'onde standardisées (1490nm descendante et 1310nm montante), et pour le système Digital RoF, nous avons choisi la bande CATV (1550nm à 1560nm) qui est pour l'instant disponible en France pour acheminer le trafic mobile. Dans l'expérience réalisée, seul un RRU est contrôlé par le BBU, et nécessite une paire de longueur d'onde.

Le critère de qualité d'une transmission numérique est l'EVM (Error Vector Magnitude) qui représente les distorsions d'amplitude et de phase sur le diagramme de constellation des états caractéristiques d'une modulation numérique. En UMTS, la norme impose un EVM inférieur à 17,5% [106-107]. Dans le cas de la RoF numérique, l'atténuation optique comme la longueur de fibre n'ont aucun effet sur l'EVM tant que la valeur d'atténuation maximale correspondant à la sensibilité des récepteurs n'est pas atteinte.

La transmission GPON est elle à nouveau qualifiée par son taux d'erreur binaire (BER). Dans ces conditions, nous avons relevé une performance de 30dB de budget optique permettant d'avoir une transmission bidirectionnelle sans erreur des trafics fixes et mobiles. Cette expérience a permis de confirmer la possibilité de mutualiser le trafic mobile et fixe sans dégrader la qualité des deux systèmes initiaux.

Ensuite nous avons évalué les capacités d'extension de budget optique de réseau d'accès mobile (sans GPON) en y insérant un SOA ou un répéteur OEO 2R.

3.2.1. Insertion de l'amplification optique sur un système RoF numérique

Le fonctionnement bidirectionnel et la large bande d'amplification (40 à 50nm) d'un SOA permettent son utilisation dans la bande 1550-1560nm choisie pour notre application. Le Tableau 25/ Tableau 29 présente les principales caractéristiques de ce SOA.

Window	Type	Peak (nm)	Gain (dB)	Psat (dBm)	FWHM (nm)	NF (dB)	Operating Current (mA)
1550nm	IPSAD1501-B Booster Amplifier	1510 to 1570	15	10	55 min.	9	250

Tableau 29 : Caractéristiques du SOA (InPhenix)

En intégrant un SOA, nous avons pu obtenir au maximum 44dB d'atténuation sur la ligne soit un gain de 14 à 15dB. Toutefois cette solution demeure coûteuse et le SOA dégrade de 9dB le SNR. L'avantage d'un SOA peut résider tout de même dans sa capacité à amplifier plusieurs longueurs d'onde dans une bande d'amplification de 50nm de manière bidirectionnelle.

3.2.2. Régénération optoélectronique (2R) sur un système RoF numérique

La flexibilité amenée par les SFP intégrés dans les dispositifs de régénération 2R permet à ces technologies d'être utilisables dans la bande CATV et à moindre coût.

En introduisant un dispositif de régénération optoélectronique de ce type sur la liaison, on a pu augmenter le budget optique pour atteindre 60dB.

La seconde solution (2R) conviendrait alors le mieux pour une configuration point-à-point. D'une part les performances sont meilleures et d'autre part le coût est largement inférieur au SOA. En revanche, ce type de régénération serait moins intéressant dans une configuration point-à-multipoint. En effet, l'utilisation de plusieurs longueurs d'onde pour contrôler plusieurs Remote Unit nécessitera plusieurs cartes OEO et leurs SFP appropriés.

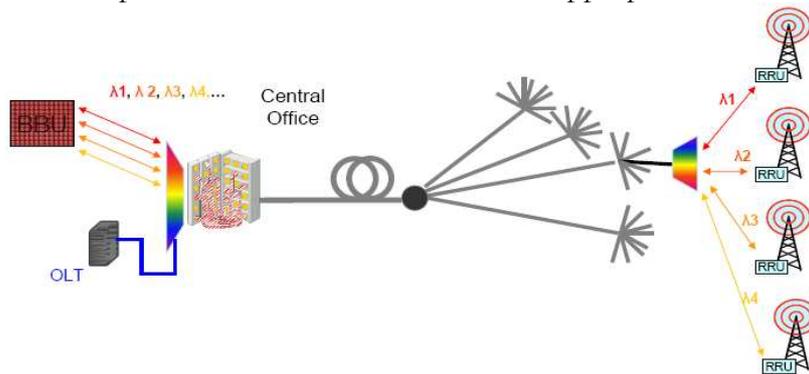


Figure 159 : Utilisation de plusieurs longueurs d'onde pour contrôler plusieurs RRU

Dans le cas de plusieurs longueurs d'onde et d'un déploiement purement UMTS, un multiplexeur est nécessaire à l'émission. Ce multiplexeur doit être capable de supporter en théorie 16 longueurs d'onde (8 à l'émission et 8 à la réception), dans la bande 1550-1560 nm. Le premier problème qui se pose est la génération de 16 longueurs dans la bande 1550-1560 nm ce qui est non-conforme à la normalisation des canaux DWDM.

