N° d'ordre: XXX

THÈSE

Présentée à

TELECOM PARIS TECH

pour obtenir le grade

DOCTEUR de TELECOM PARIS TECH

Mention **«Communications et électronique»**

Par

Fabienne SALIOU

ETUDES DES SOLUTIONS D'ACCES OPTIQUE EXPLOITANT UNE EXTENSION DE PORTEE

Soutenue le 14 Juin 2010 devant la commission d'Examen :

Composition du Jury

- *Rapporteurs* :

Laurent DUPONT, Professeur, TELECOM BRETAGNE, Brest
Ammar SHARAIHA, Professeur, ENIB Brest

- *Examinateurs* :

Didier ERASME, Professeur, TELECOM PARIS TECH, **Directeur de thèse**
Philippe CHANCLOU, Ingénieur Recherche, Orange Labs, **Encadrant de thèse**
Romain BRENOT, Ingénieur Recherche, Alcatel-Thales III-V Lab
Jose A. LAZARO, Ingénieur Recherche, Universitat Politècnica de Catalunya

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Didier Erasme d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse, et de m'avoir fait bénéficier de ses conseils pendant ces trois années.

Je remercie également Thierry Stéphant et Anne-Cécile Réau-Thomas qui m'ont offert la possibilité d'effectuer cette thèse à Orange Labs et m'ont donné les moyens de mener à bien cette thèse dans leur laboratoire.

Mes remerciements les plus sincères vont à Philippe Chanclou, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et a fortement contribué à ma formation sur les télécommunications optiques, déjà bien avant la thèse. Merci de m'avoir fait confiance pour et après les stages et de m'avoir offert ces opportunités. Merci pour la bonne humeur, le dynamisme, la motivation, les idées qu'il a su me communiquer. La bonne ambiance dans laquelle nous avons travaillé ensemble sera un souvenir marquant.

Par ailleurs, je suis particulièrement honorée que Laurent Dupont et Ammar Sharaiha aient accepté d'être rapporteurs de ce mémoire de thèse et que Romain Brenot et Jose Lazaro fassent partie du jury.

Je remercie également Badr Eddine Benkelfat et Isabelle Zaquine qui ont accepté de faire partie du jury de ma soutenance à mi-parcours.

Je tiens à remercier les différentes personnes de l'URD ASHA et ex-membres de l'unité NOA qui m'ont permis d'acquérir des compétences pointues sur le réseau d'accès au travers des discussions sur le domaine. Merci en particulier à Naveena Genay, avec qui j'ai partagé la rédaction de plusieurs livrables et qui a été d'une aide précieuse lors de la rédaction d'articles en anglais. Un grand merci à Laurent Guillo pour son aide à l'installation des plateformes de test et à Bernard Landousies et Stéphane Gosselin pour les discussions fructueuses qui m'ont permis de cadrer correctement cette thèse.

Je remercie aussi particulièrement mes collègues de bureau en commençant par Fabrice Bourgart qui a été le premier à me répondre à cette question "c'est quoi cette idée d'Extender Box ? ". Merci aussi à Fréderic Jounay, Mathieu Huchard, et Francis Richard pour les discussions sans fin et les échanges musicaux et rugbystiques. L'excellente ambiance du bureau aura également fortement contribué à ce que cette thèse se déroule bien.

Je dois également un grand merci à Fabien Laurent, Thanh Nga Duong, Zineb Belfqih, Luiz Aneto, Chloé Milion, Mervin Obeegadoo et Yunke Zhou qui m'ont aidée pour l'obtention de résultats expérimentaux et qui ont contribué à ce que la soumission des publications soit un succès.

Je dois mes connaissances sur le GPON en partie aux personnes travaillant sur la validation des équipements du réseau. Merci donc à Bertrand Le Guyader, Laurent Cornic, Thierry Mahé, Daniel Le Corfec et Yannick Lecuyer. Merci également à Yann Loussouarn et Damien Martinet avec qui j'ai partagé les tests de l'équipement OSN. Ces travaux auraient étés plus difficiles sans leurs participations.

Merci également aux équipes externes avec qui j'ai collaboré : à Lionel Dehilotte, Philippe Bigot et David Boisseau de DIPF Montpelier ; à Claude Boetté de Ekinops ; à Jose Lazaro, Francesc Bonada et Josep Prat du laboratoire UPC à Barcelone ; à Laurent Bramerie de Persyst à Lannion.

Je remercie également Gérard Tanne et Monique Thual pour m'avoir fait confiance et m'avoir permis d'effectuer des heures d'enseignement vacataire à l'UBO à Brest et à l'IUT de Lannion. Merci à Philippe Chanclou, Jean Claude Simon et Ammar Sharaiha de m'avoir soutenue dans cette démarche.

