Extension de portée de systèmes G-PON

SOMMAIRE DU CHAPITRE 2

Introdu	uction au Chapitre 2	80
1.	Extension du budget optique	81
1.1.	Implémentation de l'Extender box dans l'architecture G-PON	81
1.2.	Objectifs principaux	
1.3.	Evaluation du budget supplémentaire nécessaire	
2.	Technologies d'Extender Box	85
2.1.	L'amplification optique	85
2.2.	Les répéteurs OEO	
3.	Evaluation d'Extender Box sur GPON	
3.1.	Critère de qualité d'une transmission optique	
3.2.	Première évaluation en mode continu	
3.3.	Evaluation sur GPON commercialisés	
Résum	né du Chapitre 2	145

Introduction au Chapitre 2

Ce chapitre est consacré aux activités de recherche menées sur l'extension de portée des systèmes GPON.

En effet, comme l'a décrit le chapitre précédent, dans un contexte de déploiement FTTx (Fiber To The x: Home, Building, Cab), la demande croissante de connexion à "la fibre" requiert des travaux de recherche sur les architectures de réseaux d'accès optique afin de diminuer les coûts de ces déploiements. La technologie d'accès optique GPON (Gigabit Passive Optical Network) déployée aujourd'hui par France Telecom est basée sur une architecture où un OLT (central optique) permet d'offrir un accès fibre à 64 ONU (modem optique chez le client). Elle est basée sur un multiplexage TDM et un accès multiple TDMA (Time Division Multiplexing Access) qui permet de partager cette infrastructure avec 64 clients desservis grâce à deux coupleurs 1 vers 8 sur typiquement 20 à 60Km de fibre. Les pertes induites par ces composants passifs, plus les pertes de connecteurs et soudures définissent ainsi un budget optique compris entre 13dB pour le client le plus proche du central et 28dB pour le client le plus éloigné, et ce, pour un GPON de Classe B+.

Le principal moteur pour les opérateurs est l'augmentation du nombre de clients connectés au FTTx par l'amélioration de l'accès au réseau tout en restreignant les investissements dans les équipements déployés dans les centraux. L'insertion dans le réseau de composants à faible coût "Extender Box" est une solution prometteuse en vue de parvenir à des budgets optiques plus élevés qui permettront d'élargir les zones d'éligibilité d'un PON. Cette solution doit alors pouvoir répondre aux objectifs principaux qui sont : l'augmentation de la portée totale, la réduction du nombre des centraux et l'amélioration du taux de remplissage par PON déployé, soit le nombre de clients connectés par port.

Une première partie permet de définir le contexte et les enjeux d'une augmentation du budget optique du réseau. Ensuite on détaillera le fonctionnement des principales technologies d'Extender Box : l'amplification optique ou les répéteurs Optique-Electrique-Optique. Enfin nous présentons une synthèse des résultats de tests de ces technologies suivant plusieurs configurations ce qui nous permettra de conclure quant au choix d'une solution d'extension de portée des systèmes GPON.

1. Extension du budget optique

Le FTTH grâce à son déploiement devient une technologie mature : les premières technologies développées proposaient des liaisons point à point, ensuite des technologies plus avancées de point à multipoint PON ont été déployées en Asie et aux USA et actuellement en France avec le GPON.

Le GPON est disponible suivant plusieurs classes de budget optique et parmi elles, la classe B+ définie pour un budget de 13dB à 28dB. Elle utilise un multiplexage temporel (TDM) pour partager un OLT (Optical Line Termination) pour 32 ou 64 utilisateurs équipés d'un ONT (Optical Network Terminal), sur une distance typique de 20km (pouvant atteindre 60 km) entre le central et le plus éloigné des clients.

Dans un futur proche, pour fournir un accès FTTH à tout type de client, il est nécessaire de développer une solution économique adaptée à tout type de démographie. Autrement dit, pour couvrir une zone plus large et/ou un plus grand nombre de client, un système PON étendu est nécessaire. Des études sont menées activement concernant l'extension de portée du PON. Le principe du PON étendu est d'insérer un élément transparent au système, appelé "Extender Box" ou "EB" afin d'augmenter le budget optique ou la portée du réseau.

1.1. Implémentation de l'Extender box dans l'architecture G-PON



Figure 43 : Implémentation de l'Extender Box une architecture GPON

L'Extender Box (EB) doit être compatible avec par exemple un GPON de Classe B+. Elle sera insérée entre l'OLT et les ONT et devra être transparente aux protocoles et à la phase de ranging inhérents au GPON.

On peut envisager plusieurs emplacements pour l'EB dans l'architecture G-PON. Du fait de la propriété active de ce boitier, il serait préférable de le placer dans un local Telecom existant. Il serait par exemple naturel de le localiser dans un central DSL, ou un local d'infrastructure (Sous répartiteur, ...). L'EB sera connectée à une infrastructure de fibre donc à une alvéole ou à la rigueur à une colonne montante d'immeuble. La propriété "passive" du PON est alors violée par l'EB. On doit alors reconsidérer la propriété passive du PON comme une indépendance à une gestion réseau (couche 2, couche 3 du modèle OSI) des équipements entre le CO et les ONT.

1.2. Objectifs principaux

L'insertion de l'Extender Box ainsi définie rend possibles différents scenarios qui sont finalement étroitement liés : augmentation du taux de remplissage (nombre de clients) et de la portée ; réduction du nombre de centraux optiques (OLT) en regroupant les équipements réseaux actifs dans un seul central maître ; (distance de transmission) ; évolutivité du réseau.

1.2.1. Augmentation de la portée

Une partie du budget optique est actuellement utilisée par des ingénieries de déploiement pour une portée du GPON de 20km bien que la portée logique prévue par la norme est de 60km. En l'état actuel, cette portée est suffisante pour des raccordements en zone très dense où la plupart des abonnés se situe dans un rayon de moins de 5km de l'OLT. Cependant, le déploiement FTTx va bientôt s'étendre en zone moins dense, et dans le but de couvrir une zone plus large à partir d'un seul central optique, une extension de la portée peut être nécessaire.



Figure 44 : Schématisation de l'augmentation de portée du GPON

1.2.2. Augmentation du taux de remplissage

Le taux de remplissage d'un PON se défini par le rapport entre le nombre d'ONU connectés sur le nombre d'ONU connectables sur l'infrastructure déployée. En phase de pré-déploiement il est souvent inférieur à 20% donc afin de mieux amortir les investissements du FTTx sur le court terme, une EB doit permettre d'augmenter le taux couplage de l'infrastructure GPON étendue.



Figure 45 : Schématisation de l'augmentation du taux de remplissage du GPON

Le besoin d'un taux de partage supérieur s'est déjà fait sentir dans les phases de pré-déploiement FTTx. En zone très dense, le besoin en portée est faible comparé au nombre de client raccordables sur un rayon de 5km de distance à l'OLT. Par conséquent, Orange expérimente en Slovaquie une infrastructure G-PON Classe B+ basée sur 3 étages de couplages : 1 vers 2 puis 1 vers 8 et 1 vers 8, c'est-à-dire 128. L'ajout du coupleur 1:2 a ainsi permis de relier plus de clients FTTx à un même OLT, permettant potentiellement ainsi de doubler le taux de remplissage par port OLT soit une diminution du nombre de ports (OLT) déployés donc ce qui représente une économie considérable sur l'investissement.

Cependant, il faut garder à l'esprit que la limite logique imposée par la couche protocolaire MAC du GPON est aujourd'hui de 64 clients par PON. Cela implique que dès que le 64ième utilisateur est raccordé, il faut prévoir de retirer le coupleur 1:2 supplémentaire et déployé une nouvelle infrastructure pour les abonnés supplémentaires dans cette zone.

A cause de cette limite MAC à 64 clients par PON, l'augmentation du taux de partage ne pourra pas réellement être effective, mais on parlera alors d'augmentation du taux de pénétration par

port PON. Certains systémiers GPON vont proposer une implémentation de carte GPON pour 128 clients par port OLT qui permettra de confirmer le développement d'un taux de partage plus élevé sur les architectures déployées.

1.2.3. Consolidation des centraux

Associée à une augmentation de la portée, l'amélioration du taux de remplissage des cartes PON permettra d'étendre considérablement les zones éligibles par central, surtout en zones peu et non denses. Cela aura pour avantage de "remonter" plus en amont dans le réseau les premiers points d'agrégation de trafic en bénéficiant de l'apport de la technologie Extender Box en termes de portée et partage.

En effet le réseau de France Telecom comporte actuellement environ 12 000 centraux et l'opérateur a pour objectif de diminuer ce nombre de centraux à environ 1000. On observe d'ailleurs des objectifs similaires chez d'autres opérateurs Européens [37, 38]. Cette topologie est reliée à l'infrastructure cuivre. Avec l'introduction d'une technologie optique dans l'accès et d'une Extender Box pour atteindre une portée plus longue, cette topologie pourrait être modifiée pour limiter le nombre de centraux permettant ainsi de limiter les coûts d'exploitation du réseau, comme le montre la Figure 46.



Figure 46 : Schématisation de la remontée des centraux vers le réseau de collecte

L'EB peut alors être placée au central dit "maître" afin de conserver la passivité de l'infrastructure PON déployée. Cependant si l'on souhaite obtenir un budget optique supplémentaire plus significatif, on peut également placer cet élément actif dans l'ancien central défini comme central "esclave".

Afin d'illustrer cet objectif, un exemple de cartographie du maillage des centraux en regard d'une centralisation d'OLT en nœud de collecte est donné sur la zone de Lannion en Figure 47.

Les liens optiques existants sont reportés sur la carte ainsi que les différentes portées. Les données du nombre d'utilisateurs rattachées à chacun des NRA sont également collectées.

L'analyse de cette zone montre que la remontée de l'OLT au niveau du nœud de collecte de Lannion nécessiterait d'un budget total de 55 à 60dB atteignable uniquement par l'introduction d'EB sur ce réseau. L'extension de budget nécessaire serait donc de 27 à 32dB ce qui impliquerait une architecture de PON comportant une Extender Box en ligne (nous allons voir par la suite que cette extension de budget est non envisageable avec des amplificateurs placés au central). L'Extender Box étant un élément actif en ligne, elle serait alors placée dans les locaux de l'opérateur tels que les anciens centraux.

Chapitre 2 : Extension de portée des systèmes GPON



Figure 47 : Cartographie de maillage des centraux DSL (NRA) autour de Lannion

1.2.4. Evolutivité

On peut également définir un dernier objectif à cette extension de budget optique qui correspond à offrir une souplesse sur le budget optique d'un système d'accès. Cette flexibilité pourra d'une part donner une marge de manœuvre aux opérateurs du réseau et amortira sur un plus long terme le vieillissement des équipements installés. Mais cela permettra également son évolutivité (introduction de filtres de blocage, d'éléments de multiplexage...) vers une nouvelle génération de PON.

1.3. Evaluation du budget supplémentaire nécessaire

Dans tous les cas, la recherche de budget supplémentaire devra se faire par un minimum d'investissement, il est donc nécessaire de trouver des solutions économiques optimisées pour chaque application selon le budget nécessaire, comme le résume le tableau suivant :

scenarii	Budget supplémentaire	Solutions possibles
Evolutivité	+2 à +5dB	FEC / Classe C+
Augmentation de	+ 3 à + 12dB	Extender Box / Classe C+
l'éligibilité		
Remonter l'OLT	+25 à +30dB	Extender Box en ligne

GPON Classe C+ ou FEC

Une première solution pour augmenter le budget optique des PON en prenant en compte les contraintes économiques d'un déploiement bas coût, est de considérer le standard Classe C+ (17 à 32dB de budget optique) comme scenario de migration. Ce standard définit l'utilisation de composants avec de meilleures performances : des lasers avec des puissances de sortie plus élevées et des récepteurs avec une meilleure sensibilité ou encore l'utilisation d'amplificateurs à trans-impédance (TIA) permettraient d'atteindre jusqu'à 32dB de budget optique (soit 4dB supplémentaire par rapport à la classe B+).

De plus, l'utilisation d'un FEC (Forward Error Correction) supplémentaire permettrait également de gagner jusqu'à 2dB de budget optique.

D'après l'atténuation théorique à 1310nm (transmission la plus pénalisante du GPON) dans la fibre (0.31dB/km), et les pertes théoriques d'un coupleur 1 vers N, nous avons dressé la courbe suivante qui présente la longueur de fibre et le taux de couplage possibles selon la classe de budget disponible. On peut alors imaginer ce que représente l'apport de ces 2 à 4dB supplémentaires : Environ 10 km de fibre ou un coupleur 1 vers 2.



Figure 48 : Exploitation du budget optique en longueur de fibre ou taux de couplage

Ces solutions n'apportent donc pas un important budget supplémentaire. Une solution d'Extender Box devrait permettre d'obtenir jusqu'à 30dB d'extension de budget. Plusieurs études à ce sujet ont déjà montré l'intérêt d'un tel équipement, et participent à la définition du standard G984.re ou G984.6 en normalisation au sein de l'ITU (à travers le FSAN). Détaillé précédemment au Chapitre 1, ce standard définit une portée cible de 60km pour un budget optique supérieur à 27,5dB de part et d'autre de l'EB. Il propose deux types d'Extender Box : des technologies basées sur l'amplification optique ou sur des répéteurs OEO (Optiques-Electriques-Optiques).

2. Technologies d'Extender Box

2.1. L'amplification optique⁷

Plusieurs types d'amplificateurs optiques ont été développés pendant les années 1980, et l'utilisation d'amplificateurs optiques sur des systèmes optiques longue distance s'est répandue au cours des années 1990. En 1996, les amplificateurs optiques ont pris part dans le câblage des réseaux sous-marins en fibre optique à travers les océans Atlantique et Pacifique.

L'amplification optique représente une solution intéressante pour une Extender box GPON car elle permet d'offrir une large bande d'amplification au système. Les performances des amplificateurs dépendent fortement de leur type : SOA, EDFA ou PDFA. Ces amplificateurs sont transparents aux débits, compatibles avec le WDM dans leur propre bande spectrale optique

⁷ J'ai rédigé une partie de ces paragraphes en 2007 à l'occasion de mon rapport de stage [*] d'ingénieur publié en

²⁰⁰⁶ à l'ENSSAT. Certaines partie ont étés reprises ici compte tenu du fait que ces données n'ont pas évolué depuis.

d'amplification. Néanmoins, ils représentent une source de bruit d'émission spontanée (ASE) qui va dégrader la transmission des signaux.

2.1.1. Caractéristiques d'un amplificateur optique

Les amplificateurs optiques amplifient la lumière incidente par émission stimulée, mécanisme à l'origine de l'émission laser. On y retrouve également le bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) inhérent au milieu amplificateur. En effet, un amplificateur optique n'est rien d'autre qu'un laser sans contre-réaction. Sa spécificité principale est le gain optique obtenu lorsque l'amplificateur est pompé (optiquement ou électriquement) afin de réaliser l'inversion de population [39].

On dénote principalement le facteur de bruit, le gain, la puissance de saturation ainsi que la largeur spectrale comme caractéristiques décisives au choix d'un amplificateur optique.

2.1.1.1. Gain et largeur spectrale

En général, le gain optique ne dépend pas seulement de la fréquence (ou longueur d'onde) du signal incident, mais aussi de l'intensité du faisceau optique local en tout point à l'intérieur de l'amplificateur.

Le gain de l'amplificateur en lui-même G exprimé en dB est ainsi défini par la différence entre la puissance sortante Pout exprimée en dBm et la puissance incidente Pin (dBm) (dans le cas d'un signal continu).

Le spectre en sortie de l'amplificateur permet de définir la largeur spectrale de l'amplificateur comme la largeur à mi hauteur ou à -3dB du pic de gain. Il permet également de définir la longueur d'onde centrale d'amplification comme le montre la figure suivante.



Figure 49 : Relevé de spectre d'un amplificateur centré à 1510nm

NB : Dans nos applications, il serait tentant d'assimiler le gain de l'amplificateur au gain en budget optique. Cependant, le bruit intrinsèque à l'amplificateur vient dégrader la transmission du signal donc le budget optique.

2.1.1.2. Puissance de saturation

La puissance de saturation incidente Ps_{in} dépend des paramètres du milieu amplificateur comme le temps de fluorescence ou encore la section de la transition.

Elle délimite deux régimes de fonctionnement des amplificateurs liés à la variation du gain en fonction de la puissance incidente :

- fonctionnement linéaire : La puissance incidente Pin est inférieure à Ps_{in}. Le gain y est constant et la puissance de sortie a une variation linéaire en fonction de la puissance incidente.
- fonctionnement en saturation : La puissance incidente Pin est supérieure à Ps_{in}. Le gain G décroît avec l'augmentation de la puissance d'entrée Pin. Le milieu amplificateur est saturé par les photons incidents, limitant ainsi la possibilité d'amplification de nouveaux photons par émission spontanée ou stimulée d'où une stabilisation de la puissance de sortie qui implique la chute du gain.

2.1.1.3. Facteur de bruit

Le facteur de bruit, noté NF pour "Noise Factor", est un paramètre révélateur de la quantité de bruit rajouté sur le signal par un amplificateur dit bruit d'ASE. On définit le facteur de bruit par le rapport suivant :

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

Avec SNR_{in} et SNR_{out} (Signal Noise Ratio) les rapports signal à bruit respectivement en entrée et en sortie de l'amplificateur.

Après développement et simplification, on obtient la formule suivante [40]:

$$NF = \frac{1}{G} \left(1 + \frac{\langle P_{ASE} \rangle}{h \nu_s B_{OSA}} \right)$$

Où :

G est le gain à la longueur d'onde définie

 $< P_{ASE} >$ est la valeur moyenne de l'ASE (émission spontanée amplifiée)

B_{OSA} est la résolution de l'OSA

h est la constante de Planck

 $\mathcal{V}_s\,$ est la fréquence correspondant à la longueur d'onde utilisée

Cette formule permet d'obtenir une valeur approchée du facteur de bruit en utilisant un analyseur de spectre optique noté OSA pour Optical Spectrum Analyser.



Figure 50 : Mesure du NF à partir du spectre optique relevé sur l'OSA

A partir du spectre optique affiché sur l'OSA, on mesure la valeur moyenne de la puissance de bruit P_{ASE} ce qui permet ensuite de calculer le facteur de bruit NF.

2.1.1.4. Courbe de NF et Gain

Pour exemple, prenons la Figure 51 qui représente des courbes de gain et de NF d'un amplificateur EDFA, en fonction de la puissance, du courant de polarisation de la pompe et de la longueur d'onde incidente.



Figure 51 : Courbe de NF et gain en fonction du courant de pompe et de la longueur d'onde

On y observe effectivement une variation du gain en fonction de la longueur d'onde et de la puissance d'entrée suivant logiquement le spectre en sortie de l'amplificateur. La puissance de saturation dépend du courant de polarisation de l'amplificateur. On peut identifier une chute du gain et une dégradation du facteur de bruit en régime de saturation.

Nous avons mesuré ce type de courbe de NF et Gain pour chaque amplificateur optique que nous avons utilisé par la suite. Ceci nous permet de donner une évaluation du bruit, du gain, de la saturation et de la largeur spectrale de chaque amplificateur à titre indicatif pour une puissance injectée donnée.

Toutes ces caractéristiques ont logiquement différé selon le milieu actif de chaque type d'amplificateurs présentés ci-après.