Dans le cas d'une configuration point-à-multipoints, on peut contrôler plusieurs RRU avec un seul BBU via différentes longueurs d'ondes, des solutions d'extension du budget optique comme

l'amplification par un SOA peuvent être considérées mais une évaluation précise du comportement d'un SOA en présence de canaux DWDM est nécessaire auparavant, pour les raisons développées précédemment dans la cadre de l'amplification WDM (section 2.1.1).

De plus, la numérisation du signal est le point faible de la RoF numérique. Des améliorations de la radio sur fibre numérique sont encore à venir notamment en termes d'échantillonnage pour permettre la numérisation de bandes plus importantes et ainsi imposer cette solution pour le très haut débit.

La configuration proposée ici dans la bande initialement prévue pour la CATV est viable tant que cette plage reste disponible mais nos études ont confirmé la faisabilité de cette solution.

Des études précises sur le coût réel de cette solution et les économies réalisées sur le déploiement devront être menées pour juger de la pertinence d'une telle configuration pour l'opérateur. D'autant plus que des recherches sur des sources d'alimentation alternative, comme l'énergie solaire, sont menées par des constructeurs comme Alcatel-Lucent pour alimenter les stations de base distribuées.

Résumé du Chapitre 3

Ce chapitre a permis de décrire nos études menées sur l'extension de portée des systèmes PON de nouvelle génération : NGPON.

Bien que cet aspect ne figure pas dans les standards associés au NGPON, nous avons particulièrement étudié des solutions d'extension de budget optique à base d'amplification optique.

Extension de portée du NGPON 1

Le NGPON1, décrit au chapitre 1, concerne une architecture PON basée sur un multiplexage temporel (TDM) et permet d'offrir un débit jusqu'au 10Gbit/s (symétrique dans le cadre du XGPON 2 et asymétrique dans le cadre du XGPON 1). Bien que reflétant une architecture similaire au GPON, cette montée en débit complexifie les modules d'émission et de réception des terminaux optiques au central et chez l'abonné, surtout dans le cas d'une transmission montante en mode burst. Dans ce cas, nous avons mis en place un module de réception comprenant en l'absence de paquet, une fonction de remplissage d'une séquence aléatoire transportant l'horloge du signal utile. Ainsi la récupération des données et de l'horloge est possible grâce à l'illusion d'un signal continu créée par cette fonction. Dans ces conditions, nous avons démontré l'influence de la longueur d'un burst, de la longueur de son préambule et du taux d'extinction du signal optique émis.

Ensuite, dans le but d'augmenter le budget optique d'un 10GPON, nous avons étudié séparément une transmission descendante continue à 10Gbit/s et 1550nm, amplifiée à l'aide d'un SOA ou d'un EDFA et une transmission montante à 10Gbit/s et 1310nm amplifiée à l'aide d'un SOA. Nous avons alors réalisé une architecture 10GPON étendue à l'aide d'un SOA par sens de transmission, pour un budget optique total de 44dB compatible avec budget d'accès de classe N1 (14-29dB), N2 (16-31dB) et E (18-33dB), définies par le standard ITU-T G987.2. La transmission descendante d'un 10GPON est également compatible avec la bande d'amplification et cette technologie a permis d'atteindre un budget total de 72dB, avec un budget accès compatible avec les classes N1, N2 et E.

On observe ainsi un comportement similaire de l'amplification optique sur des technologies GPON et 10GPON. L'amplification optique pourrait donc être mise en place séparément sur chacune de ces technologies.

Pourtant, nous avons démontré l'intérêt de mutualiser l'infrastructure fibre déployée en proposant des architectures convergentes où des technologies GPON et 10GPON pourront coexister. Cette mutualisation est réalisée par un multiplexage en longueur d'onde lié au plan d'allocation en longueur d'onde de chacune de ces technologies : liaison GPON descendante à 1490nm et montante à 1310nm ; liaison 10GPON descendante à 1577nm et montante à 1280nm. Au lieu d'amplifier séparément chaque système, nous avons évalué la possibilité d'étendre le budget d'une architecture convergente où coexistent les transmissions descendantes GPON et 10GPON, à l'aide d'un seul SOA. Cette configuration a nécessité l'implémentation d'un SOA large bande (83nm) dont les performances en gain et NF sont alors réduites pour chaque longueur d'onde. L'évaluation de ce SOA a pourtant démontré la possibilité d'obtenir un budget optique total s'élevant à 44dB (budget d'accès compatible avec la classe B+, C et C+) pour un système GPON seul et 44dB (budget d'accès compatible avec les classe N1, N2 et E) pour un système 10GPON seul. Cependant, en présence des signaux descendants provenant de ces deux technologies, les cartographies de BER mesurées en fonction des budgets accès et déport ont mis en évidence des pénalités liées à l'amplification simultanée des longueurs d'onde GPON et