Merci également à tous les (ex)-stagiaires, (ex)-thésards, prestataires et post-doc pour la très bonne ambiance dans laquelle nous avons travaillé et échangé aussi bien au travail qu'à l'extérieur : Florian, Fred, Yohan, Zineb, Thomas LG, Guillaume, Charlotte, Qian, Seb, Nga, Hugues, Roman, Thomas S, Edouard, Hary, Amine, Fabia, Chloé, François, Francis, Mathieu, Daniel, Ali, Mervin, Franck, Leonora, Mireia, Francesc, Hai, Nguyet, Ibrahim, Quoc Thai, Chi, Gilles… Merci également aux "externes" : Cyril, Sabrina, Morgane, Lyam. Merci à tous d'être et d'avoir été là.

Et pour finir, un grand merci à mes amis et à ma famille pour leur soutien tout au long de cette thèse et en particulier à Caroline et Murielle pour l'aide qu'elles m'ont apportée dans les corrections.

Liste des abréviations

A

ADC	Analogue to Digital Converter
ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Loop (Line)
AMOOFDM	Adaptive Modulation Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing
APD	Avalanche Photodiode
APON	ATM Passive Optical Network
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ASK	Amplitude Shift Keying
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arrayed Waveguide Grating
AWG	Arbitrary Waveform Generator

B

BER	Bit Error Rate
BOA	Booster Optical Amplifier
BPON	Broadband Passive Optical Network
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BTB	Back To Back
BW	Band Width

C

CAPEX	Capital Expenditure
CATV	Cable Television
CD	Chromatic Dispersion
CDC	Chromatic Dispersion Compensation
CO	Central Office
COFDM	Code Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CP	Cyclic Prefix
CR	Clipping Ratio
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing

D

DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DFB	Distributed Feedback laser
DFT	Discrete Fourier Transform
DML	Directly Modulated Laser
DMT	Discrete Multi-Tone
DMUX	Demultiplexer
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DSL	Digital Subscriber Loop (or Line)
DSOA	Double Semiconductor Optical Amplifier
DSP	Digital Signal Processing
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing

E

EAM	Electro Absorption Modulator

EB	Extender Box
EDC	Electronic Dispersion Compensation
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EML	Externaly Modulated Laser
EPON	Ethernet Passive Optical Network
ER	Extinction Ratio
ETSI	European Telecommunication Standard Institute
EVM	Error Vector Magnitude

F

FDM	Frequency Division Multiplexing
FEC	Forward Error Code
FFT	Fast Fourier Transform
FP	Fabry-Pérot laser
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSAN	Full Service Access Network
FSK	Frequency Shift Keying
FTTx	Fiber To The (H: Home; C: Curb, B: Building)
FWM	Four Wave Mixing

G

GEM	GPON Encapsulation Method
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GEPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network

H

HD-IPTV	High Definition Television over Internet Protocol
HDTV	High Definition Television

I

ICI	Inter Carrier Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IL	Insertion Loss
IP	Internet Protocol
ISI	Inter Symbol Interference
ITU	International Telecommunications Union

J-K

L

LAN	Local Access Network
LCA	Levin Campello Algorithm
LED	Light Emitting Diode

M

MAC	Medium Access Control
MUX	Multiplexer
MZM	Mach-Zehnder Modulator

N

NF	Noise Figure
NRA	Noeud de Raccordement d'Abonnés
NRO	Noeud de Raccordement Optique
NRZ	Non Return to Zero
NGPON	Next Generation Passive Optical Network

O

OB	Optical Budget
OBS	Optical Burst Switching
OCDMA	Optical Code Division Multiplexing Access
ODN	Optical distribution Network
OEO	Optical-Electrical-Optical
OFDM (A)	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Access)
OLT	Optical Line Termination
OMCI	ONT Management and Control Interface
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
OOK	On-Off Keying
OPEX	OPerational EXpanditure
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OSA	Optical Spectrum Analyser
OTN	Optical Transport Network
OTDR	Optical Time Domain Reflectometre

P

PAPR	Peak Average Power Ratio
PDFA	Praseodymium Doped Fiber Amplifier
PIN	P-type Intrinsic N-type Photodiode
PLOAM	Physical Layer Operation Administration and Maintenance
PON	Passive Optical Network
Pr	Preamble length
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence
PSTN	Public Switched Telephone Network

Q

QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

R

RF	Radio Frequency
RoF	Radio over Fiber
ROPA	Remote Opticaly Pumped Amplifier
R-SOA	Reflective Semiconductor Optical Amplifier
Rx	Receiver

S

SARDANA	Scalable Advanced Ring-based Passive Dense Access Network Architecture
SFF	Small Form Factor

SFP	Small Form Pluggable
SNR	Signal to Noise Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
STB	Set Top Box

T

TDM (A)	Time Division Multiplexing (Access)
TEB	Taux d'Erreur Binaire (=BER)
TIA	Trans-impedance Amplifier
Tx	Transmitter

U

UWB	Ultra Wide Band
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System

V

VoD	Video on Demand
VoIP	Voice over IP
VDSL	Very high Digital Subscriber Loop (Line)
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser

W

WDM (A)	Wavelength Division Multiplexing (Access)
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access