2.1.2. SOA (Semiconductor Optical Amplifier)

Un SOA est un amplificateur optique à semi-conducteur composé de matériaux classifiés III-V. Les composés à base d'InGaAsP déposés sur un substrat d'Inp forment un matériau adapté à l'amplification des bandes de télécommunications optiques. Une structure formée d'une double hétérojonction InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}/Inp forme l'amplificateur optique à semi-conducteur. Les paramètres x et y représentent la proportion de chaque élément du composé et permettent d'ajuster la longueur d'onde d'émission et l'indice de réfraction de la zone active définie par ce composé [41].

Par ailleurs, le SOA est basé sur une jonction PN. La zone d'InP allant de la zone active à l'anode est dopée P et fournit la zone active en trous. A l'opposé, la zone d'InP allant de la zone active à la cathode est dopée N et fournit la zone active en électrons.

La lumière est amplifiée par émission stimulée quand elle se propage dans la région active. Les SOA diffèrent des amplificateurs à fibre dopée dans la manière dont l'inversion de population est obtenue. On parle ici de paires électrons-trous dans un matériau à semi-conducteur et l'inversion de population est obtenue par polarisation électrique directe de la jonction PN et non plus par pompage optique.

Ce dispositif d'amplification est de petite taille et a l'avantage que le pompage est électrique (plus besoin de produire une lumière laser pour faire le pompage optique comme dans les amplificateurs à fibre). La fabrication de ce type d'amplificateur est meilleur marché, mais a l'inconvénient d'introduire plus de bruit. De plus, il a un gain plus modeste que les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium.

Par ailleurs, le SOA présente un effet gênant appelé diaphonie ou "crosstalk" qui se produit lorsque deux longueurs d'onde différentes (dans la bande d'amplification du SOA) sont injectées en même temps. La réduction du gain décrite précédemment dans le cadre de la saturation du SOA, se ressent à toutes les longueurs d'onde et la présence d'un signal fort dans le SOA réduit donc le gain pour les autres signaux. Le gain vu par un signal sur un canal varie alors selon la présence ou l'absence de signaux sur les autres canaux.

Ce phénomène dépend du temps de vie des porteurs lors de leur transition en émission spontanée. Plus ce temps de vie sera suffisamment grand, en comparaison avec le temps bit du signal d'entrée, moins la diaphonie entre canaux sera perceptible.

Pour les SOA, ce temps de vie est de l'ordre de plusieurs dizaines voire des centaines de picosecondes tandis qu'il est de l'ordre de la dizaine de millisecondes pour les EDFA, ce qui privilégie l'utilisation des EDFA dans les systèmes WDM afin d'éviter ce phénomène de diaphonie.

La diaphonie dans les SOA permet de les utiliser pour le traitement tout optique du signal transmis et notamment comme portes optiques pour des fonctions de régénération et de conversion de longueur d'onde. Pour cela, la saturation du gain du SOA est provoquée en augmentant la puissance d'entrée d'un signal pompe. Ainsi le gain du SOA suit la modulation du signal pompe qui le traverse et si un deuxième signal parcourt également le SOA, il est par conséquent lui-même modulé en sortie de l'amplificateur. On parle de l'effet de la modulation croisée, XGM ou CGM pour Cross Gain Modulation. La Figure 52 schématise cet effet.



Figure 52 : Principe de la modulation de gain croisée dans un SOA

Comme le temps de réponse des porteurs dans le SOA sont très courts, de l'ordre de la picoseconde, le gain répond à des fluctuations bit par bit pour des systèmes à 10Gb/s.

Cependant, le SOA ajoute de l'émission spontanée amplifiée au signal, avec un NF de 7 à 10 dB. Ce qui peut dégrader l'OSNR. De plus, le taux d'extinction est limité par la compression du gain et reste inférieur à 10 dB en sortie du SOA.

Pour le réseau PON, les SOA représentent une solution à bas coût intéressante pour sa large bande d'amplification (40 à 50 nm). De plus, son fonctionnement en bidirectionnel permet de réduire la complexité du système et le coût des transmissions en partageant une seule fibre de l'OLT à l'ONU.

Les familles de SOA généralement utilisés dans l'accès sont détaillées ci après.

Double SOA (DSOA)

Un DSOA (Double SOA) est composé de deux amplificateurs à semi-conducteur sur le même circuit, un pour chaque sens de transmission. En effet, malgré un fonctionnement bidirectionnel possible du SOA, les longueurs d'onde GPON (1310nm et 1490nm) ne permettent pas d'être amplifiées par un seul SOA dont la largeur spectrale est insuffisante (50nm).



BOA (Booster Optical Amplifier)

Un BOA est un SOA dont les paramètres sont adaptés à l'amplification d'un signal élevé. Il présente typiquement un fort gain pour une puissance injectée élevée donc une puissance de saturation élevée. Ce BOA est intéressant pour nos applications d'amplification au central, où on doit amplifier le signal descendant directement sorti de l'OLT.

RSOA (Reflective Semiconductor Optical Amplifier)

Un RSOA est un SOA dont l'une des faces a été traitée à haute réflexion pour constituer un miroir et l'autre avec un traitement anti-reflet. Les particularités de cet amplificateur optique sont qu'il fonctionne en réflexion et qu'il peut être modulé. Le RSOA permet donc de moduler le signal qui lui est injecté, de l'amplifier et de le réfléchir.

La modulation externe est réalisée en modulant directement le courant de polarisation.

Les RSOA disponibles aujourd'hui montrent une modulation jusqu'à 10Gbit/s avec des gains de l'ordre de 20dB sur une bande de 60nm [43]. La conversion de longueurs d'onde basée sur un RSOA a été démontrée à un débit de 2,5Gbit/s [44]. Les SOA peuvent être indépendants ou non de la polarisation du signal optique injecté suivant le matériau utilisé et la technologie de fabrication employée. Les SOA avec une couche active en matériau massif (bulk) sont généralement utilisés pour avoir une faible dépendance en polarisation, à condition d'avoir une contrainte en tension de cette couche active (low-tensile-strained bulk). En effet, le gain 'TE (Transverse Electrical) est naturellement plus élevé que le gain TM (Transverse Magnetical) et en contraignant la couche active, la différence de gain s'amenuise [45]. L'inconvénient de ce type de SOA est que la dépendance à la température est importante et qu'il est nécessaire d'avoir un système de régulation de la température. Les SOA avec une région active incluant des multi-puits quantiques peuvent recombiner la faible dépendance à la température et à la polarisation [46].

2.1.3. EDFA (Erbium Dopped Fiber Amplifier)

Dans cette partie, nous présentons les principes généraux de fonctionnement des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium. L'EDFA consiste en une longueur de fibre en silice dont le cœur est dopé avec des atomes ionisés de l'élément Erbium (Er3+). Le signal est amplifié par l'interaction avec les ions dopants.

Un laser à semi-conducteurs est utilisé comme source de pompage à 1480 nm ou 980 nm pour les amplificateurs à fibre dopée Er3+

Le principe d'opération d'un EDFA peut s'approximer par un système à 3 niveaux d'énergie avec un pompage à 980nm ou 1480nm qui donne une bande d'amplification d'une largeur d'environ 35nm avec un pic à 1532nm. L'amplification est possible grâce à l'émission stimulée de photons des ions dopants. Le laser de pompe excite les ions dans un état d'énergie plus élevé où ils peuvent se recombiner et donner lieu à l'émission stimulée d'un photon à la longueur d'onde du signal à un niveau d'énergie inférieur. Les ions excités peuvent aussi se recombiner spontanément et donner lieu à l'émission spontanée. A cause de l'émission spontanée, l'efficacité de l'amplification diminue. La fenêtre d'amplification dépend des ions dopants.

La conception d'un EDFA nécessite l'emploi de composants optiques supplémentaires. Un multiplexeur en entrée de l'amplificateur pour combiner le signal du laser de pompe et le signal d'entrée. Un deuxième multiplexeur en sortie pour séparer le signal amplifié du signal de pompe. Deux isolateurs sont utilisés, un à l'entrée et un autre à la sortie de l'amplificateur pour éviter les réflexions à l'intérieur du système qui pourraient augmenter le facteur de bruit.

Pour notre application, les EDFA se révèlent très intéressants en termes de facteur de bruit qui est de l'ordre de 5dB, ce qui promet une transmission à un bon taux d'erreur pour un fort gain (de l'ordre de 35dB à 45dB). L'inconvénient de l'introduction des EDFA dans un réseau PON reste le coût du système par rapport à une solution avec des SOA. Et surtout, la bande d'amplification des EDFA se situe autour de 1560nm, ce ne sera donc pas une solution envisageable pour une Extender Box GPON mais elle doit rester considérée pour une application future sur un lien WDM dans l'accès.

Amplificateur EDFA bande "L"

Les longueurs d'ondes de travail d'un EDFA peuvent en réalité être réparties en deux fenêtres. La bande "C" (Conventionnelle) entre 1525nm et 1565nm et la bande "L" (Longue) entre 1570nm et 1610nm. Ces deux bandes peuvent être indifféremment amplifiées par ce type d'EDFA, mais on préfère souvent utiliser des amplificateurs optimisés pour chaque application. La principale différence entre les amplificateurs pour bande C ou L est que pour la bande L, la longueur de fibre dopée est nettement plus longue, ce qui nécessite un pompage optique moins fort.

ROPA (Remote Optically Pumped Amplifier)

Le ROPA est basé sur la technologie d'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec une pompe éloignée du milieu amplificateur. On parle alors d'amplification déportée. Dans ce cas, la pompe située à l'extrémité de la fibre permet d'obtenir une amplification des signaux se propageant en ligne tout en maintenant le réseau PON passif.

Dans une architecture PON, une solution est d'insérer le signal de pompe au central qui génère de l'amplification dans la fibre erbium située plus loin dans la ligne tout en conservant un réseau passif. Étant donné que le signal est transmis dans les deux sens de la fibre, la pompe peut être utilisée pour deux amplificateurs correspondant chacun à l'un des deux sens de transmission. En effet, un coupleur divise la puissance de pompe qui est injectée dans les deux sections de fibres amplificatrices. L'intérêt d'un tel montage est d'utiliser une seule pompe en adaptant l'amplification déportée à la transmission bidirectionnelle.

Ce type d'amplification fait l'objet d'évaluations, dans le cadre du projet SARDANA présenté en section 3.3.2.1 du chapitre 1 (page 71) [47-48].

2.1.4. PDFA et autres amplificateurs à fibre

Le PDFA (Praseodymium-Doped fluoride Fibre Amplifier) est un amplificateur au fonctionnement similaire à celui de l'EDFA mais cette fois la fibre est dopée au Praséodyme. Il est donc adéquat pour les systèmes de communication opérants dans la seconde fenêtre de transmission, autour de 1300nm. C'est alors un bon candidat pour amplifier les signaux montants à 1,31µm du GPON. Ces amplificateurs peuvent aussi être utilisés pour de nombreuses applications de R&D sur les futures générations de réseaux optiques (transmissions longue distance) et pour les réseaux CATV autour de 1300nm. D'un point de vue plus physique, le PDFA permet de traverser les plus hautes pertes optiques dans les fibres dans la bande O et d'atteindre une faible dispersion chromatique pour les transmissions longue distance. Nous avons testé ce type d'amplificateur associé à un SOA pour le sens descendant du GPON.

Le TDFA (Thulium Doped Fibre Amplifier) est basé lui aussi sur le même principe de fonctionnement qu'un EDFA mais en utilisant un autre dopant, le Thulium, ce qui lui permet d'opérer dans la bande d'amplification "S", entre 1450nm et 1490nm.

Cependant, ces types d'amplificateur n'ont pas été industrialisés massivement. Economiquement parlant, ils représentent donc une solution peu probable pour une application d'amplification du réseau d'accès.

Bilan des amplificateurs optiques

Pour plus de clarté un bilan des amplificateurs optiques disponibles par bande de longueur d'onde s'impose car nous allons par la suite rencontrer des transmissions aux longueurs d'onde suivantes :

- à 1270nm (10GPON montant) : PDFA ou SOA
- à 1310nm (GPON montant) : PDFA ou SOA
- à 1490nm (GPON descendant) : SOA (ou TDFA)
- à 1550nm (WDM PON) : EDFA ou SOA
- à 1577nm (10GPON descendant) : SOA ou Amplificateur bande "L".

2.2. Les répéteurs OEO

Pour les systèmes longue distance, l'atténuation du signal optique transmis a traditionnellement été surmontée en utilisant des répéteurs optoélectroniques dont les propriétés sont basées sur une conversion du signal optique d'abord converti en un courant électrique, puis régénéré optiquement avec un émetteur (laser).

Pour le réseau d'accès optique, les répéteurs OEO (conversion Optique-Electrique-Optique), 2R (Remise en forme + Ré-amplification) et 3R (2R + Resynchronisation) sont aujourd'hui disponibles commercialement comme Extender Box auprès de plusieurs fournisseurs tels que Zenko, Huawei ou Telnet. Ils représentent une solution simple et bas coût puisqu'ils consistent en une conversion opto-électrique avec un traitement du signal électrique. Le signal est ainsi

complètement régénéré, contrairement à l'amplification optique aucun bruit optique n'est additionné.

Des solutions de régénération 2R et 3R tout optique existent mais ne sont pas économiquement envisageables pour des applications du réseau d'accès.

2.2.1. Fonctionnement des répéteurs OEO GPON

Illustrés en Figure 54, les répéteurs ou transpondeurs sont composés de 2 transceivers montés tête-bêche. Leur rôle est d'effectuer une conversion optique-électrique-optique des signaux descendant et montant provenant de l'OLT et des ONT. Dans le cas d'une régénération 2R, cette conversion s'accompagne d'une ré-amplification et d'une remise en forme des signaux reçus. Une fonction supplémentaire de resynchronisation est réalisée avec un répéteur 3R. Ils peuvent être employés aussi bien en bidirectionnel qu'en monodirectionnel et sont généralement insérés en ligne. À l'instar de l'amplification en ligne, le réseau PON perd également son aspect passif dans le sens strict du terme puisqu'il faut alimenter les deux transceivers. Toutefois, dans l'optique d'une migration de réseau, le transpondeur vient remplacer l'OLT existant et permet de remonter ce dernier point d'agrégation dans un central plus en amont dans le réseau. Dans la perspective de mutualisation des équipements et de la fibre, il est tout à fait naturel d'utiliser le répéteur en fonctionnement bidirectionnel. Dans ce cas, un multiplexeur assure les fonctions de couplage (MUX) et découplage (DMUX) en longueur d'onde des signaux montant et descendant. Certains transceivers intègrent cette fonction de multiplexage et permettent donc d'avoir un lien mono-fibre en sortie, mais nous avons également utilisé des transceivers bi-fibre auquel il faut donc rajouter un MUX que l'on devra comptabiliser dans le calcul du budget optique.



Figure 54 : Schéma de fonctionnement d'un répéteur OEO

2.2.2. Sélection des transceivers OEO

La performance des répéteurs OEO 2R ou 3R est liée au choix des modules d'émissionréception à l'OLT et à l'ONU.

2.2.2.1. Emetteurs et récepteurs des signaux descendants

Il est plus facile de régénérer les signaux sur la liaison descendante puisqu'ils sont en mode continu et proviennent de la même source, i.e. l'OLT. Ayant parcouru la même distance jusqu'au répéteur, ils subissent pratiquement la même atténuation.



Figure 55 : Régénération des signaux sur la liaison descendante

Les circuits intégrés pour l'émetteur laser à l'OLT, le récepteur et la CDR à l'ONU pour le flux descendant continu de données optiques sont disponibles commercialement. Des circuits intégrés standards et des dispositifs optoélectroniques utilisés pour les transmissions optiques continues sont satisfaisants. La Figure 56 illustre ainsi la configuration de l'émetteur et du récepteur des signaux descendants.



Figure 56 : Emission et réception des signaux descendants [49]

2.2.2.2. Emetteurs et récepteurs des signaux montants

Par contre sur le lien montant, les données optiques sont transmises par paquets en mode burst. Du fait que les ONT sont situés à des distances et à des degrés différents d'atténuation, les paquets véhiculés par chaque ONT vont varier en amplitude au niveau du transpondeur.

Dans la conception des récepteurs des transceivers en mode burst, plusieurs paramètres essentiels doivent être pris en compte tels que les puissances optiques de 2 paquets voisins et l'espacement entre eux. Le répéteur traite les données optiques provenant des abonnés et les régénérer à amplitude égale vers le central.



Figure 57 : Régénération des signaux en mode burst sur la voie montante

2.2.2.2.1. Emetteur mode burst à l'ONU

Afin de maximiser l'efficacité de la transmission en mode burst, la diode laser (LD) de transport doit être conçue pour commencer à transmettre des données optiques dès que possible après modulation du signal de données sur l'émetteur.



Figure 58 : Modulation à l'ONU des signaux montants [49]

La Figure 58 illustre le schéma typique d'une transmission optique à partir d'un émetteur mode burst à l'ONU. Trois types d'optiques de signaux y agissent. Premièrement, l'amplitude des données (DA) est liée à la tension de modulation appliquée sur le laser. Le second (BA) correspond à l'amplitude du signal optique, liée au courant de polarisation (ou bias) qui est constant pour un paquet et doit être rapidement interrompu dès que le paquet est émis. Le troisième est lié aux bruits (BDL) intrinsèques des lasers qui sont émis en continu par les "N" ONT.

La qualité de la transmission en mode burst va dépendre de ces signaux, par conséquent, des spécifications de modulation du laser sont appliquées. Par exemple, le rapport de l'amplitude des données sur BA, ainsi appelé taux d'extinction (ER) doit être aussi élevé que possible. En général, il est supérieur à 10dB pour l'EPON et les signaux descendants du BPON et du GPON. Cependant, pour les signaux montants, la présence du signal BDL cause de sérieux problèmes sur les performances du récepteur mode burst à l'OLT qui cumule ces signaux provenant de multiples ONU. Ainsi, le taux d'extinction des signaux montants d'un GPON est généralement supérieur à 15dB mais n'est pas précisément spécifié ce qui peut causer des problèmes d'interopérabilité entre différents fournisseurs.

Contrôle de la puissance de sortie

Il est relativement facile de contrôler la puissance de sortie d'une diode laser utilisée pour une transmission continue. Grâce à un circuit de contrôle automatique de puissance, le photocourant d'une photodiode intégrée est moyenné afin de générer une tension stable pour contrôler le courant de d'alimentation du laser. Cependant, en mode burst, le niveau du courant moyenné va varier selon la fréquence du paquet transmis. Il était donc difficile de concevoir de tels circuits pour une transmission en mode burst mais il en existe aujourd'hui chez plusieurs fournisseurs.

2.2.2.2. Récepteur mode burst à l'OLT

Un récepteur mode burst est généralement constitué d'une photodiode, d'un pré- et postamplificateur et d'une récupération d'horloge et de données (CDR).



Figure 59 : Réception à l'OLT des signaux montants [49]

Contrairement au récepteur de l'ONU, le récepteur à l'OLT voit des paquets optiques de données, pour lesquels la puissance peut varier de plus de 15dB d'un paquet à l'autre sur une très courte période de temps. La Figure 59 illustre deux paquets reçus à l'OLT où sont annotés les

principaux paramètres qui vont définir le récepteur : "Ph et Pl"comme les puissances optiques de deux paquets consécutifs (on considère Ph > Pl), l'espace temporel entre ces deux paquets "Td", les puissances de polarisation (bias) du laser Bh et Bl et le bruit continu accumulé du laser "BDLa".

Bien que, comme on l'a vu précédemment, les émetteurs mode burst à l'ONU soient conçus pour minimiser leur composante continue, à l'OLT cette composante peut être significative pour le récepteur à cause du cumul du bruit continu de chaque ONU. Cela peut causer des distorsions sur la largeur du pulse ou encore une pénalité sur la sensibilité du récepteur. Le récepteur mode burst doit donc afficher une certaine tolérance aux composantes continues afin de différencier correctement les niveaux 0 et 1 des données transmises.

Récepteur Reset ou Resetless



Figure 60 : Signal de Reset pour la réception mode burst [49]

Un récepteur mode burst nécessite généralement mais pas systématiquement d'un signal de reset entre deux paquets consécutifs (Td) pour initialiser le circuit de contrôle automatique du seuil de la photodiode comme le montre la Figure 60. Un autre signal de reset est également nécessaire pour initialiser les registres de décalages de la CDR présentée au paragraphe suivant.

Ces deux signaux de reset ont une phase différente dont la relation est cruciale pour le bon fonctionnement du PON. Par contre si l'on arrive à supprimer un de ces signaux de reset, le fonctionnement du système devient bien plus simple. Les fournisseurs de modules de réception ont ainsi développé des récepteurs mode burst dits "resetless" car ils n'ont pas besoin du signal de reset. Cela a également permit de réduire l'écart Td entre deux paquets successifs : typiquement inférieur à 25ns pour un GPON.

CDR (Clock and Data Recovery)⁸

Dans un transpondeur 3R, la resynchronisation est faite grâce au bloc CDR qui permet de faire de la récupération d'horloge et de synchroniser les paquets avec l'horloge du système.



Figure 61 : Régénération des données reçues à l'aide d'une CDR [50]

La procédure de récupération des signaux d'horloge et des données est connue sous le sigle "CDR" (Clock and Data Recovery). Un module CDR contient un circuit de récupération

⁸ Ce paragraphe est extrait du manuscrit de thèse de Zineb Belfqih [61] et est repris en partie ici pour la clarté apportée sur ce sujet.

d'horloge et un circuit de décision, comme le montre la Figure 61. L'extraction et le traitement du signal d'horloge sont faits à partir du signal reçu. Le circuit de récupération d'horloge se situe après le module de réception.

Le circuit de récupération d'horloge comporte deux principales fonctions : l'extraction de la fréquence et l'alignement en temps ou en phase.

Le processus d'extraction consiste à obtenir un signal d'horloge de même fréquence que celle des données issues de la photo-détection. L'alignement en temps consiste à ajuster la phase d'horloge de sorte que le signal de données soit échantillonné à l'instant optimum par le circuit de décision.



Figure 62 : Régénération 3R sur la voie montante

En général, les CDR standards ont besoin d'un long préambule pour fonctionner correctement. Les circuits standards à base de Phase-Locked Loop (PLL) sont donc généralement inadéquats pour des CDR mode burst d'OLT PON.



Figure 63 : Diagramme temporel des trames en entrée et en sortie de la CDR

La Figure 63 montre un exemple d'une resynchronisation de deux paquets provenant de deux ONUs avec un débit fixé à 1.25 Gbit/s pour les deux émissions. Ce diagramme rappelle les différentes valeurs temporelles telles que : \mathcal{T}_g , le temps de garde de 25 ns entre deux paquets successifs, \mathcal{T}_{RXset} , le temps nécessaire à l'allumage du laser, \mathcal{T}_{reset} , l'impulsion temporelle de 5 temps bits nécessaire à la réinitialisation de la CDR entre deux paquets et \mathcal{T}_L , 16 temps bits pour le verrouillage de la CDR.

Une fois la CDR verrouillée à l'horloge de référence, le signal en sortie d'un indicateur Lock+/ Lock- passe au niveau haut et les données synchronisées apparaissent sur les sorties DATA+ et DATA-.

La localisation du front descendant du signal Reset est arbitraire. Ce front descendant peut apparaître durant le temps de garde ou en début de trame comme le montre le diagramme suivant.

2.2.2.3. OEO SFP ou SFF

Maintenant que l'on a défini le fonctionnement technique des émetteurs récepteurs de l'Extender Box, on peut se poser la question du choix de la forme physique de ces émetteurs. Pour une question pratique, il est bien-entendu préférable d'utiliser des modules mono-fibres intégrant un multiplexeur à 1,3µm/1.49µm. Ensuite l'aspect "pluggable" du module SFP est intéressant pour la maintenance ou le changement des composants en cas de panne, et pour nos réseaux d'accès, cette forme de module est également attractive car elle permet de changer ou d'ajuster les émetteurs-récepteurs (longueurs d'onde, puissance émises, sensibilités des photodiodes) selon l'évolution de l'architecture GPON (Classe C+, WDM, ... ?).

Pourtant, pour des raisons majoritairement économiques mais aussi liées à la difficulté technique révélée précédemment pour la gestion de l'émetteur à l'ONU, un module SFP ONU est pour l'instant difficilement envisageable.

Actuellement, nous avons donc principalement des EB OEO à base de modules SFF fabriqués par Zenko Technologies, Optoway, Huawei ou Telnet. Telnet en coordination avec Optoway ont tout de même accepté de nous fournir un prototype à base de modules SFP afin de tester également cette solution.



Figure 64 : Photographie d'une EB Telnet SFF (a), Zenko SFF (b) et Telnet SFP 1 vers 4(c)

3. Evaluation d'Extender Box sur GPON

Apres avoir dressé ce panorama des technologies d'Extender Box, nous avons testés ces techniques sur le réseau d'accès optique déployé aujourd'hui, le GPON, avec les objectifs définis précédemment qui doivent menés à une augmentation du budget optique du PON. Ces évaluations sont réalisées suivant certains critères de qualité de transmission qui sont détaillés lors de ce prochain paragraphe.

3.1. Critère de qualité d'une transmission optique

Lors de la transmission d'un signal optique dans un réseau fibré, le signal subit plusieurs dégradations. Afin de juger l'aptitude du signal transmis selon plusieurs paramètres d'expérimentation, des critères de qualité sont définis après réception du signal.

Dans tous nos tests, nous avons utilisé un codage à partir d'une séquence électrique de bits dite "pseudo aléatoire" ou PRBS (Pseudo Random Bit Sequence). Cette séquence possède un nombre d'éléments connus sous la forme 2n-1 (7 < n < 31) et permet de couvrir toutes les combinaisons possibles de successions de bits avec autant de symboles à "1" qu'à "0". Plus n est grand et plus la qualité de la transmission est estimée avec précision.

3.1.1. Diagramme de l'œil et taux d'extinction



Figure 65 : Diagramme de l'œil d'un signal NRZ

Le diagramme de l'œil est un oscillogramme représentant des données numériques issues d'un récepteur. Celles-ci sont échantillonnées de manière répétitive et sont appliquées à l'entrée de déviation verticale, alors que le déclenchement (déviation horizontale) est synchronisé avec le débit du signal. Le nom de ce diagramme vient du fait que pour nombre de codage, le motif obtenu ressemble à une suite d'yeux encadrés par deux rails horizontaux comme on peut le remarquer sur la Figure 65 représentant un diagramme de l'œil d'un signal NRZ.

De nombreux critères de performance peuvent être déduits de cette analyse. Si les signaux sont trop longs, trop courts, mal synchronisés par rapport à l'horloge du système, de niveau trop important ou trop faible, trop entachés de bruit, trop lents lors des changements d'état, ou comportant trop de dépassements ou d'inertie, le diagramme de l'œil les mettra en évidence. Un œil ouvert correspondra à un signal comportant un minimum de distorsion. La distorsion de la forme d'onde du signal, pouvant être attribuée à de l'interférence inter-symbole ou à du bruit, se traduit par une fermeture de l'œil.

Le taux d'extinction (TE ou ER) est le rapport des puissances moyennes des niveaux "1" et "0" en prenant en compte le niveau de bruit correspondant à la puissance mesurée lorsqu'il n'y a pas de lumière en entrée de l'appareil de mesure. On appelle ce bruit le "dark level". Les mesures du taux d'extinction sont effectuées par des oscilloscopes à entrée optique en affichant le diagramme de l'œil du signal transmis.

$$ER_{dB} = 10Log\left(\frac{<1>-darklevel}{<0>-darklevel}\right)$$

Pour minimiser les pénalités en puissance reçue, l'ER doit être maintenu à une valeur typique audessus de 10dB jusqu'à 2.5Gbit/s et 8dB à 10Gbit/s. Cela revient à garder une ouverture du diagramme de l'œil constante sans qu'il y ait une augmentation de la puissance moyenne des symboles "0".

3.1.2. Taux d'erreurs binaires (BER)

Chaque chaîne de transmission comporte un récepteur en fin de liaison qui convertit la puissance optique en courant électrique. Ce récepteur comporte plusieurs éléments, comme nous l'avons détaillé précédemment. La qualité du signal transmis est révélée par le dispositif de prise de décision présent dans le récepteur. Ce détecteur de seuil compare la tension reçue à un seuil préétabli et décide si le symbole binaire reçu est un "1" ou un "0" en fonction du résultat de la comparaison. Du fait des fluctuations dues au bruit de la liaison, une erreur est produite chaque fois que la tension reçue sera au-dessous du seuil lorsqu'un "1" a été émis ou au-dessus du seuil lorsqu'un "0" a été émis. Pour une probabilité d'erreur inférieure à 10⁻⁹, la transmission optique est alors considérée sans erreur.

Pour mesurer la qualité d'une transmission optique, on trace les courbes d'évolution du taux d'erreur binaire (TEB ou BER) en fonction de la puissance optique reçue. Pour interpréter la dégradation due à la ligne de transmission, on trace également la courbe dite de "Back To Back" souvent notée B2B. Cette dernière représente la courbe de taux d'erreurs binaires pour une liaison ne comprenant que l'émission et la réception. A partir de la courbe B2B, on mesure le seuil de sensibilité de la photodiode pour un BER de 10⁻⁹. L'écart mesuré en dB entre le seuil de sensibilité à 10⁻⁹ et la courbe de BER de la liaison étudiée représente la pénalité de la transmission.

3.1.3. Taux de perte de paquets

Nous venons de voir que les paquets peuvent être corrompus en raison d'erreurs de transmission de bits dues à une dégradation de la couche physique. En supposant qu'il existe une probabilité d'erreur binaire en chaque bit, et que les erreurs de bit sont indépendamment et identiquement distribuées, le taux d'erreur paquet est alors calculé pour des charges utiles de taille fixe. Le nombre de paquets perdus causés par une seule erreur bit dépend ainsi de deux facteurs : la détection de l'erreur et les capacités du système à la localiser dans le paquet. Par exemple, lorsqu'une erreur bit se produit dans l'entête du paquet, cela va provoquer la perte d'informations essentielles à la transmission du paquet donc la perte du paquet complet. Mais, pour les erreurs de bits dans la charge utile ce n'est pas nécessairement le cas. Si le système peut localiser l'adresse IP du paquet affecté, il est possible de se débarrasser du paquet endommagé au lieu de l'ensemble de la charge utile.

Le taux d'erreur paquet est défini par le nombre de paquets perdus par rapport au nombre de paquets transmis et s'exprime en pourcentage.

Il est possible mais souvent difficile de relier précisément le taux de pertes de paquets au taux d'erreur binaire pour les raisons décrites précédemment mais aussi car les réseaux transmettent généralement des paquets de longueurs variables [51].

3.2. Première évaluation en mode continu

En 2007, une première évaluation de l'amplification optique sur PON, nous a permis d'avoir de premières conclusions concernant la topologie envisageable pour un PON étendu à l'aide d'amplificateurs optiques.

Par rapport à la norme du GPON, on doit particulièrement noter quelques différences dans les configurations utilisées pour cette évaluation. Les lasers émettent à une longueur d'onde de 1550nm ou 1570nm afin de pouvoir d'une part utiliser des EDFA qui présentent de meilleures performances en bruit et gain, et d'autre part afin de réaliser une transmission avec des longueurs d'onde descendantes et montantes relativement proches qui pourront être amplifiées avec un seul amplificateur selon sa largeur de bande spectrale. De plus, les données montantes sont transmises et reçues de la même façon que les données descendantes : un laser (Tx) est modulé en continu à l'aide d'un générateur de données PRBS de longueur 2⁹-1. Ce signal est transmis à travers l'architecture de test et reçu par une photodiode APD (Rx) au module client et au central. Les signaux montants et descendants sont transmis sur une même fibre à l'aide de multiplexeurs/démultiplexeurs CWDM ($\Delta\lambda$ =20nm).

Cette première évaluation est réalisée avec des SOA centrés dans la bande C ou L de chez Inphénix, et des EDFA fournis par Highwave. Nous avons caractérisé ces amplificateurs en NF et gain et optimisé leur point de fonctionnement selon le courant de polarisation ou le courant de pompe, et la longueur d'onde.

Grâce à ces amplificateurs, on va chercher à augmenter le budget optique total en respectant la norme Classe B+ qui contraint l'architecture d'accès à un budget optique de 13dB pour un client proche et à 28dB pour un client plus éloigné. Cette variation de budget optique va induire une variation de la puissance reçue par les photodiodes d'une part, et d'autre part elle induit un changement de point de fonctionnement des amplificateurs selon la puissance injectée. Les résultats valides de budget optique sont donc ceux pour lesquels on obtient un taux d'erreur binaire <10⁻⁹ quelle que soit la ligne, "13dB" ou "28dB".

3.2.1. Amplification au central

La première topologie testée est celle où on insère l'amplificateur au central donc entre l'émission et le multiplexeur d'entrée. Le signal descendant à 2.5 Gb/s est ainsi amplifié avant d'être envoyé sur le réseau, l'amplificateur est alors en fonctionnement "booster". Le signal montant est amplifié après avoir traversé le réseau, l'amplificateur est alors en fonctionnement "préamplification". C'est une architecture qui a l'avantage de conserver la propriété passive du réseau d'accès PON et de partager les équipements installés au central entre tous les clients connecté au PON.



Figure 66 : Architecture du réseau avec amplificateur au central

L'ensemble des résultats obtenus est conséquent et il s'agit ici d'avoir une première approche sur l'amplification optique, ils sont donc fournis en Annexe 3 (page 209) et le tableau ci-dessous résume les meilleurs résultats obtenus grâce à une amplification au central.

Au central	Amplificateur	Descendant	Montant
Ligne	SOA 1530		4dB à 1550nm
28dB	SOA 1550	2dB à1570nm	
	EDFA 1	13,2dB à 1550nm	
	EDFA 2		10,6dB à 1550nm

Tableau 16 : Meilleurs résultats de l'amplification au central

Le budget obtenu avec une amplification réalisée grâce à des SOA est seulement de 2 dB donc il n'est pas intéressant de développer ce cas car il sera difficile de l'améliorer avec un autre SOA dont les caractéristiques en gain et bruit seraient quasiment identiques.

Pour l'amplification au central par des EDFAs :

En booster, donc en sens descendant, on obtient un budget de 13.2dB pour une puissance injectée Pin = -13dBm, un gain de 25dB, un NF de 5dB, et une puissance de saturation de 15dBm. On pourrait optimiser ce résultat avec un nouvel amplificateur qui présenterait pour une puissance injectée entre -3dBm et 3dBm, un NF de 4dB et un gain de 15dB. On aurait ainsi une puissance de sortie identique mais avec un meilleur rapport signal sur bruit grâce au meilleur NF. En préamplificateur, donc en sens montant, on obtient un budget de 10.6dB pour une puissance de saturation de 15dBm. On pourrait optimiser ce résultat avec un nouvel amplificateur qui présente pour une puissance de saturation de 15dBm. On pourrait optimiser ce résultat avec un nouvel amplificateur qui présente pour une puissance injectée entre -45 dBm et -30 dBm, un NF de 4dB et un gain de 15dB. On aurait ainsi une puissance de sortie entre -25 et -20dBm pour être mesurée par une photodiode APD avec une sensibilité à -28dBm.

3.2.2. Amplification en ligne

Pour cette architecture, l'amplification est en ligne, c'est-à-dire après le multiplexeur qui délimite le central. Un amplificateur (SOA ou EDFA) pour le sens montant et un autre pour les sens descendant sont insérés dans le réseau grâce à deux multiplexeurs CWDM. Les configurations à étudier sont les mêmes que pour l'amplificateur au central. L'inconvénient de cette architecture est que le PON n'est plus passif à cause de la présence de l'amplificateur en ligne. Il faudrait donc prévoir un système d'alimentation dans le réseau PON. Pour autant ce scénario est cohérent avec une migration de réseau. En effet à la suite d'un déploiement de type GPON Classe B+, il est intéressant de proposer de localiser une "boite noire" d'amplification à la place de l'ancien central et de remonter l'OLT de nouvelle génération dans un central plus amont.



Figure 67 : Architecture du réseau avec amplificateur en ligne

Le Tableau 17 résume les meilleurs résultats de budget optique entre l'OLT et l'amplificateur, obtenus grâce à une amplification en ligne monodirectionnelle. L'ensemble des résultats obtenus est présenté en Annexe 4 (page 210).

En ligne	Amplificateur	descendant	Montant
Ligne 28	SOA centré à 1510nm	15,2dB à 1550nm	18dB à 1550nm
(monodir)	SOA centré à 1550nm	15,9dB à 1550nm	16dB à 1570nm
	EDFA 1	32,8dB à 1530nm	
	EDFA 2		40,3dB à 1530 nm

Tableau 17 : Meilleurs résultats de l'amplification en ligne : Budget possible de l'OLT à l'EB

Avec un SOA à 1550 nm amplifiant un laser à 1550 nm en sens descendant, et un SOA à 1510 nm amplifiant un laser à 1570 nm en sens montant, on obtient au mieux 15.9 dB de budget. Le cas qui limite ce budget est le sens descendant pour lequel le SOA a le point de fonctionnement suivant : Pinjectée = -15 dBm ce qui donne d'après les courbes de gain et NF, un gain de 18 dB et un NF de 9 dB et une puissance de saturation de 7 dBm.

Il est possible d'améliorer ce cas grâce un SOA ayant un meilleur facteur de bruit, par exemple et si possible un NF de 7 dB pourrait nous permettre d'obtenir plus de budget optique. Pour le sens montant, le point de fonctionnement est différent : Pinjectée = [-28 ; -13] dBm ce qui nous donne un gain de 16dB, un NF de 8.35 dB et une puissance de saturation de 15 dbm. On peut

espérer optimiser ce budget avec un SOA dont le NF est seulement de 7dB et en y injectant une puissance entre -30dBm et -15 dBm. I

Concernant l'amplification par les EDFAs, on estime que les résultats obtenus sont suffisants : 32.8 dB en sens descendant et 40.3 dB en sens montant.

3.2.3. Amplification en bidirectionnel

Pour cette architecture, on veut utiliser une propriété intéressante du SOA qui est son fonctionnement bidirectionnel. L'amplification se fait comme précédemment en ligne mais cette fois il n'y a qu'un seul amplificateur : un SOA (les EDFAs standards ne fonctionnent pas en bidirectionnel). L'avantage de cette architecture est qu'elle permet de n'avoir qu'une fibre dans le réseau et elle économise également 2 multiplexeurs par rapport à l'architecture en ligne. En plus de l'inconvénient de ne plus avoir un réseau passif, l'amplification dans les deux sens avec deux longueurs d'onde différentes peut créer des effets de "cross talk" ou XGM (Cross Gain Modulation) dans le SOA, il faut donc pouvoir mesurer l'impact des ces effets. Pour cela, on doit tenir compte de 4 configurations pour chaque couple de longueur d'onde descendante-montante ($\lambda 1 = 1530$ nm et $\lambda 2 = 1550$ nm ; $\lambda 1 = 1570$ nm et $\lambda 2 = 1550$ nm ; $\lambda 1 = 1570$ nm) :

• Configuration 1 : "13 / 13 "

Signal descendant à $\lambda 1$ mesuré à 13dB avec un signal montant à $\lambda 2$ passant par la ligne 13 dB. • Configuration 2 : "28 / 28"

Signal descendant à $\lambda 1$ mesuré à 28dB avec un signal montant à $\lambda 2$ passant par la ligne 28 dB • Configuration 3 : "28 / 13 "

Signal descendant à $\lambda 1$ mesuré à 28dB avec un signal montant à $\lambda 2$ passant par la ligne 13 dB. • Configuration 4 : "13 / 28"

Signal descendant à $\lambda 1$ mesuré à 13dB avec un signal montant à $\lambda 2$ passant par la ligne 28 dB.

Ces 4 configurations sont difficiles à comparer l'une avec l'autre car l'amplificateur change radicalement de point de fonctionnement selon la configuration, mais on pourra comparer les résultats avec ceux obtenus avec deux SOA en ligne fonctionnant en monodirectionnel pour se rendre compte des effets possibles de cross talk ou XGM sur la qualité de la transmission.



Figure 68 : Architecture du réseau avec amplificateur en bidirectionnel

Le Tableau 18 résume les meilleurs résultats de budgets optiques entre l'OLT et le SOA, obtenus grâce à une amplification en ligne bidirectionnelle.

Carefra 2	↓1570nm	↓1550nm	↓1550nm	↓1530nm
28/13	↑1550nm	↑1570nm	↑1530nm	↑1550nm
SOA 1510	13,5dB	15,5dB	15,1dB	12,8dB
SOA 1550	13,3dB	11,6dB	14,9dB	15,5dB*
SOA linéaire	10,6dB	13,3 dB	13,5 dB	13,6 dB

Les résultats obtenus pour chaque configuration en implémentant plusieurs SOA et pour plusieurs couples de longueurs d'onde sont présentés dans leur ensemble en Annexe 5 (page 212).

* Problème à 28/28

Tableau 18 : Meilleurs résultats de l'amplification en bidirectionnel

On obtient le meilleur budget (15.5 dB) en utilisant le SOA centré à 1510 nm. Pour ce SOA on a un NF de 8 dB. La configuration qui limite le plus le budget est celle où le signal descendant est mesuré par la ligne 28 dB et le signal montant injecté par la ligne 13 dB, c'est la configuration 3 présentée dans le tableau précédent. La deuxième configuration qui limite le budget à 18.6 dB (cf. Annexe 5), est la configuration 2 où les signaux descendant et montant sont respectivement mesurés et injectés à 28 dB. En analysant le spectre optique du SOA on peut expliquer ce phénomène : du fait que le spectre du SOA ne soit pas plat, le signal montant à 1570 nm fait face à plus d'ASE que celui descendant à 1550 nm.

En bidirectionnel, on remarquera tout de même une légère perte de budget optique comparé au SOA monodirectionnel. Nous avons donc évalué l'impact du fonctionnement en bidirectionnel sur les principales caractéristiques de l'amplificateur. Cette évaluation entre dans un cadre d'application hors GPON mais va toucher le contexte de l'amplification WDM et est donc décrite au Chapitre 3 en section 2.1.1, page 172.

3.2.4. Synthèse des résultats et conclusions

Au central, nous avons obtenu au mieux un budget étendu de 2dB avec un SOA pour chaque sens de transmission et 10,6dB avec deux EDFA mais l'EDFA n'est pas conforme au plan d'allocation en longueur d'onde du GPON. De plus, le budget de 2dB obtenu avec un SOA est insuffisant pour envisager une migration du réseau d'accès permettant de remplir les objectifs d'augmentation du taux de partage et de la portée tout en envisageant une centralisation des OLT plus en amont dans le réseau. En observant les résultats obtenus en ligne, on peut tout de même imaginer un emplacement de l'amplification au central à condition d'atténuer systématiquement les signaux entre l'OLT et les amplificateurs dans l'enceinte du central. Cela revient à avoir une amplification en ligne que l'on extrapole au central grâce à ces atténuateurs.

En ligne, nous obtenons en effet de meilleurs résultats. Avec deux SOA : 15.9 dB ; avec deux EDFA : 32.8 dB (en monodirectionnel). Un emplacement de l'amplification en ligne permet donc d'obtenir un budget supplémentaire suffisant pour imaginer une migration de réseau selon les objectifs précédents. On remarque tout de même l'importance du choix des paramètres de l'amplificateur. Le budget étendu est doublé d'un SOA à un EDFA, grâce à de meilleures performances (gain, NF, Psat). Le point négatif de cette configuration est le besoin d'un amplificateur par sens et de multiplexeurs qui rajoute des coûts supplémentaires non négligeables surtout si on considère un amplificateur à fibre dopée (environ 1000 €).

L'amplification en ligne bidirectionnelle permet de diminuer ces coûts en n'utilisant qu'un seul SOA pour les deux sens de transmission. On obtient des résultats quasiment similaires au monodirectionnel : une faible perte de budget peut s'expliquer par un partage du gain de l'amplificateur sur les deux sens de transmission. L'amplification bidirectionnelle a pour contrainte sa largeur de bande spectrale, on a utilisé ici deux longueurs d'onde espacées de 20nm

mais si on réduit cet espacement, des effets non linéaires seront à prendre en compte comme le XGM et la diaphonie inter-canal. De plus, dans le cas d'une migration du GPON actuel, la norme donne un signal descendant à 1490nm et un signal montant à 1310nm, soit un espacement de 180nm qui est largement supérieur à la bande d'amplification d'un seul SOA. Ce type d'implémentation d'amplification bidirectionnelle n'est donc pas envisageable pour un GPON mais pourrait s'appliquer à une future génération de réseau. Des activités de recherche sont tout de même menées afin d'augmenter la largeur spectrale des SOA, notamment dans le cadre du projet de l'ANR AROME (Amplificateur bas-coût pour Réseaux Optiques MEtropolitains et d'accès) qui vise notamment à créer un SOA de largeur de bande 100nm, pour des applications d'amplification multicanaux [52].

En conclusion à cette première évaluation de l'amplification optique de réseau PON, on retiendra qu'une implémentation en ligne est optimale mais que l'on peut extrapoler ces résultats pour une implémentation au central avec des atténuateurs fixes. Ces résultats nous ont permis d'observer l'importance du choix des paramètres des amplificateurs (NF, Gain, Psat, largeur spectrale). L'impact de leur bruit et de leurs points de fonctionnements sont révélateurs sur l'extension de budget optique obtenue.

3.3. Evaluation sur GPON commercialisés

Les résultats de l'évaluation d'extension de budget en continu nous ont permis de poursuivre ces tests sur une architecture GPON déployée aujourd'hui. Disposant de deux systèmes GPON, l'un fourni par Huawei et l'autre fourni par Alcatel-Lucent (ALU), nous avons donc conduit une évaluation de plusieurs prototypes d'Extender Box sur ces GPON commercialisés.



Figure 69 : Schéma de test d'une EB sur un GPON

La Figure 69 présente l'implémentation d'une Extender Box dans une architecture GPON. Cette architecture typique est la base des tests réalisés. Comme pour l'évaluation en continu, dans le but d'évaluer l'augmentation de budget optique, l'EB est placée en ligne mais les résultats peuvent être extrapolés pour une position au central. Nous avons défini le budget "déport" (également dit Trunk) comme le budget entre l'OLT et l'EB, et le budget "accès" comme celui entre l'EB et les ONU.

Les systèmes GPON utilisés pour les tests sont disponibles commercialement et sont ceux actuellement déployés sur le réseau FTTH. Les récepteurs sont des APD à l'OLT et à l'ONU. Nous avons mesuré les caractéristiques du GPON étendu avec un trafic bidirectionnel entre l'OLT et plusieurs ONU en même temps, sur 20km de fibre.

A l'aide d'un testeur de trames Ethernet (MD1230 d'Anritsu ou N2X d'Agilent), on vient insérer une séquence PRBS de longueur 2^{23} -1 dans la charge des paquets Ethernet transmis à l'ONU et à l'OLT. Après transmission bidirectionnelle symétrique d'une charge de trafic à 100Mbit/s dans le débit descendant et montant, on va ensuite comparer ces trames émises avec les trames reçues à l'OLT et à l'ONU.

En sortie du lien de collecte, le système GPON ALU permet de récupérer les trames erronées et de les analyser bit par bit afin d'établir le taux d'erreur binaire, par contre le système Huawei détruit les trames erronées et ne conserve que le nombre de paquets perdus. Le critère de qualité sera donc différent d'un système à l'autre : le Taux d'Erreur Binaire (TEB ou BER) pour ALU et le pourcentage de perte de paquet pour Huawei.

Nous avons tout d'abord mesuré sur chaque GPON seul (sans EB), les performances de budget optique disponible permettant d'avoir une transmission sans erreurs (BER $<10^{-9}$) :

- GPON ALU : entre 11dB et 34dB
- GPON Huawei : entre 3dB et 32dB

Ces performances peuvent varier de l'ordre de +/- 2dB selon les ports PON utilisés.

Cartographie de Budget

Nous avons défini ce terme de cartographie de budget car c'est un graphe qui permet d'avoir un bon visuel de la zone de fonctionnement d'une EB. En effet, nous avons désigné précédemment les budgets accès et déport et selon les performances et l'emplacement souhaité de l'EB, ces budgets seront variables sur l'architecture. On dresse donc une cartographie de budget optique permettant d'avoir une transmission sans perte de paquet quand on réalise une mesure de perte de paquet (sur GPON Huawei), et une cartographie de budget optique en fonction du BER mesuré (sur GPON Alcatel).

Pour chaque mesure, on a distingué les résultats de mesure des signaux montants et descendants afin d'avoir une visibilité sur les raisons éventuelles de disfonctionnement du GPON. Une zone de fonctionnement de l'EB est ensuite définie en corrélant les graphes des signaux montants et descendants, afin d'afficher le fonctionnement bidirectionnel du GPON étendu dans son ensemble.

La construction d'une cartographie de budget se fait en fixant par exemple le budget déport et en faisant varier le budget accès par pas de 1dB à l'aide d'un atténuateur variable. Pour chaque variation, on mesure le taux de perte de paquets ou le BER permettant ainsi de dresser des courbes de BER pour un budget déport donné. Ensuite, la cartographie se dresse en réitérant cette opération pour plusieurs valeurs de budget déport.

Zone d'hystérésis



Figure 70 : Schématisation du phénomène d'hystérésis

Pour chaque variation de budget optique nous avons vérifié s'il existait un phénomène d'hystérésis à la réception des signaux. En effet, la robustesse du GPON et de l'EB n'est pas la même si on y transmet un trafic préalablement établi entre l'OLT et un ONT ou si on est phase de connexion de l'ONT avec transmission des trames d'initialisation (processus de ranging). Ainsi, les mesures doivent tenir compte d'un phénomène d'hystérésis possible en initialisant à chaque mesure la transmission (redémarrage des ONT).

Nous avons ensuite répété cette procédure de tests pour différentes solutions d'Extender Box et architectures de GPON étendu qui feront l'objet des paragraphes suivants.

Les prototypes d'Extender Box ont été créés en discussion avec nos fournisseurs selon les deux solutions préconisées par la norme ITU G984.6 : l'une à base d'amplification optique et l'autre à base de répéteurs Optique-Electrique-Optique.

3.3.1. Extender Box GPON à base d'amplification optique

Comme l'a démontré l'évaluation en continu, l'amplification optique représente une solution intéressante pour une Extender box GPON car elle permet d'offrir une large bande d'amplification au système. Les performances des amplificateurs dépendent fortement de leur type : SOA ou PDFA. Ces amplificateurs sont transparents aux débits et compatibles au WDM dans leur propre bande spectrale optique d'amplification. Néanmoins, ils représentent une source de bruit d'émission spontanée qui va dégrader la transmission des signaux.

3.3.1.1. Double SOA

Nous proposons d'étudier une solution d'Extender Box basée sur des SOA. Le SOA est un bon candidat pour réaliser une Extender Box pour des raisons techniques (transparence, large bande, gain typique 20dB, Facteur de Bruit typique 6dB) et également économiques (bas coût, implémentation facile). Un DSOA (Double SOA) est composé de deux amplificateurs à semiconducteur sur le même circuit, un pour chaque sens de transmission. Leur bande passante typique est de 50nm, l'un est centré à 1,31µm, l'autre à 1,49µm. Les caractéristiques mesurées en NF et en Gain des SOA sont résumées dans le Tableau 19 et présentées en Annexe 6.

	λ = 1310nm Montant		λ =14 Desce	190nm endant
DSOA	200mA	450mA	100mA	300mA
NF(dB)	6,3	6,5	6	5,2
Gain(dB)	17	18,5	14,6	21,8

Tableau 19 : Caractéristiques des DSOA à Pin= -20dBm
--

Nous avons évalué les performances des modules DSOA pour chaque application, sur chaque GPON (Huawei et Alcatel), en réalisant des mesures de BER ou de pertes de paquets sur la transmission afin d'estimer le budget optique disponible. La transmission est considérée sans erreur pour un BER $< 10^{-9}$ pour tous les ONU, dans les deux sens de transmission. Des paquets sont complètement perdus pour un BER $> 10^{-5}$ à cause d'erreurs dans l'en-tête de la trame Ethernet donc aucune mesure n'est possible en dessous de cette limite.

Pour éviter tout coût supplémentaire à l'EB, aucun filtrage optique n'a été utilisé pour limiter l'ASE transmis par l'amplificateur. Les multiplexeurs utilisés sont des MUX larges bandes ayant pour fenêtres passantes : 1.26µm-1.38µm et 1.4µm-1.51µm. Ils n'agissent donc pas sur les spectres des amplificateurs montants et descendants.

La première partie de l'évaluation du DSOA est basée sur une mesure de perte de paquets sur le GPON Huawei. Nous avons dressé les cartographies de budget accès et déport pour chaque DSOA à différents courants de polarisation comme le montre la Figure 71.



Figure 71 : Cartographie de budget du DSOA sur GPON Huawei en fonction du courant de polarisation

On remarque grâce à ces résultats l'impact du courant de polarisation sur les limites de la zone de fonctionnement du DSOA. En effet pour un courant faible, la surface de la zone de fonctionnement n'est pas forcément plus faible mais s'établie pour des budgets optiques plus faibles. Cela s'explique par une chute du gain de l'amplificateur avec le courant de l'amplificateur. L'objectif étant d'obtenir un maximum de budget supplémentaire à une architecture d'accès de classe B+, on retient donc un courant de polarisation maximum qui permet d'avoir un budget total maximum : le DSOA polarisé à 300mA.

Nous avons réitéré ces tests sur GPON ALU et retiendrons les résultats du DSOA polarisé à 300mA, illustrés en Figure 72.

Cette cartographie de budget accès/déport nous permet de définir une zone de fonctionnement sans erreur de paquet. En termes de performance de l'Extender Box DSOA, on en conclue que l'on peut imaginer une architecture de GPON étendu avec un budget de Classe B+ dans l'accès (13 à 28dB) auquel on vient ajouter un budget déport entre 12.5dB et 16dB, soit un budget total de 44dB.

Ces tests sur un autre GPON, nous ont permis d'apporter des conclusions sur les limitations de cette zone de fonctionnement.

Tout d'abord l'architecture de test limite cette zone par ses pertes d'insertions des composants passifs utilisés : atténuateurs et multiplexeurs. On ne peut donc pas réaliser de tests en dessous d'un budget optique égal aux pertes d'insertions d'où une limite notée "IL" pour Insertion Loss sur le graphe précédent.



Figure 72 : Cartographie de budget du DSOA à 300mA bidirectionnel sur GPON ALU

On observe un fonctionnement similaire de l'EB sur Huawei et ALU. La différence se fait sur les limites de chaque GPON : saturation des récepteurs (Rx) pour des budgets déports et/ou accès trop faibles. Les récepteurs du GPON ALU ont une puissance de saturation plus élevée que ceux de Huawei, ce qui implique une réduction de la zone de fonctionnement sur ALU.

On remarque également sur le GPON ALU, l'apparition de zone d'hystérésis. Le GPON ALU est effet au départ moins robuste à une dégradation des signaux optiques en phase d'initialisation. Ce fonctionnement est limité quel que soit le GPON à un budget total maximum de 45dB. Cela s'explique d'une part par la sensibilité des récepteurs à l'OLT et à l'ONU, mais également par la limite du gain des SOA montants et descendants.

Enfin, pour un budget accès élevé (>25dB), ou un budget déport élevé (>28dB), on observe une limite dite d'ASE, due à une forte dégradation de rapport signal à bruit optique (OSNR) des signaux respectivement montants et descendants. En effet, les SOA montants et descendants produisent de l'ASE non négligeable dans ces configurations.

Une étude plus poussée de mesure du BER a permis de préciser ces conclusions sur les limitations de la zone de fonctionnement d'une Extender Box GPON à base de SOA. Les résultats sont présentés en Figure 73 pour les transmissions montante et descendante.

Cette caractérisation permet d'observer en détail la dégradation des signaux en fonction des budgets accès/déport selon la valeur des taux d'erreur binaire affichés en log(BER) sur ces courbes.

Un système GPON est d'abord limité par le signal descendant : si le BER du signal descendant est élevé (> 10⁻⁵), le signal montant n'est pas transmis. Toutefois, nous remarquons que l'on obtient de meilleurs résultats de budget pour la transmission descendante. Cela est dû en partie, à la différence de performance entre les amplificateurs des transmissions montantes et descendantes. En effet, l'amplificateur des signaux montants a un gain inférieur et un facteur de bruit plus élevé. En outre, le récepteur à l'ONU montre de meilleures performances que récepteur mode burst à l'OLT.



descendants (b).

Pour le signal descendant, nous avons remarqué une large bande d'erreurs pour un budget déport élevé (> 30dB). En réalité, la puissance d'entrée dans le SOA est trop faible pour obtenir un OSNR suffisamment élevé avec un amplificateur de 20dB de gain. Pour des raisons similaires, nous avons constaté le même phénomène pour le signal montant, à un budget d'accès élevé.



Figure 74 : Courbes de BER des signaux descendants à budget d'accès fixe avec un DSOA

Une étude plus précise a été effectuée sur la mesure du BER pour certains points importants du budget d'accès. Pour des budgets d'accès fixés à 13dB, 19dB, 24dB et 29 dB, nous avons dressé les courbes de BER en fonction du budget déport (les courbes de BER sont habituellement

réalisées en fonction de la puissance reçue aux récepteurs mais cette mesure serait imprécise (moyennée) pour les signaux montants transmis en mode burst). Ces courbes de BER sont illustrées sur la Figure 74 pour les signaux descendants et en Figure 75 pour les signaux en montants.

Nous pouvons distinguer deux types de courbes BER sur ces graphiques. Les courbes décroissantes correspondent à l'éblouissement des récepteurs APD (-8dBm et-2dBm) à l'OLT (montant) et à l'ONU (descendant) obtenus pour des budgets trop faibles.

Les courbes croissantes sont elles associées à la limite de gain des amplificateurs et la sensibilité des récepteurs.

Pour la transmission montante, sur la Figure 75, le budget d'accès est fixé à trois valeurs de sorte que la puissance d'entrée du SOA et l'OSNR qui en résulte soit constant pour chaque courbe.



Figure 75 : Courbes de BER des signaux montants à budget d'accès fixe avec un DSOA

Ainsi nous pouvons remarquer sur la transmission montante qu'une diminution de 10 dB dans la gamme d'accès correspond à une augmentation de 16 dB dans la gamme budget déport. Ce résultat non linéaire est associé à la dégradation de l'OSNR sur le trafic mode burst reçu à l'OLT. En effet pour un fort budget d'accès, la puissance d'entrée du SOA à 1310nm est faible d'où un mauvais rapport signal à bruit en sortie de l'amplificateur.

Sur la Figure 74, le budget d'accès est également fixé à quatre valeurs pour la mesure du signal descendant. Le comportement de ces courbes est représentatif de la limitation de gain du SOA à 1490 et la sensibilité des récepteurs à l'ONU.

La limitation de budget optique est donc due à une combinaison de l'impact de l'ASE (OSNR trop faible en réception), de la limite du gain du DSOA (saturation de l'amplificateur), de la saturation et de la sensibilité des récepteurs. En corrélant les résultats de BER des signaux montants et descendants en Figure 76, on obtient une cartographie de fonctionnement du DSOA similaire à celle obtenue en mesure de paquets.



Figure 76 : Cartographie de BER d'un DSOA sur GPON en fonctionnement bidirectionnel

Si on considère un budget accès de Classe B+, donc de 13dB à 28dB, l'EB DSOA permet d'obtenir un budget déport de 12dB à 16dB. Cela délimite une zone de fonctionnement qui permet de conserver une dynamique de budget de 15dB entre un client proche et un client plus éloigné. Ainsi un budget total de 44dB est réalisable de l'OLT aux ONU.

Des études similaires ont également fait l'objet de communications scientifiques [53] et ont notamment mené à un essai-terrain par l'opérateur British Telecom [54].

3.3.1.2. PDFA

Compte tenu des excellents résultats d'extension de budget obtenus en continu grâce à l'amplification par EDFA, nous avons testé son équivalent dans la bande spectrale du GPON : un PDFA.

En effet, nous avons utilisé pour la transmission montante un PDFA offrant une bande spectrale large d'environ 40nm centrée autour de 1310nm. C'est un amplificateur qui fournit un gain relativement élevé (26dB) et surtout un faible facteur de bruit (Noise Figure de 5dB), caractéristiques appropriés pour une amplification du signal montant en mode burst.

La bande spectrale d'amplification du PDFA étant adaptée seulement aux signaux montants, nous l'avons donc associé à un SOA, un BOA, et un OEO 2R à 1490nm pour les signaux descendants. Nous avons ensuite établi une cartographie de budget pour différents courants de pompe du PDFA, pour chaque association descendante et sur chaque GPON. La Figure 77 illustre les résultats de mesures de perte de paquet obtenues sur GPON Huawei avec un PDFA dont la diode de pompe est polarisée à un courant de 800mA, associé à un SOA produit par Alphion, polarisé à un courant de 300mA.



Figure 77 : Cartographie de budget avec PDFA & SOA sur GPON Huawei

Ces résultats montrent qu'un PDFA associé à un SOA permet d'obtenir jusqu'à 35dB de budget dans l'accès (pour un budget déport de 10dB), on pourrait donc améliorer le budget du GPON (31dB) de 4 dB avec cette solution implémentée au central ou déportée de 10dB du central optique. Si on considère maintenant une architecture d'accès de classe B+, le gain du PDFA permet d'augmenter le budget déport de 12 à 20dB, permettant ainsi d'avoir un GPON dont le budget total serait de 48dB. Pour une migration d'un réseau d'accès de classe C+, on pourrait également déporter l'OLT sur une base de budget optique compris en 11 et 16dB, soit un budget total de 48dB donc similaire à une migration de classe B+.

Cette solution d'EB basée sur un PDFA combiné avec un SOA présente donc les meilleurs résultats en termes de budget optique total. Cependant, comparé à un DSOA, le coût supplémentaire d'investissement dans une technologie "exotique" comme le PDFA risque de ne pas faire aboutir cette solution comme possible Extender Box.

C'est pourquoi, les autres résultats de cartographies obtenues avec un PDFA sont présentés en Annexe 7. Nous avons également réalisés des tests avec des BOA, résumés sur cette même annexe.

3.3.1.3. Amplification en série ou en cascade

Les paragraphes précédents ont démontrés que l'ont pouvait obtenir un budget déport de l'ordre d'une quinzaine de dB à l'aide de modules d'amplification optique. Nous allons maintenant évaluer les implémentations possibles d'insertion des amplificateurs optiques dans une architecture GPON pour des applications en zone très dense ou en zone peu dense.

Un déploiement en zone rurale est problématique du fait d'une longue portée à atteindre pour couvrir peu de foyers. Ce budget supplémentaire obtenu servirait donc en priorité à augmenter la distance parcourue par le PON tout en permettant une flexibilité maximale sur les arbres PON distribués. De ce fait, on pourrait envisager de reproduire un schéma d'amplification optique en série comme c'est le cas dans les réseaux fibrés sous-marins.

Dans le cas d'une zone très dense, l'objectif d'un GPON étendu est d'augmenter au maximum le taux de partage au niveau de l'OLT. En utilisant ce budget de déport supplémentaire, une topologie avec un coupleur optique au central est envisageable. On viendrait ainsi cascader plusieurs Extender Box pour distribuer plusieurs arbres PON.

Ces configurations font appel à plusieurs amplificateurs cascadés en série ou en parallèle où le bruit d'ASE des amplificateurs va jouer un rôle bien plus perturbant que ce que l'on a vu précédemment, sachant surtout qu'il n'est pas envisageable d'insérer un filtrage optique dans l'accès. Nous avons alors cherché à évaluer l'impact du cumul d'ASE avec les mêmes DSOA et dans les mêmes conditions que précédemment.

3.3.1.4. Amplification en série

Dans le cas d'une application en zone rurale, une architecture de GPON étendu avec deux Extender Box cascadées en série permettra de fournir un accès à plusieurs abonnés sur une longue portée, tel que le décrit la Figure 78.



Figure 78 : Architecture de test avec deux DSOA cascadés en série

L'idée est d'insérer 2 EB cascadées en série entre l'OLT et les ONU, afin de répéter trois sections d'arbres PON. Les performances d'un tel système sont évaluées par mesure de BER des signaux montants et descendants en tenant compte du cumul de bruit d'ASE, des limites de gain des SOA et des récepteurs du GPON ALU.

Nous définissons le budget déport 1, entre l'OLT et la première EB, le budget déport 2 entre les deux EB et le budget accès entre la dernière EB et les ONU.



Figure 79 : Résultats de la mesure de BER des signaux descendants et montants

A l'aide d'atténuateurs variables, pour plusieurs valeurs de budget déport 1 et 2 on fait varier le budget accès, ce qui permet d'obtenir une cartographie de BER en fonction des budgets de Déport et Accès présentée en Figure 79. Pour simplifier les mesures et l'affichage des résultats, les budgets déport 1 et 2 varient toujours en même temps par pas de 1dB et le budget accès varie par pas de 0,5dB.

Ces résultats nous montrent qu'il est possible de répéter un budget de 21 dB par section avec un $BER < 10^{-11}$ soit un budget total de 63dB (déport 1 + déport 2+ accès). La zone de fonctionnement est limitée par la dégradation de l'OSNR due à l'ASE, par la saturation des récepteurs et par les limites des SOA (gain et puissance de saturation) qui nous ramène à la sensibilité des photodiodes. Une mesure plus précise du BER des signaux montant et descendant, pour des budgets déport fixés à 19dB et 22dB, est présentée en Figure 80. Les courbes décroissantes correspondent à la saturation des récepteurs, les courbes croissantes à la sensibilité des récepteurs. Elles sont exprimées en fonction du budget accès à cause du fonctionnement en mode burst du système.



Figure 80 : Courbes de BER à budget déport fixés à 19 et 22 dB

Cette étude s'effectue dans un contexte de déploiement de PON en zone rurale soit un petit nombre de foyers à connecter sur une longue distance.

Avec un budget total de 63dB obtenu précédemment, l'architecture présentée en Figure 81 a été réalisée. Elle permet de desservir à partir d'un seul OLT, à l'aide de coupleurs dissymétriques 10/90, trois arbres PON tous les 20km : le premier en Classe B+ [13-28dB], le second en Classe B [10-25dB] et le dernier en Classe A [5-20dB]. Cette architecture offre un maximum de flexibilité au réseau sur une distance totale de 60km, répartie sur trois arbres PON de 20Km, configuration idéale pour un déploiement rural du réseau FTTH.

Chapitre 2 : Extension de portée des systèmes GPON



Figure 81 : Application typique pour un GPON rural

Cependant, on doit prendre en compte dans ces résultats l'éblouissement des récepteurs : Il réduit l'intervalle de budget possible entre deux ONU (normalement 15dB) à 10dB qui est un résultat acceptable considérant la flexibilité déjà apportée par une telle architecture.

Le bruit d'ASE se cumule proportionnellement au nombre d'EB cascadées ce qui pourrait devenir problématique. Nous présumons tout de même que deux EB en série est un bon compromis pour éviter les effets néfastes d'amplification d'ASE tout en ayant une extension de budget suffisante pour s'adapter à une démographie typiquement rurale.



3.3.1.5. Amplification cascadée en parallèle

Figure 82 : Architecture de test avec 2 DSOA connecté en parallèle

Dans le cas d'une zone très dense, l'objectif d'un GPON étendu est d'augmenter au maximum le taux de partage au niveau de l'OLT. En utilisant ce budget de déport supplémentaire, une topologie avec un coupleur optique au central est envisageable. On viendrait ainsi cascader plusieurs Extender Box pour distribuer plusieurs arbres PON.

La Figure 82 décrit cette architecture de test avec un coupleur 1 vers 2, distribuant deux arbres PON amplifiés avec deux modules DSOA ayant des paramètres quasi identiques. Cette figure fait également apparaître le cumul d'ASE sur les signaux montants reçus à l'OLT dû au fait d'insérer des amplificateurs optiques derrière le premier coupleur. Ce cumul d'ASE peut être très nuisible sur la transmission, notamment de paquets de puissance faibles où le bruit d'ASE devient prépondérant et dégrade le SNR du signal de données.

Sur l'architecture de GPON étendu, nous définissons le budget déport représentant les pertes optiques entre l'OLT et l'EB et le budget accès entre les EB et les ONU. Les tests sont réalisés en présence de 20km de fibre optique et sans aucun filtre optique pour réduire l'ASE. Pour évaluer l'impact du cumul d'ASE, nous avons tout d'abord testé l'architecture en présence d'un seul DSOA, le DSOA 2 n'étant pas connecté.

En variant les atténuateurs de budget déport et accès, nous obtenons en Figure 83, la zone de fonctionnement pour laquelle aucun paquet n'est perdu sur les signaux montants et descendants. Cette zone diffère de celle obtenue avec un DSOA en Figure 76 car cette mesure a été réalisée sur un GPON d'un fournisseur différent et d'une version antérieure. De la même manière, nous obtenons la zone de fonctionnement en présence des deux EB. Sur la transmission montante, cette zone est considérablement réduite pour un faible budget de déport. Cela est dû à la dégradation de l'OSNR à la réception à l'OLT. En effet, pour le signal montant, même si les ONU n'émettent pas au même moment, l'ASE des deux DSOA se cumule constamment par le coupleur optique d'où une augmentation du bruit à la réception de l'OLT.



Figure 83 : Comparaison des zones de fonctionnement d'un DSOA seul ou 2 DSOA cascadés

Ce phénomène peut être très nuisible dans le cas d'une zone très dense à couvrir, avec un coupleur 1 vers N donc avec N DSOA cascadés en parallèle : le bruit total deviendrait prédominant sur le signal. En modulant l'alimentation du DSOA avec l'enveloppe des paquets de chaque ONU, il serait possible d'éviter ce phénomène. En effet, le bruit d'ASE de chaque amplificateur ne se cumulera plus car les ONU ne peuvent pas émettre au même moment.

Une Extender Box à base d'amplification optique permet donc d'obtenir un budget de déport significatif, mais ce budget ne pourra être dépensé que par de la fibre et non par des coupleurs afin d'éviter ce cumul d'ASE sur les signaux montants.

3.3.2. Extender Box à base de répéteurs OEO

Les répéteurs OEO (conversion Optique-Electrique-Optique), 2R (Remise en forme + Réamplification) et 3R (2R + Resynchronisation) sont disponibles commercialement comme Extender Box auprès de plusieurs fournisseurs tels que Zenko, Huawei ou Telnet. Ils représentent une solution simple et bas coût puisqu'ils consistent en une conversion optoélectrique avec un traitement du signal électrique. Le signal est ainsi complètement régénéré, contrairement à l'amplification optique aucun bruit n'est additionné. De plus, cette solution a une basse consommation électrique et pourrait être adaptée à d'éventuelles futures migrations vers le WDM. Néanmoins, ce répéteur électrique n'est pas encore disponible pour une application à 10Gbit/s.

Des solutions de régénération 2R et 3R tout optique existent mais ne sont pas économiquement envisageables pour des applications du réseau d'accès.

Les répéteurs OEO étudiés sont disponibles en 3 configurations : 2R bidirectionnel, 3R bidirectionnel et 2R montant avec 3R descendant.

Nous avons caractérisé leur capacité d'étendre le réseau d'accès avec un trafic Ethernet bidirectionnel entre l'OLT et plusieurs ONU en suivant le schéma de test classique (Figure 69, page 106). Nous avons obtenu des cartographies de budget optique qui définissent des zones de travail pour chaque EB. Ces résultats nous permettent de comparer les différentes technologies et l'extension de portée possible.

3.3.2.1. Technologie 2R

Les résultats de test de BER sur l'architecture GPON avec une Extender Box OEO 2R fournie par Zenko Technologies sont présentés en Figure 84. Les tests de BER fournissent une zone de fonctionnement de budget optique quasi rectangulaire, ce qui est bien plus pratique que la zone obtenue avec amplification optique. Cette zone est en effet limitée par la performance des émetteurs-récepteurs : la sensibilité et la saturation des récepteurs à l'OLT, aux ONU et à l'entrée et à la sortie de l'EB.



Figure 84 : Résultats de BER bidirectionnel avec un répéteur OEO 2R sur un GPON

On peut ainsi associer à un budget accès entre 19dB et 30dB, un budget déport entre 6dB et 30dB. Un budget total de 24 à 60dB est donc réalisable ce qui permet une bonne flexibilité en termes d'architecture, en considérant une longue portée et un fort taux de couplage avec des règles d'ingénierie simples. Néanmoins, on doit remarquer qu'il n'est pas possible ici de conserver un budget accès de type Classe B+ (13-28dB) qui est l'un des objectifs à respecter en normalisation.

3.3.2.2. Technologie 3R

La Figure 85 montre la cartographie de budget optique obtenue grâce à des tests de BER en insérant une Extender Box OEO de type 3R fournie par Huawei dans l'architecture GPON.

On peut noter que la zone de fonctionnement définie par ce graphique est similaire aux résultats obtenus avec un répéteur OEO 2R mais cependant plus large en budget : de 13 à 31dB pour un budget déport de 5 à 34dB. Du fait que les signaux montant et descendant sont remis en forme, ré-amplifiés et resynchronisés, cette zone est limitée uniquement par la sensibilité et la saturation des récepteurs à l'ONU, l'OLT et au niveau des SFP du répéteur OEO.



Figure 85 : Résultats de BER bidirectionnel avec un répéteur OEO 3R sur un GPON

Ces résultats montrent qu'avec cette solution d'Extender Box, le GPON pourrait potentiellement avoir un budget total de 18 à 65dB. Ainsi, cela permettra une grande flexibilité dans le réseau d'accès, en ayant une extension de budget, au niveau déport, de 5 à 34dB auquel on peut rajouter côté accès, une topologie de Classe B+ (13-28dB), C (15-30dB) et même C+ (17-32dB).

3.3.3. Vers une expérience terrain

Les résultats des tests précédents ont montré que l'on disposait d'Extender Box GPON suffisamment performantes pour imaginer un déploiement de GPON étendus sur nos réseaux. Cependant d'autres paramètres importants entrent en compte avant d'aller vers un essai terrain : la transparence aux services, le management de l'EB, la consommation électrique ou encore sont coût.

3.3.3.1. Définition des règles d'ingénieries

Les règles d'ingénieries sont relatives à la façon dont un opérateur réseau peut dépenser le budget optique d'un PON. Elles ont été décrites au chapitre 1 section 2.4.3 (page 42) dans le cadre du GPON mais il est également indispensable de les définir dans le cadre d'une architecture GPON étendue à l'aide d'une EB.

La solution la plus probable est de considérer un budget optique de classe B+ avant et après l'EB. Dans ce cas, en se reportant à la Figure 48, page 85, on peut alors imaginer l'exploitation d'un tel budget optique en longueur de fibre ou taux de couplage. On préfèrera pourtant conserver un déploiement classique du GPON du coté accès : deux étages de couplage 1:8 (voire un étage supplémentaire 1:2) sur 20km de fibre.

Cependant la portée logique du GPON est aujourd'hui limitée à 60km. En y insérant une EB OEO 3R, cela offre la possibilité d'un budget déport supplémentaire de classe B+, qui peut alors être dépensé en 40km de fibre et un taux de couplage pouvant atteindre facilement 1 vers 32.

Cependant, nous avons démontré que ce sera très pénalisant de cascader des EB à base d'amplification en sortie de plusieurs branches d'un coupleur. L'implémentation de coupleurs sur le tronçon de déport est alors fortement déconseillée dans ce cas. D'ailleurs le budget déport obtenu grâce à l'amplification optique à base de SOA s'élève au maximum à 16dB, ce qui représente alors environ 40km de fibre (plus les pertes associées aux soudures, épissures...).

Enfin, le positionnement de l'EB en ligne enlève alors le caractère passif du PON mais on imposera alors une contrainte sur l'emplacement de l'EB : elle devra être déployée dans un local d'ancien central ou même coulée en sous-sol si l'exploitation de ce central est amenée à disparaître.



3.3.3.2. Test des services "Triple Play" à travers l'Extender Box

Figure 86 : Test des services Net et VoD sur un GPON étendu

Dans le but d'évaluer l'impact éventuel de l'EB sur la qualité des services Triple Play GPON, nous avons mis en place une architecture de test typique schématisée en Figure 86. Cela peut représenter une architecture de GPON étendu qui serait déployé : un budget déport de l'OLT à l'EB, utilisé pour optimiser le nombre de client connectables par port GPON à l'OLT en insérant un coupleur optique au central. Ce budget déport peut également être utilisé pour

remonter les OLT plus en amont dans le réseau en le dépensant selon les règles d'ingénieries définies précédemment. Ensuite, en supplément à ce budget déport, on peut déployer un arbre GPON de Classe B+, avec ici deux fois 5km de fibre et deux coupleurs optiques 1 vers 8.

Avec cette architecture, nous avons démontré que les services Internet, TV numérique (HD), VoD et VoIP, peuvent traverser l'EB sans impact sur la qualité de transmission, quel que soit le type d'EB. Nous avons montré qu'un abonné proche du central a la même qualité de services qu'un client éloigné de 20Km de l'OLT après l'EB.

Comme les tests de BER ou de perte de paquet avaient estimé la qualité des transmissions, on confirme ici que l'Extender Box est complètement transparente aux services Triple Play. Cette expérience a fait l'objet d'une démonstration au Salon de la Recherche 2008 à Orange Labs Paris. Nous avons ici utilisé 2 types d'EB : à base d'amplification optique avec un DSOA fourni par Alphion et à base d'OEO 2R fourni par Zenko Technologies. Cependant, on doit être prudent avec l'amplification optique et le cumul de bruit d'ASE démontré précédemment sur une architecture avec coupleur au central. La performance dépendra du nombre d'EB DSOA déployé. Aussi, nous sommes toujours limités par la performance du GPON en lui même. Par exemple, la couche MAC du GPON Alcatel limite l'architecture physique à 20km et 64 clients maximum. Ainsi, augmenter le budget optique n'est pas suffisant aujourd'hui pour augmenter la portée et le taux de partage du GPON de manière significative. Des modifications de la MAC GPON sont prévues par les industriels afin d'obtenir une limite physique de 128 clients sur 60km, voire 100km par OLT déployé.

3.3.3.3. Mise en place sur plate forme opérationnelle

Les travaux de recherche à Orange Labs sont dirigés en vue d'utilisation par la partie opérationnelle du Groupe Orange. Suite à une communication performante sur les résultats d'extension de portée au sein de notre filiale, nous avons été sollicités pour une première installation d'Extender Box sur une plateforme "terrain" à Montpellier. Nous y avons installé et tester deux Extender Box OEO 3R (Zenko et Huawei) sur un GPON Huawei. Après avoir validé leurs performances en configuration de déploiement FTTx (Classe B+, voire C+), des tests de réflectance et de signaux perturbateurs émis à l'ONU ont complété nos expériences. Malgré le fait que les Extender Box aient des connecteurs à clivage droit (SC-PC), la réflectance est inférieure à 30dB ce qui ne perturbe en rien la transmission. L'étude de l'impact de signaux émis aux mêmes longueurs d'onde que l'ONU est toujours en cours.

Par ailleurs, les équipes opérationnelles ont également manifesté un intérêt certain pour une solution d'Extender Box 1 vers 4 qui permettrait de connecter un maximum de clients à un seul port PON, sachant que le taux de pénétration par OLT déployé sur le terrain actuellement est très faible (moins de 10 clients connectés par port pour un potentiel de 64 normalement). Cette sollicitation nous conforte dans notre étude réalisée sur le "coupleur virtuel" qui sera détaillée dans le paragraphe 3.3.5.

3.3.3.4. Management des EB

Les opérateurs réseau qui contrôlent le bon fonctionnement du réseau d'accès ont besoin d'une visibilité de bout en bout des liaisons de chaque abonné GPON. Le fait d'insérer l'élément actif qu'est l'EB viendrait notamment empêcher le fonctionnement de certains de leurs outils de maintenance comme le principe du tir OTDR (décrit au chapitre 1, section 2.6.1.3.3, page 47) ou bien même la remontée des alarmes OMCI du GPON. Afin de palier à cela, les opérateurs réclament un système de management de l'EB qui remonterait les principales alarmes (physiques et logiques) à l'OLT. Ainsi la norme G984.6 prévoit que l'EB soit vue comme un ONU par l'OLT, soit d'intégrer un management de type OMCI sur l'EB (remontée des alarmes UNI, PLOAM, Dying gasp, etc).

Les fournisseurs d'EB commencent à équiper leurs boitiers de cette fonction, souvent sous forme de châssis où plusieurs EB sont gérées et alimentées simultanément. Alphion proposait ainsi en 2008, un châssis pouvant insérer N EB, avec leur propre système de management (non OMCI). Huawei prévoit également d'intégrer cette fonction mais pas avant une annonce de déploiement d'EB. Telnet bénéficiant de ses compétences en interopérabilité GPON, nous a fourni en 2010 des cartes EB OEO 3R SFP pouvant être intégrées dans un châssis managé OMCI.

3.3.3.5. Option d'amplification de la CATV par un EDFA

Certains opérateurs ont fait le choix d'allouer une longueur d'onde spécifique pour le transport des services vidéo qui sont très couramment acheminés par câble sous le nom de CATV dans certains pays. Cette longueur d'onde est normalisée par le standard GPON dans une bande de 10nm centrée autour de 1550nm.

De ce fait, si la technologie d'EB se développe mondialement sur les réseaux d'accès GPON, elle devra permettre également d'étendre cette longueur d'onde, ce qui n'est pas le cas des EB proposées jusque là.

Telnet propose pourtant une option sur leur EB OEO [55] : celle de court-circuiter le circuit OEO avec un circuit d'amplification optique à base d'EDFA pour sa bande d'amplification adaptée aux signaux CATV.



Figure 87 : EB avec option d'amplification CATV [55]

Nous n'avons pas évalué cette option mais se référant aux résultats obtenus par amplification à l'aide d'un PDFA, cette solution semble adaptée aux mêmes gammes de budgets optiques (déport et accès) que celles de l'OEO. Il n'y aurait donc aucune contre-indication à cette coopération, si ce n'est l'insertion de coupleurs ou multiplexeurs et filtres supplémentaires qui vont consommer d'avantage le budget optique disponible. Un bémol est également à relevé concernant le coût supplémentaire engrangé par cette technologie. Cette option de longueur d'onde CATV sur GPON reste tout de même minoritaire au profit de la vidéo sur IP offerte par les bouquets Triple Plays existants. Nous n'avons donc pas développé plus en détail une solution d'EB mixte GPON et CATV.

3.3.3.6. Consommation électrique

Dans le cadre des enjeux environnementaux européens, les opérateurs s'organisent afin de réduire la consommation électrique de leurs réseaux [56,57]. L'objectif de réduction du nombre de centraux devient alors un objectif majeur, ce qui augmente l'intérêt d'un GPON étendu.

Cependant, l'EB étant un élément actif, elle ne doit pas ajouter une consommation électrique trop conséquente.

Nous avons donc pris soin de reporter dans le Tableau 20 les mesures de consommation électrique de chaque EB étudiée.

EB	Consommation du boitier (W) sans OMCI	Consommation du boitier (W) avec OMCI	Consommation / client (64) (W)
DSOA	3	9	0,14
OEO 3R SFF 1:1	5	11	0,17
OEO 3R SFP 1:1	5	11	0,17
OEO 3R SFP 1:4	17	23	0,36

Tableau 20 : Consommation électrique des EB

Chaque SOA du DSOA consomme un courant de 300mA pour une tension de polarisation de 5 V (régulation de température incluse) donc un DSOA consomme une puissance de 3W. Une EB OEO 3R Zenko (5V; 1.1A) ou Telnet consomme 5W quand le trafic bidirectionnel est établi. On note une consommation plus importante avec une EB OEO SFP 1:4 car d'une part elles intègrent plus de modules SFP (3 x 1.4W) et un système de ventilation supplémentaire pour 3 modules (8W).

On a également différencié la consommation d'une EB avec ou sans l'intégration d'un système de gestion de type OMCI qui représente ici environ 6W pour les boitiers Telnet, car ils n'ont pas encore été validés. Par ailleurs, Telnet a choisi un système de gestion intégré sur ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) alors qu'un FPGA (Field-Programmable Gate Array) est aussi une option pour permettre à ce système de gestion d'évoluer facilement.

De plus, ces mesures nous ont permis d'évaluer les dépenses énergétiques des centraux de réseaux PON étendus. Cette étude sera présentée au paragraphe 3.3.6, page 132.

3.3.3.7. Estimation du coût des EB

Pour un enjeu économique cette fois, les opérateurs cherchent à minimiser les coûts de déploiement de leur réseau FTTH. L'EB peut permettre de réduire ces coûts et des études technico-économiques sont en cours pour révéler le poids de l'EB dans le réseau selon la démographie de la zone à couvrir.

Le tableau suivant présente les estimations de coûts des EB en fonction de la technologie utilisée dans l'éventualité d'une production massive.

EB	Coût (€)	Coût / Client (64) (€)
DSOA	700	10,9
PDFA + SOA	1500	23,4
OEO 2R	350	4,7
OEO 3R	500	7,8

Tableau 21 : Coût des EB

Sachant que le coût d'un port OLT est en moyenne de 115€/client connecté, il est important que l'EB y ajoute un coût supplémentaire moindre ce qui élimine la solution à base de PDFA. De plus, si on compare les meilleures technologies qui permettent une migration de la Classe B+, à savoir le DSOA et l'OEO 3R, on remarquera que le coût de l'EB est supérieur dans le cas de l'amplification optique.

3.3.3.8. La meilleure solution ?

Au regard de tous ces résultats, on peut les synthétiser par le graphe présenté en Figure 88. Il illustre les solutions d'EB compatibles avec la définition de la norme G984.6. La solution PDFA combinée à un SOA a été écartée principalement pour son coût excessif, et la solution OEO 2R qui n'est pas compatible avec un accès de Classe B+.

Les solutions à base de DSOA ou OEO 3R présentent des fonctionnements performants. Pourtant on y préfèrera la solution OEO qui permet de régénérer complètement les signaux transmis sans avoir à se soucier de bruit optique d'ASE à l'instar du DSOA. De plus, la zone de fonctionnement de l'OEO s'avère bien plus pratique en termes de règles d'ingénierie imposées par l'implantation du GPON sur le terrain.

En choisissant une solution d'EB de type OEO, nous avons ensuite pu évaluer l'intérêt énergétique et économique de l'EB d'après les données précédentes de coût et consommation électrique des EB.



Figure 88 : Synthèse des performances optiques de chaque type d'EB

3.3.4. Estimations technico économiques

Avant et afin de valider un choix quant-à l'OEO ou l'amplification optique comme solution technologique d'EB, une étude technico-économique a été menée afin d'estimer l'impact de l'implantation d'EB sur le réseau. Nous avons fourni les données physiques (architecture typique d'un PON étendu, budget optiques possibles et coûts des équipements impliqués). Les équipes d'Orange s'occupant des études technico-économique ont ensuite réalisé ces simulations.

En prenant la région Bretagne comme exemple, il s'agit ici d'estimer le nombre de centraux à équiper en Extender Box pour atteindre un taux de couverture cible. Ce nombre de centraux dépendra de sa location dans un NRA de DSLAM (820 sites), dans un NRA de DSLAM avec un lien fibre (649 sites), dans un NRA de DSLAM maîtres (277sites), dans un NRA de collecte (métro) 1&2 (45 sites), dans un NRA primaire de collecte (11 sites) ou enfin sur l'un des deux

sites de PoP (Point of Presence) de la région. Cette zone à couvrir représente ainsi environ 1,4 millions de foyers à connecter au FTTH avec une majorité (66%) en zone rurale. Cf. Figure 89.



Figure 89 : Localisation des centraux et densité de DSLAM en région Bretagne

Dans chaque scenario de location de l'OLT, l'éligibilité des clients va dépendre du budget optique possible. La

Figure 90 montre l'évolution de l'éligibilité d'un GPON basé sur un taux de couplage de 1:64 et pour différentes classes de budget optique : B+ (13-28dB), C+ (18-32dB) et avec une Extender Box qui permettra de répéter un budget de Classe B+ de part et d'autre de ce boitier.



Figure 90 : Eligibilité en fonction de la localisation de l'OLT et du budget optique

Ces résultats montrent que l'on peut atteindre une éligibilité à 100% en déploiement des OLT dans les 45 sites de réseau métropolitain primaire et secondaire avec une Extender Box Classe B+ déployée en amont. Cela permettra de réduire de 820 à 45 sites, le nombre de centraux optiques équipés en OLT GPON.



Figure 91 : Taux de couplage possible à partir d'un OLT en collecte 1&2 par classe de budget

De plus, la Figure 91 permet d'envisager un gain supplémentaire de budget optique en adaptant le taux de couplage sur des OLT déployés sur les NRA de réseau métropolitain primaire et secondaire. Ce gain reste faible avec une Extender box mais il devient intéressant avec un OLT de classe C+ ou on atteint une éligibilité de 90% avec un taux de couplage de 1:32. Ces paramètres, ainsi connus, nous forcent à nous questionner sur la bonne topologie à adopter dans cette situation : quel taux de couplage ? Déploiement d'Extender box ? Quelle classe d'OLT ? Quel objectif a-t-on en termes d'éligibilité ? Ces questions trouveront difficilement une réponse sans une étude économique de ces scénarios.

De ce fait, une étude a été menée en prenant en compte ces types de scénarios. Un résultat intéressant concernant le déploiement d'Extender Box en est ressorti. Avec un OLT déployé sur 45 sites NRA, avec une Extender box pour atteindre une éligibilité à 100%, les coûts de déploiement apparaissent similaires au fait de déployer un OLT seul mais de Classe C+. Cela s'explique par un investissement conséquent au niveau du génie civil pour installer des fibres inter-centraux. En effet, une Extender Box déployée dans un site d'ancien central optique ou DSL, implique une fibre à installer pour rejoindre l'OLT. Or, le réseau actuel ne permet pas d'avoir suffisamment de fibres pour assurer un tel dimensionnement. Un déploiement d'Extender Box est donc envisageable à condition d'y associer une solution qui permettra de mutualiser la fibre en amont de l'Extender Box (entre les centraux), par exemple avec un multiplexage WDM ou TDM sur ce lien, comme le décrit la solution présentée dans le paragraphe 1.5.

Cette étude technico-économique est réalisée sur la région Bretagne donc une zone non dense. Ces résultats ne seraient en aucun cas applicables à une région urbaine où des études similaires sont en cours.

3.3.5. Coupleur virtuel ou Extender Box 1 vers N

Nous proposons ici de considérer un "coupleur virtuel" ou Extender Box 1 vers N, comme une solution pour utiliser un seul port OLT qui viendrait fournir un accès à non plus un seul mais à plusieurs arbres GPON. Nous présentons donc une solution pour connecter N sorties optiques d'OLT à un seul circuit d'OLT. En effet, en début de déploiement FITx, la demande des clients de raccordement à la fibre est imprévisible, le taux de pénétration ou de remplissage des ports par OLT est très faible (en général, inférieur à 20%), tout ceci rend très coûteux le déploiement et rallonge l'amortissement économique des équipements déployés. Cette solution de coupleur

virtuel peut illuminer N arbres GPON à partir d'un seul port OLT, ce qui permet de multiplier par N le taux de remplissage par port donc le nombre de clients raccordés. Pour ce faire, les signaux électriques montant et descendant entre la couche MAC (Medium Access Control) des cartes OLT et les N transceivers optiques (par exemple des SFP) doivent être combinés. Il s'agira ainsi d'une simple fonction logique de couplage électrique sans aucune perte de budget optique d'où l'aspect virtuel de ce coupleur.

3.3.5.1. Réalisation et tests d'une EB 1:2

Le coupleur virtuel et son implémentation dans l'architecture GPON sont présentés dans la figure suivante (Figure 92(a)).

Le coupleur virtuel est basé sur une conversion OEO grâce à des transceivers SFP réalisant une fonction 2R. Le couplage est fait sur le signal électrique : le signal descendant est simplement transmis à travers "Data" pour un arbre GPON et à travers " \overline{Data} " pour le second arbre GPON. Le signal montant en mode burst quant à lui nécessite le différentiel de Data et \overline{Data} pour être transmis, nous avons donc utilisé un combineur 1 vers 2 pour mixer le signal montant provenant de deux ONU, l'un sur l'arbre 1, l'autre sur l'arbre 2. Ce coupleur électrique est un combineur digital multi-canal ECL mode burst fourni par Zenko Technologies Inc [58].



Figure 92 : Coupleur virtuel (a) et son implémentation (b) sur un GPON

Dans le but d'évaluer l'impact de l'insertion d'un coupleur virtuel, l'architecture testée est basée sur l'insertion d'un répéteur GPON en ligne mais les résultats peuvent être extrapolés pour une intégration au central directement sur la carte OLT. De la même façon que pour les précédentes EB, nous avons évalué la qualité de la transmission avec des mesures de BER sur une architecture présentée en Figure 92.

Tout d'abord, pour avoir une référence, nous avons évalué le budget optique possible sur un arbre avec une conversion OEO mais sans coupleur électrique. Ensuite la même mesure de BER et de budget optique a été réalisée en présence de ce combineur. Cf Figure 93.

Chapitre 2 : Extension de portée des systèmes GPON



Figure 93 : Courbes de BER des signaux montants et descendants pour les arbres GPON 1 et 2

Un premier constat positif : le coupleur virtuel n'a aucun effet sur le ranging du GPON : les ONU de chaque arbre sont reconnus par l'OLT. De plus les courbes de BER pour les signaux descendants indiquent qu'une transmission sans erreur (BER<10⁻⁹) est réalisée pour un budget accès de 10dB à 35dB limité par la saturation et la sensibilité des récepteurs à l'ONU GPON et à l'ONU SFP. Néanmoins, à cause d'une transmission montante en mode burst (sensibilité des récepteurs plus faible), ce budget accès est ensuite limité entre 21 et 31dB.

De plus, en comparant les courbes de BER avec ou sans le combineur électrique, nous n'observons aucune pénalité due à l'insertion du coupleur virtuel. Ainsi nous réalisons totalement une fonction de couplage optique sans pertes.

Grâce à ces résultats, nous pouvons imaginer plusieurs applications pour cette solution. Une première, considérant une zone dense à couvrir, proche d'un central, la duplication d'arbres GPON à partir d'un seul port OLT est une solution évidente car elle permet de réduire les coûts en début de déploiement. La Figure 94 présente cette application où on viendrait directement intégrer le coupleur virtuel sur la carte OLT, en partageant sa couche MAC pour 'N' ports illuminés.



Figure 94 : Application pour le coupleur virtuel : combineur intégré sur la couche MAC de la carte OLT Une deuxième application présentée en Figure 95 viendrait profiter du budget déport obtenu grâce à la conversion OEO, en plus de la duplication des arbres GPON. En effet, cette solution permet d'avoir un déport de 6 à 30dB de l'OLT qui pourra être utilisé pour remonter les centraux de 80km ou fournir une grande flexibilité au réseau. Néanmoins, la qualité de PON est ainsi perdue car on devra alimenter le coupleur virtuel par exemple dans un local d'ancien central DSL.



Figure 95 : Application du coupleur virtuel : augmenter le nombre d'arbre GPON et le budget optique

3.3.5.2. Mise en œuvre d'un prototype 1:4 avec Telnet

Suite aux résultats prometteurs obtenus sur le coupleur virtuel et les sollicitations du côté opérationnel FFTH pour réduire les coûts de déploiement, nous avons proposé à nos fournisseurs d'Extender Box de nous fournir des prototypes d'Extender Box 1 vers 4. Huawei et Telnet y ont répondu positivement. Telnet nous a fourni un prototype d'Extender Box 1:4 avec une fonction de management OMCI supplémentaire qui permet au boitier d'être vu par l'OLT comme un ONU et ainsi de remonter des alarmes indispensables à la gestion du réseau.



Figure 96 : Prototype Telnet d'Extender Box GPON 1 vers 4 avec management OMCI [59]

De la même façon que la technique précédente, cette solution est basée sur une réplique du signal PON descendant de l'OLT grâce à un coupleur électrique qui reproduit le signal en quatre branches avant conversion optique grâce à quatre émetteurs-récepteurs SFP. Pour le sens montant, les signaux provenant de quatre arbres PON sont multiplexées dans un port unique au moyen d'un agrégateur et combineur comme indiqué sur la Figure 96.

Cette solution se présente sous la forme d'une carte enfichable dans un mono-châssis. Pour faciliter la gestion, minimiser les dépenses d'énergie et de maintenance, des châssis permettant d'intégrer 3 ou 12 cartes sont également disponible.



Figure 97 : Cartographie de budget d'une EB 1:4, prototype Telnet

Les meilleurs résultats de tests de ce prototype sont présentés en Figure 97. Ils ont étés réalisés suivant plusieurs types de modules SFP (Reset /Resetless, modules Optoway, Zenko et Telnet) avec 1 ONU connecté par port de sortie de boitier 1:4. Ces résultats montrent qu'ils sont similaires à ceux d'une EB OEO SFP 1:1 : aucune pénalité liée à la fonction de couplage électrique 1 vers 4 n'est observée et nous obtenons les mêmes performances quel que soit le port de sortie de l'EB1:4. Pourtant, en comparaison aux résultats obtenus avec une EB OEO SFF, un accès de classe B+ n'est pas possible du à un défaut d'adaptation d'impédance des SFP utilisés. Les SFP utilisés sont pourtant compatibles avec un budget d'accès de Classe C+ (17-32dB) pour un déport compris entre 3 et 23dB. Soit un budget total de 55dB pour un potentiel de 256 clients connectables. Cette performance permettra donc d'améliorer considérablement le taux de remplissage des cartes OLT déployées, en minimisant le nombre de port OLT au profit de coupleur virtuels de ce type. L'EB 1:4 apporte également un budget déport intéressant qui permettra de remonter les centraux actifs plus en amont dans le réseau.

De nouveaux SFP devront être testés et nous pensons pouvoir obtenir un fonctionnement compatible avec une migration de la Classe B+ quel que soit le GPON utilisé.

3.3.5.3. Intérêt économique

On a démontré l'intérêt d'une solution d'EB 1:4 en termes d'amélioration du taux de remplissage du PON et d'extension de portée de ce dernier. Le déploiement ou non d'une telle solution n'est plus que relatif à l'économie qu'il peut permettre : économie de CAPEX et d'énergie.

Économie de CAPEX ?

En tenant compte des prix actuels de nos équipements GPON et EB 1:4, nous avons cherché à démontrer le gain en Capex du déploiement de tels systèmes. Cette étude n'est donc pas pérenne

vu l'évolution du prix de ces équipements, surtout depuis l'apparition de carte GPON de nouvelle génération (cartes 8ports) qui réduiront certainement le coût du port PON.

Voici une comparaison simpliste des coûts des équipements déployés pour desservir équitablement 4 arbres GPON suivant deux scénarii :

Le coût de ces équipements ne peut être communiqué publiquement, nous noterons donc le coût d'un port OLT "P", et concernant l'EB 1:4, le coût d'un châssis "Ch", celui d'une carte "C", d'un SFP OLT " OLT SFP " et celui d'un SFP ONT " ONT SFP ".

Scénario 2 :

Scénario 1 : 64 clients desservis sur 4 arbres PON avec 4 ports OLT

Module	Co û t
4 OLT port	4 x P
Total	4 x P

avec 1 port OLT et 1 EB 1:4 TelnetModuleCoûtTelnet ChassisChTelnet carteC4 OLT SFP4 x OLT SFP

Р

ONT SFP

 $< 2 \times P$

64 clients desservis sur 4 arbres PON

(-)	(1_)
(a)	(D)
Tableau 22 : Coût détaillé de	chaque scénario : Scénario 1 (a), Scénario 2 (b)

Total

ONT SFP

OLT port

Le premier scénario envisage un déploiement classique de 6ç4 clients sur quatre ports GPON soit un taux de remplissage réaliste de 25%. Si nous supposons alors que le coût par port OLT est de P euros, alors le coût d'une carte avec 4 ports OLT est de 4 x P euros d'où un coût par utilisateur de 4xP/64 euros.

Le second scénario a été schématisé en Figure 96 qui présente l'implémentation de la solution Telnet. Une seule carte OLT est alors nécessaire au central où l'on co-localise une EB 1 vers 4. (Le coût des éventuels atténuateurs fixes nécessaire pour éviter la saturation des récepteurs est négligeable par rapport aux autres équipements). Avec des coûts indiqués dans le Tableau 22, le coût par utilisateur est estimé inférieur à 2xP/64 euros.

Ainsi, cette solution d'EB 1:4 permettrait de réduire d'un facteur 2 les coûts relatifs aux équipements GPON déployés actuellement pour le FTTx.

Cette première estimation est de plus réalisée avec des offres de prix correspondants aux premiers prototypes de cette EB 1:4. Si on envisage une production massive de ce produit, cette solution s'avérerait encore plus intéressante.

Cependant, dès lors que plus de 64 utilisateurs demandent à être connectés sur la zone des quatre arbres PON, un port OLT supplémentaire sera nécessaire. Ce n'est donc qu'une solution temporaire qui permettra d'amortir plus rapidement ces dépenses de CAPEX.

3.3.6. Estimation des dépenses énergétiques des centraux

Comme le décrit le paragraphe 2.1.1.1 du chapitre 1 (page 33), les OLT GPON Huawei et ALU présentent des différences de châssis, cartes et ports OLT et donc de nombre de clients connectables. Pour comparer leurs performances il est donc nécessaire de déterminer la

consommation électrique par client. Une étude récente révèle ce type de résultats selon le taux de remplissage des cartes et des châssis déployés. Le Tableau 23 présente la consommation électrique par client selon le taux de remplissage et le nombre de port PON installés pour un châssis GPON Huawei (16 cartes / châssis ; 4 ports / cartes ; 64 clients/cartes).

Puissance par client en W	Nb de Ports OLT	1	2	4	8	16	24	32	36	40	48	56	64
Taux remplissage (client)													
1,5% (1 ONT)		135	67	34	26	22	20	20	20	19	19	19	19
3% (2 ONT)		67	34	17	13	11	10,2	9,9	9,8	9,7	9,5	9,4	9,4
5% (3 ONT)		45	22	11,2	8,6	7,2	6,8	6,6	6,5	6,5	6,4	6,3	6,3
6% (4 ONT)		34	17	8,4	6,4	5,4	5,1	4,9	4,9	4,8	4,8	4,7	4,7
11% (7 ONT)		19	9,6	4,8	3,7	3,1	2,9	2,8	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7
25% (16 ONT)		8,4	4,2	2,1	1,6	1,4	1,28	1,23	1,22	1,21	1,19	1,18	1,17
33% (21 ONT)		6,4	3,2	1,6	1,22	1,04	0,97	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89
50% (32 ONT)		4,2	2,1	1,1	0,80	0,68	0,64	0,62	0,61	0,60	0,60	0,59	0,59
66% (42 ONT)		3,2	1,6	0,80	0,61	0,52	0,49	0,47	0,47	0,46	0,45	0,45	0,45
75% (48 ONT)		2,8	1,4	0,70	0,5	0,45	0,43	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39
89% (57 ONT)		2,4	1,2	0,59	0,45	0,38	0,36	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33
100% (64 ONT)		2,1	1,05	0,53	0,40	0,34	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,29

Tableau 23 : Consommation électrique par client d'un OLT selon le nombre de port P et le Taux de Remplissage TR

En cas de déploiement d'EB sur le réseau GPON, celle-ci viendrait non pas remplacer mais déporter un port OLT dans un central plus en amont dans le réseau. Dans ce cas, le bénéfice en dépense énergétique va dépendre du gain en nombre de port OLT, qui sera possible uniquement s'il n'est pas nécessaire d'ajouter un châssis OLT dans le central maître. Pour en avoir une image plus précise, prenons des scénarii de déploiement où l'on va comparer la consommation électrique moyenne par client.

Scénario A : Déploiement de deux centraux GPON : CO1 et CO2



Figure 98 : Schématisation du scénario A

Il s'agit ici du cas le plus simple de déploiement : les OLT de classe B+ sont déployés dans chaque central, quel que soit le nombre de clients raccordés.

Exemple de calcul de la consommation électrique par client :

Soit n-1 le nombre de centraux sur la zone A et N_n le nombre de clients connectés au central n avec un taux remplissage TR_n , alors :

N : Nombre total de clients connectés : $\sum N_n$

 P_n : Nombre de ports actifs au central n : P_n = EntierSupérieur [$N_n/(64 \text{ x TR}_n)$]

 Ch_n : Nombre de châssis actifs au central n : Ch_n = EntierSupérieur [$P_n / 64$]

Parmi ces châssis, il y aura un châssis plus ou moins rempli avec R ports :

 $R = P_n - (Ch_n - 1) \ge 64$

On peut maintenant calculer la consommation électrique à partir du Tableau 23 qui nous donnait Conso (TR , P). La consommation d'un central n est donc la somme de la consommation des châssis pleins et du reste des ports R.

 $Conso_n = (Ch_n-1) \ge 4096 \ge TR_n \ge conso (TR_n, 64) + R \ge 64 \ge TR_n \ge conso (TR_n, R)$

La consommation totale par client du scénario A est donc : ConsoA = \sum Conso_n/ Nn

Scénario B : Déport (+ 3dB) du central CO2 dans le central Maître CO1 grâce à l'utilisation de transceivers C+



Figure 99 : Schématisation du scénario B

Ce scénario intègre le déploiement de technologies C+ au lieu de B+ ce qui permet d'utiliser 3dB de budget optique supplémentaire pour déporter un central relativement proche (8 km) et regrouper ainsi les équipements actifs. Ce scénario n'est alors applicable qu'en zone très dense. N.B. : On considère qu'un module C+ a une consommation identique à celle d'un transceiver B+.

Dans ces conditions, la consommation électrique est similaire car le nombre de port PON déployés reste identique, à la différence du nombre de châssis qui peut diminuer si l'on vient par exemple compléter un châssis du CO1 par des ports du CO2.

Scénario C : Taux de remplissage doublé grâce au couplage 1:128 de la classe C+ (+3dB)



Figure 100 : Schématisation du scénario C

Des OLT de classe C+ sont ici déployés dans le but d'augmenter le taux de remplissage du PON : en insérant un coupleur 1 vers 2 au central, la capacité de ce dernier est ainsi doublée. Ce scénario est typiquement celui du déploiement actuel réalisé en Slovaquie. Il n'est possible que si au départ le taux de remplissage des cartes est inférieur à 50% afin de ne pas dépasser la limite MAC de 64 clients par PON. Le taux de remplissage étant doublé, le nombre de ports déployés est divisé par 2 ainsi que la consommation électrique de chaque central.

Scénario D : Déport du central CO2 dans le central Maître CO1 grâce aux EB placées au CO2



Figure 101 : Schématisation du scénario D

Il s'agit ici d'utiliser les capacités de l'EB à étendre la portée du réseau jusqu'à sa limite logique de 60km, sans contraindre le taux de partage de 64 client / PON. Des OLT de classe B+ sont alors déportés dans un central maître (CO1) et les centraux esclaves n'ont d'actif que les EB qui ont remplacé chaque port OLT déporté. Tous les ports OLT se trouvent alors au central maître et ont un taux de remplissage inchangé. Ce scénario est défavorable pour les dépenses énergétiques puisque l'on ajoute des équipements actifs EB, pour un nombre de ports OLT identique.

Scénario E : Une EB 1:1 permet la classe C+ en accès d'où un taux de remplissage doublé sur les centraux esclaves



Figure 102 : Schématisation du scénario E

On a démontré précédemment que l'on pouvait réaliser une architecture de classe C+ en accès d'où l'insertion d'un coupleur 1 vers 2 supplémentaire qui permet d'améliorer le taux de remplissage des ports du central esclave. Le nombre de ports déportés est alors divisé par deux. Au central maître, on aura alors les ports initiaux du central 1 (CO1) avec un taux de remplissage TR₁, plus des ports déportés des centraux N₁, N₂, etc avec un taux de remplissage doublé (TR_{esclave} = 2 x TR_n).

Scénario F : Une EB 1:4 déporte et améliore le taux de remplissage des centraux esclaves.



Figure 103 : Schématisation du scénario F

Ce scenario implémente une EB 1 vers 4 dans le but de déporter des centraux esclaves tout en améliorant leur taux de remplissage (x4). Le nombre de port à déporter est alors diviser par 4. Au central maître, on aura alors les ports initiaux du central 1 (CO1) avec un taux de remplissage TR₁, plus des ports déportés des centraux N₁, N₂, etc avec un taux de remplissage quadruplé (TR_{esclave} = 4 x TR_n).

Scénario G : Une EB 1:4 déporte les centraux esclaves et améliore le taux de remplissage de tous les ports déployés.



Figure 104 : Schématisation du scénario G

On vient cette fois implémenter une EB 1:4 sur chaque port OLT déployé afin de multiplier par 4 le taux de remplissage de l'ensemble de la zone. Le nombre de ports déportés est alors divisé par 4.

Scénario H : Une EB 1:4 déporte les centraux esclaves et améliore le taux de remplissage des centraux esclaves et le central maître est C+ avec un couplage 1:2 supplémentaire

Il s'agit ici de déployer le central maître en C+ avec un coupleur 1:2 en sortie de l'OLT pour les clients proches et les centraux déportés qui contiennent des EB 1 vers 4 en lien direct avec l'OLT. On améliore ainsi le taux de remplissage de tous les ports sans pour autant déployer des EB sur chacun.



Etude de la consommation d'énergie par zone

Figure 105 : Illustration d'un central maître amené à couvrir les zones d'éligibilité de 3 autres centraux esclaves.

En ayant défini chacun de ces scénarios et connaissant la consommation électrique d'un OLT (Tableau 23) et celle des EB 1:1 (11W avec OMCI) et 1:4 (23W avec OMCI), on peut désormais calculer pour chaque cas la consommation de l'ensemble d'une zone.

Si on prend l'exemple d'une zone comme l'agglomération Rennaise, un effectif de 14 centraux y est recensé pour 107000 clients connectables (intra-muros) avec pour objectif de réduire ce nombre de centraux à 3. Soit à partir d'un seul central, on en desservira en réalité trois ou quatre comme l'illustre la Figure 105 pour le cas d'un seul central maître qui viendra couvrir les zones d'éligibilité de 3 autres centraux esclaves. Le central maître est alors choisi par rapport à son nombre de client connectables : $N_1 > N_2$, N_3 et N_4 .

On a donc mené une étude pour un effectif de quatre centraux dont le nombre de client est aléatoire et dont le taux de remplissage de l'infrastructure est de 25%.

Dans ces conditions, les résultats de la consommation électrique par client sont affichés par scénario en Figure 106 et on peut y faire correspondre l'évolution du taux de remplissage en Figure 107.



Chapitre 2 : Extension de portée des systèmes GPON

Figure 106 : Consommation électrique par client selon le scénario de déport et le nombre de clients connectés par central



Figure 107: Taux de remplissage moyen de la zone selon le scénario de déport et le nombre de clients connectés par central

Ces résultats montrent logiquement que le gain en consommation électrique est lié à une amélioration du taux de couplage.

Les scénarios A et B présentent logiquement la même consommation électrique par client car ce sont les mêmes types d'équipement déployés à l'OLT : l'un B+ et l'autre C+. La différence se fait alors sur le nombre de centraux actifs : quatre centraux pour le scénario A et un seul pour le scénario B si les 3 centraux esclaves sont situés dans un rayon d'une dizaine de kilomètre autour du central maître. Le scénario C, qui représente également une solution passive par l'intégration d'émetteurs-récepteurs C+ aux OLT, permet ainsi de doubler le taux de remplissage en insérant non plus de la fibre mais un coupleur 1 vers 2 au central, donc sans dépenses énergétiques additionnelles. Il représente alors le scénario le plus favorable, si tous ces centraux sont localisés quasiment au même endroit.

Pourtant, le scénario G où une EB 1:4 est déployée sur chaque port OLT permet également de réduire cette consommation électrique jusqu'à un facteur de 1.7. En effet, le taux de remplissage étant quadruplé, on va alors déployer quatre fois moins de ports OLT mais on doit alors comptabiliser des EB 1:4 supplémentaires par ports déployés sur chaque central.

Sur ces courbes, on constate également que l'évolution de la consommation est similaire pour chaque scénario si le ratio du nombre de clients déportés (Central 2, 3 et 4) sur le nombre de client du central maître (central 1) est faible. Par contre, si ce ratio est élevé, ce qui est le cas du troisième et quatrième exemple où il y a plus de clients aux centraux esclaves qu'au central maître, on remarque que les scénarios F et G sont équivalents en consommation électrique. En effet, il est alors moins intéressant de déployer des EB:1:4 sur les ports du central maître car cela représente une EB 1:4 par port OLT du central maître alors que le nombre de clients connectés y est minoritaire.

Vu l'efficacité des scénarios C et G, on a alors optimisé cette implémentation par le scénario H, où les centraux esclaves sont déportés par des EB 1:4 et les ports initiaux du central maître sont des ports OLT C+. On a alors un compromis idéal entre taux de remplissage élevé pour une consommation électrique minimale. Dans ce cas, en prenant le troisième exemple de ce tableau (125 000 clients connectés), par un calcul rapide, on aura sur un an, entre le scénario A et H, une différence de consommation électrique d'environ 600 000 kWh. Suivant les conditions tarifaires habituelles, soit un coût de 0.1125 € /kWh, cela représente une économie s'élevant à 67,5 k€/an. En plus de l'économie d'énergie, cette réduction de coût devrait permettre d'amortir plus facilement l'installation des équipements EB sur le réseau.

Le scénario D n'est jamais gagnant en termes de consommation électrique car on n'a pas considéré ici qu'une EB 1:1 pouvait améliorer le taux de partage de l'architecture alors que les EB permettent généralement une classe C+ en accès d'où l'implémentation du scénario E où un coupleur 1:2 est inséré en sortie de l'EB 1:1. Le taux de remplissage des centraux esclaves est alors doublé ce qui permet d'y déployer deux fois moins de ports OLT d'où un gain sur la consommation électrique.

Les scénarios E, F, G et H ainsi définis ne sont pourtant pas encore complètement optimisés. On a en effet montré précédemment que l'EB permet d'obtenir un budget déport conséquent (jusqu'à 30 dB) qui est ici dépensé uniquement en fibre optique, soit jusqu'à 95km de fibre, ce qui est dans la majorité des cas largement excessif aux besoins recensés. On pourrait alors utiliser ce budget de déport également par des coupleurs 1 vers N permettant ainsi d'améliorer grandement la couverture la zone. Il est pour l'instant difficile de définir ce taux de couplage car le GPON est aujourd'hui limité à 64 clients (taux de remplissage 100%). Le taux de remplissage pris en compte ici étant de 25% on ne pourra alors pas dépasser un taux de partage 1:4, sauf si on intègre le paramètre de 128 clients des nouvelles cartes GPON, qui permettra alors un taux de couplage 1:8, réparti de part et d'autre de l'EB. Par contre, si le taux de remplissage est en réalité plus faible que 25%, on pourra alors encore modifier ce taux de couplage.

Tous ces scénarios ne sont pour l'instant que des suppositions qui permettent d'imaginer la construction du futur réseau FTTx. Ils vont tout d'abord prendre part dans des études technicoéconomiques plus poussées qui à terme devraient mener à des décisions concernant l'évolution des architectures déployés, avec ou sans Extender Box.

3.3.7. Technique de multiplexage (EB WDM) et d'agrégation OTN

Si les opérateurs de télécommunications doivent déployer une infrastructure d'accès fibre FTTx sur tout le territoire en réduisant les coûts de déploiement, ils devront minimiser l'investissement dans les fibres déployées entre les centraux optiques équipés. Typiquement, les opérateurs pourraient être intéressés pour réutiliser les fibres existantes inter-centraux pour connecter les OLT aux répéteurs GPON. Or, présentée précédemment, une première étude technico-

Chapitre 2 : Extension de portée des systèmes GPON

économique sur le déploiement des Extender Box sur le réseau d'accès optique a mis en évidence le manque de fibres inter-NRO et l'installation de nouvelles fibres serait trop onéreuse et discréditerait l'installation d'EB sur le réseau. Ces fibres inter-centraux sont également utilisées pour la collecte des trafics ADSL provenant des DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer). Il apparaît donc nécessaire de trouver une solution qui permettra de mutualiser ces fibres. Des techniques de multiplexage WDM ou TDM en agrégeant les différents flux PON mais aussi DSL ou même mobiles sont alors considérées. Ces techniques sont similaires aux technologies OTN (Optical Transport Network) utilisées dans les réseaux de collecte ou métropolitains.



3.3.7.1. Extender Box WDM

Figure 108 : Architecture de GPON étendu par une EB WDM

Une première technique de multiplexage apparaît comme une évidence si on utilise des modules SFP interchangeables : le multiplexage en longueur d'onde (WDM). En effet, on a vu précédemment que des fournisseurs comme Telnet et Optoway fournissent respectivement des prototypes d'EB SFP avec leurs émetteurs-récepteurs enfichables et que Huawei allait proposer des cartes OLT avec 8 ports SFP pour sorties optiques PON. De ce fait, on peut facilement changer la plage de longueur d'onde entre l'OLT et l'EB, en changeant seulement ces modules. Le budget supplémentaire obtenu grâce à l'EB en déport permet également d'intégrer des multiplexeurs/démultiplexeurs afin de mutualiser la fibre de déport. On peut ainsi imaginer l'architecture schématisée en Figure 108, basée sur une EB WDM.

La solution CORECESS

Une technique de multiplexage similaire nous a été proposée par CORECESS qui est un acteur majeur du développement du PON WDM en Corée. Leur solution est basée sur un OLT WDM qu'ils ont modifié afin d'encapsuler des trames GPON (GEM). On a donc l'équivalent d'un OLT GPON colorisé. Ensuite en ligne, ils proposent d'utiliser des convertisseurs OEO SFP afin de réaliser également la conversion en longueur d'onde du WDM au GPON. On a donc une architecture similaire à celle proposée précédemment basée sur un OLT WDM GPON, soit le scénario D décrit par la figure suivante.





Figure 109 : Scénarios de mutualisation proposés par CORECESS

Cette figure présente plusieurs scénarios permettant de mutualiser la fibre et d'étendre la portée des différentes techniques d'accès fixe ou sans fil. En voici une brève description :

Scénario A : Il permet d'assurer un lien Gigabit Ethernet. Un multiplexage WDM est assuré inter centraux puis le lien GbE est desservi en point à point vers par exemple des clients entreprises ou des antennes de stations mobiles. Si nécessaire une EB peut être insérée pour régénérer un signal trop affaibli.

Scénario B : Un "mini" OLT est déployé dans le central esclave. On mutualise les liens de collecte GbE en WDM sur 16 à 32 longueurs d'onde.

Scénario C : Suppression des équipements actifs au central "esclave" grâce à des interfaces ONU/OLT plus performantes (Classe C+ ou EB au central).

Scénario D : C'est la solution hybride WDM-GPON + EB WDM présentée précédemment.

Scénario E : Un "mini" OLT est déployé au central esclave. Son lien de collecte est assuré en un lien 10GbE d'où un besoin minimisé en fibre inter-centraux.

Tous ces scénarii ont en commun qu'ils exploitent une extension de portée entre le central maitre et l'abonné et ils permettent chacun à leur manière de transporter un type de trafic (fixe ou mobile, PtP, PtMP) propre à chaque technique jusqu'à l'abonné. Pour autant, un équipement transparent aux protocoles donc aux services transportés permettrait une mutualisation encore plus forte du réseau. C'est l'idée développée dans les paragraphes suivant qui est basée sur une technique d'agrégation des flux à 10Gbit/s en plus d'un multiplexage WDM.

3.3.7.2. Agrégation de flux GPON à 10Gbit/s

Une solution d'OTN est basée sur un multiplexage temporel TDM pour agréger de multiples flux provenant de trafic Ethernet ou autres (Node B, services aux entreprises, etc.) mais aussi du trafic GPON. Cette solution permettrait également d'obtenir un budget optique supplémentaire et pourrait donc être considérée comme une Extender Box ayant pour but de réduire les équipements GPON déployés dans les centraux optiques, tel que l'illustre la Figure 110.



Figure 110 : Réseau d'accès étendu avec une agrégation à 10Gbit/s

Dans notre expérience, nous avons utilisé un équipement développé par la société Ekinops, qui permet de multiplexer temporellement 4 flux GPON descendants à 2.5Gbit/s et continus par l'intermédiaire de transceivers 10G, commutateurs électriques et MUX/DMUX. Ce lien à 10Gbit/s est ensuite démultiplexé pour venir alimenter les 4 arbres GPON vers les ONU. La Figure 111 montre cette architecture en détail.

Le trafic montant étant en mode burst, cet équipement ne permet pas d'agréger les flux montants du GPON. Afin de pouvoir les transmettre à travers cet équipement, nous avons donc converti les signaux montants en modulation continue (CW) en remplissant dans la trame, les espaces libres entre les burst, par des séquences PRBS. Cette séquence PRBS fait alors office d'Idle en l'absence de burst [60].



Figure 111 : Schéma expérimental de l'agrégation

En effet, puisque le TDM ne peut pas être réappliqué pour des signaux en mode burst, nous avons réalisé une fonction de conversion du mode burst en mode continu. Comme le montre la Figure 112, en présence de deux ONU, à partir du signal initial des burst du GPON (Graphe 1), nous utilisons l'enveloppe des burst pour créer des trous de même taille et même synchronisation, dans une séquence PRBS provenant d'un générateur externe (Graphe 2). Ensuite, nous allons remplir ces trous par les burst du GPON pour obtenir un signal continu (Graphe 3). Ce signal peut ainsi être transmis sur le lien à 10Gbit/s. Réciproquement, nous récupérons les burst initiaux (Graphe 4) avant de les transmettre vers l'OLT.



Figure 112: Conversion du mode burst en mode continu (CW) (1 à 3) et sa réciproque (3 à 4)

Nous avons ensuite réalisé des mesures de BER similaires à celles réalisées pour les précédentes EB. Premièrement, on note que l'ensemble du système est transparent au processus de ranging du GPON : les ONU sont tous reconnus par l'OLT.

Ensuite nous avons évalué le budget possible sur la transmission descendante à 10Gbit/s en insérant un atténuateur variable sur ce lien. La courbe de BER résultante est présentée sur la Figure 113.



Figure 113 : Courbes de BER du signal descendant à 10Gbit/s et 2,5Gbit/s et du signal montant à 1,25Gbit/s

Le transceiver XFP émettant à -7dBm, il en résulte un budget optique de 15,5dB disponible sur le lien à 10Gbit/s. Ce budget pourrait facilement être amélioré avec des XFP plus performants existants aujourd'hui et qui pourraient également être associés à des FEC adaptés. Un lien à 10Gbit/s sur 35dB peut alors facilement être envisagé. Par ailleurs, en comparant les courbes avec ou sans OTN, nous n'observons aucune pénalité due à l'insertion de l'agrégation à 10Gbit/s. Enfin, nous n'avons observé aucune pénalité sur le signal montant à travers cette fonction de conversion burst / continu. Le comportement des courbes de BER est typiquement similaire à celui d'un GPON étendu par OEO : un budget de 30dB est disponible pour déporter le système d'agrégation de l'OLT.

3.3.7.3. La solution OSN1800 de Huawei

Une solution similaire à la précédente mais plus aboutie, nous a été proposée en test par Huawei. Une première version nous permet d'avoir un lien 10Gbit/s agrégeant les flux montants et descendants GPON mais aussi DSL ou ATM (STM-1) ou encore Ethernet (GbE).



Figure 114 : Schématisation de l'architecture réalisée avec l'OSN 1800

Nous avons évalué les capacités d'extension de portée d'un tel système en dressant (Figure 115) une cartographie des budgets optiques possibles liés au taux de paquets transmis.

Ce prototype contient des XFP pour transmettre et recevoir les signaux sur le lien mono-fibre à 10Gbit/s (A à C). On observe qu'elle permet un déport sur ce lien de 28dB, pour une architecture d'accès de classe B+ mesurée entre C et les ONU du PON 1. On remarque également que pour un fort budget accès, plus celui-ci augmente, plus la réception des paquets est erronée. Les courbes de budget accès en fonction du taux de paquet reçus permettent d'observer ce phénomène en détail et nous permettent d'associer ce phénomène à la sensibilité des récepteurs des XFP et de remarquer logiquement une meilleure sensibilité pour les signaux descendants.



Chapitre 2 : Extension de portée des systèmes GPON

Figure 115 : Cartographie de perte de paquet selon les budgets possibles sur chaque lien OSN : de A à C et de C aux ONU

Une prochaine version, illustrée en Figure 116, proposera sur ce lien d'agrégation, un multiplexage WDM supplémentaire et flexible selon le besoin : CWDM à 8 λ ou DWDM avec 40 λ qui donneront un potentiel de 4, 16 ou 80 GPON par fibre inter-central. Cette performance soulève alors des questions de sécurisation du réseau en cas de coupure de cette fibre. Cette nouvelle version prévoit donc des liens de secours à cette fibre unique.



Figure 116 : Solution OTN proposée par Huawei : l'OSN 1800

Des tests sont actuellement en cours pour évaluer les performances en termes de latence, et également de budget optique sur cet équipement. Des études technico-économiques viennent également d'être lancées pour évaluer son impact topologique et économique sur le réseau d'accès fibre. Ces études permettront de conclure quant à l'intérêt de l'utilisation d'un équipement de type OTN pour mutualiser (en partie) les réseaux fixes et mobiles, en exploitant si possible une extension de la portée de ces réseaux d'accès.

Résumé du Chapitre 2

Ce chapitre a présenté les travaux réalisés sur l'extension de portée des systèmes GPON. Nous y avons défini les technologies clés qui permettront d'obtenir un budget optique supplémentaire, à savoir des Extender Box à base d'amplification optique ou de répéteurs optoélectroniques. Ces deux types d'Extender Box doivent être compatibles avec le GPON Classe B+ (13-28dB) existant : un débit descendant de 2,5Gbit/s sur une longueur d'onde à 1.49µm, et pour les signaux montants un débit 1,25Gbit/s en mode burst sur une longueur d'onde à 1.31µm montante. Dans une première partie, nous avons présenté les performances d'EB, disponibles commercialement, testées expérimentalement sur des équipements GPON déployés aujourd'hui. Nous avons proposé ensuite des évolutions de ces solutions qui doivent s'adapter aux besoins du réseau sous la forme de prototypes créés en discussion avec nos fournisseurs : une Extender Box 1 vers 4, une Extender Box WDM et une technique d'agrégation des flux inter-centraux OTN. Ces activités ont étés réalisées quasiment simultanément avec la rédaction de la norme G984.6 de l'ITU-T et ont donc contribué en partie à son édifice.

Synthèse des solutions d'extension de portée GPON

Technologie	E	Budget (d	dB)	Compa	tible	Coût	Conso *	OMCI
	Déport	Accès	Total (max)	B+	C+	(€)	(W)	
GPON B+	0	13-28	28	х	non	-	-	х
	0	17-32			х			
GPON C+	4	13-28	32	х		-	-	х
DSOA	12-16	13-28	44	х	non	700	3	?
PDFA+SOA	12-20	13-28	48	х	non	1500	-	-
	11-16	17-32	48	non	х			
OEO 2R	6-30	19-30	60	non	non	350	5	-
OEO 3R 1:1	5-33	11-32	65	х	х	500	5	х
OEO 3R 1:4	4-24	13-33	57	х	х	-	18	х
OEO WDM**	5-33	11-32	65	X	Х	500	5	Х
OTN	0-27	0-33	60	х	х	?	?	?
Norme G984.6	(13-28)	13-28	(56)	х	- / x	-	-	х

Afin de résumer les performances de chaque solution, le tableau suivant présente une synthèse des résultats obtenus selon le type de technologie de GPON ou d'EB.

- : non spécifié ; x : validé

* La consommation électrique est donnée pour un boitier n'implémentant pas une gestion de type OMCI. ** Les résultats de l'OEO WDM n'étant pas encore réalisés, nous supposons qu'ils seront identiques à ceux d'une OEO 3R 1:1.

Tableau 24 : Synthèse des résultats obtenu sur GPON selon la technologie

Ces résultats ont montré qu'à l'exception d'une Extender Box OEO 2R, toutes ces technologies sont compatibles avec une architecture d'accès de classe B+. Concernant l'amplification optique, on préférera la solution DSOA qui permettrait de fournir un budget optique total de 44 dB, ce qui est moins performant que la solution PDFA +SOA mais que l'on va écarter car c'est une technologie trop particulière pour être développée en masse.

Pourtant une étude menée sur le cumul du bruit d'ASE a montré qu'il faudra être vigilant, si on venait à cascader des amplificateurs SOA en série ou sur plusieurs branches d'un coupleur. Le

budget optique s'en retrouve réduit par une dégradation du rapport signal à bruit de la transmission.

Concernant les répéteurs OEO 3R, cette technologie permet d'obtenir un budget optique maximum de 65dB compatible avec un réseau d'accès de Classe B+ à C+. Cette performance est la meilleure relevée et ce pour un coût et une consommation électrique intéressants et des règles d'ingénierie simples.

Enfin, ce tableau présente les résultats des évaluations des différentes Extender Box mais également pour comparaison ceux du GPON seul et de la seule solution réellement passive qui est d'intégrer des émetteurs / récepteurs C+ aux terminaux du GPON. En effet, les solutions d'EB sont ici implémentées en ligne mais ces résultats peuvent être extrapolés pour une position au central en intégrant au boitier un atténuateur adapté à l'EB. Cela permettra ainsi de conserver l'aspect pratique du GPON : sa passivité physique totale de l'ONT au central.

Pour autant, une implémentation en ligne présente l'avantage de faciliter le déport des centraux grâce au budget déport obtenu qui va permettre d'étendre la portée ou d'augmenter le taux de partage du PON afin de couvrir une zone plus large à partir d'un seul OLT. L'emplacement de l'EB en ligne enlève alors le caractère passif du PON mais on imposera alors une contrainte sur l'emplacement de l'EB : elle devra être déployée dans un local d'ancien central ou même coulée en sous-sol si l'exploitation de ce central est amenée à disparaître.

Afin de faciliter les interventions des opérateurs réseaux, un système de gestion de type OMCI permet alors de remonter le même type d'alarmes qu'un ONU qui permettra de détecter et localiser les causes d'une défection sur le réseau aval au boitier.

Après une phase de pré-déploiement du FTTx en Europe, ralentie en France par l'absence de décision et les tergiversations de l'organisme de régulation ARCEP, on constate que le nombre de client connecté n'est pas optimisé par rapport au nombre de client connectables par zone. On parle alors de taux de remplissage des ports OLT déployés inférieurs à 15%. Dans le but, d'améliorer ce résultats, un prototype d'EB 1 vers 4 a alors été élaboré : à partir d'un seul port OLT, cette Extender box permet de desservir 4 ports ou arbres PON en sortie. Cela peut alors être vu par un coupleur (actif) sans pertes optiques d'où le nom de "coupleur virtuel". Les performances de ce boitier sont similaires à celles d'une EB OEO 3R, il pourra donc être intégrer au central pour multiplier par quatre le taux de remplissage d'un port OLT, ou en ligne pour en plus déporter un OLT ou couvrir une zone plus étendue.

On retiendra alors comme solution susceptible d'être déployée une EB de type OEO 3R qui affiche le plus de compatibilité avec ces notions, en plus de présenter les meilleurs résultats.

Cependant, dans ces conditions, une première étude technico-économique a montré que l'usage d'EB sur le réseau GPON ne sera pas économiquement intéressant en l'état. En effet, entre le central maître et le central esclave (à déporter), il n'existe aujourd'hui que peu de fibres pour assurer les liens de collecte. Par exemple, pour l'OLT Huawei, une fibre inter-centraux assure le lien de collecte pour 30 ports OLT. Or, si on envisage de déporter tout un central, une EB permet de ne remonter qu'un seul port OLT à la fois. Cela implique alors de déporter non plus un seul lien de collecte pour 30 ports OLT, mais cette fois un lien optique par port déporté. Cela correspond alors à un besoin 30 fois supérieur en fibres inter-centraux. Or, l'état des lieux du réseau inter-central ne permet pas actuellement de fournir ces fibres (fourreaux trop petits ou fibres dégradées). Sachant que le coût des équipements déployés représente un faible pourcentage comparé au coût du génie civil nécessaire à l'installation de la fibre dans les fourreaux, un multiplexage devient alors nécessaire sur ce lien inter NRA, d'où l'implémentation d'EB WDM. L'intégration de modules SFP dans l'EB OEO et à l'OLT devient alors très avantageuse car elle permet de changer la longueur d'onde émise entre l'OLT et l'EB tout en conservant un accès GPON standard. On pourra ainsi coloriser ce lien inter central afin de le multiplexer en longueur d'onde.

Une alternative à cette Extender Box WDM provient des équipements du réseau métropolitains : l'OTN. Ce type d'équipement permet d'agréger des flux quel que soit le trafic et de les multiplexer en longueur d'onde afin de les transporter sur une seule fibre. En y intégrant une fonction d'encapsulation des trames GPON, une solution proposée par Huawei sous le nom d'OSN 1800 réalise alors une fonction d'EB WDM en plus d'agréger des flux multi-trafics. Sachant que cette solution sera déployée sur nos réseaux DSL, elle peut alors avoir un potentiel intéressant pour optimiser le déploiement du réseau FTTx.

Bien que le réseau d'accès ne représente pas le consommateur majoritaire des réseaux déployés aujourd'hui, toute économie d'énergie réalisée est à prendre en considération. Un autre aspect non négligeable aujourd'hui pour les opérateurs de télécommunications est donc la diminution des dépenses énergétiques engendrées par les réseaux. Nous avons alors mené une étude sur l'impact énergétique de l'insertion d'Extender Box sur les réseaux FTTx. Bien que l'on vienne rajouter un équipement actif au réseau, l'insertion d'une EB permettra de réduire la consommation d'énergie en réduisant le nombre de ports OLT déployés uniquement si elle permet d'augmenter le taux de remplissage d'un PON.

Bien que nous ayons montré qu'il existait commercialement des Extender Box adaptées au réseau GPON, aujourd'hui le déploiement FTTx est toujours en phase de pré-déploiement, et ne permet pas encore d'obtenir un recul suffisant pour décider du lancement d'EB sur le réseau d'accès optique. L'annonce de l'ouverture de nouvelles villes en zones moins denses devrait accélérer cette décision qui sera certainement prise zone par zone, comme ça l'a été pour des équipements similaires sur le réseau cuivre. Un frein à cette décision est peut-être l'évolution constante du réseau fibré et l'apparition de nouvelles normes pour du très haut débit qui impliquent que les équipements déployés devront, dans la mesure du possible, être compatibles avec cette future génération de réseau dénommée NGPON.