X

XGM	Cross Gain Modulation
XGPON1	10GPON asymétrique normalisé par le FSAN
XGPON2	10GPON symétrique normalisé par le FSAN
XFP	Transceiver 10G Small Form Plugable

Y-Z

Table des matières

Remerciements 1

Liste des abréviations 3

Table des matières 7

Introduction générale 9

Chapitre 1 11

Introduction au Chapitre 1 12
1. Introduction au réseau d'accès 13
1.1. Les liaisons haut-débit 16
1.2. Le réseau d'accès fibre : FTTx 22
2. Le réseau d'accès GPON 32
2.1. Eléments terminaux de l'architecture GPON 32
2.2. Caractéristiques du GPON 35
2.3. Couche MAC et encapsulation 37
2.4. Budget optique 40
2.5. BPON, GEPON 43
2.6. Extension du budget optique avec des "Extenders Box" 45
3. La future génération de réseau d'accès optique 48
3.1. Les raisons pour évoluer vers une nouvelle génération de PON 49
3.2. NGPON1 57
3.3. NGPON2 67
Résumé du Chapitre 1 77

Chapitre 2 79

Introduction 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 82
1.3. Evaluation du budget supplémentaire nécessaire 84
2. Technologies d'Extender Box 85
2.1. L'amplification optique 85
2.2. Les répéteurs OEO 92
3. Evaluation d'Extender Box sur GPON 99
3.1. Critère de qualité d'une transmission optique 99
3.2. Première évaluation en mode continu 101
3.3. Evaluation sur GPON commercialisés 106
Résumé du Chapitre 2 145

Chapitre 3 149

Introduction au Chapitre 3 150
1. Extension de portée NGPON-1 : 10GPON 151
1.1. Mise en œuvre d'une transmission à 10Gbit/s 151
1.2. Amplification d'une transmission à 10Gbit/s 156
1.3. Convergence GPON –NGPON 1 166
2. Extension de portée NGPON-2 171
2.1. Extension de portée d'un PON WDM 171
2.2. PON hybride WDM-TDM 176
2.3. Amplification d'une transmission OFDM 180

3. Convergence fixe-mobile 191
3.1. Extension de portée de liaisons Radio sur Fibre analogique 193
3.2. Extension de portée d'une architecture RoF numérique - GPON 194

Résumé du Chapitre 3 197

Conclusion générale 201

Bibliographie personnelle 203

Annexes 205

Index des figures 223

Index des tableaux 226

Table des références 227

Introduction générale

Les réseaux d'accès DSL déployés atteignent leurs limites en termes de débit et de portée. Or, le développement de nouveaux services de télécommunications implique une forte croissance du besoin en bande passante offerte aux utilisateurs. De ce fait, l'optique a fait son entrée dans nos foyers depuis quelques années, à travers les liaisons très haut débit FTTH (Fiber To The Home).

Plusieurs techniques se distinguent pour amener la fibre jusqu'à l'abonné et nous allons nous attacher particulièrement à la solution GPON (Gigabit Passive Optical Network) choisie par France Telecom. Ce type de réseau décrit un architecture point-à-multipoint, basée sur un multiplexage temporel de la transmission des données de chaque utilisateur. Le GPON s'illustre alors sur une portée de 20km et permet de desservir jusqu'à 64 clients (ONT) à partir d'un seul point d'agrégation au central (OLT). Ce type de réseau transporte des flux de données descendants à un débit de 2.5Gbit/s et montants à 1.25Gbit/s, ce qui permet d'offrir une bande passante atteignant 100Mbit/s chez l'abonné.

Dans ce cadre, le chapitre 1 est intitulé " le réseau d'accès optique et son évolution". Il permet d'introduire les infrastructures du réseau d'accès très haut débit et particulièrement le réseau fibré FTTx. Le GPON fait l'objet d'une présentation plus détaillée car sa mise en place a été indispensable aux études menées au chapitre 2.

A la fin 2009, on estimait à environ 650 000 le nombre d'utilisateurs pouvant bénéficier de ce type de technologie en France, principalement dans les grandes métropoles. En effet, la topologie de ce réseau s'adapte bien à une démographie où la densité de population est très élevée, mais il est difficile et très couteux d'atteindre des utilisateurs plus dispersés sur le territoire. Pourtant, l'accès au très haut débit doit être universel et son développement pour tous est largement soutenu par les opérateurs de télécommunication et les gouvernements. Il est donc nécessaire d'optimiser le déploiement du réseau d'accès optique avec l'objectif d'une couverture totale du territoire et à moindre coût.

Ainsi, l'extension du budget optique entre le central et les utilisateurs du réseau d'accès se révèle utile pour obtenir une marge supplémentaire d'atténuation du signal optique. Ce budget optique additionnel peut s'exprimer par une extension de la portée, du taux de remplissage et l'obtention d'une flexibilité accrue sur les infrastructures du réseau. Cela permettra d'atteindre un plus grand nombre d'utilisateurs, dont des clients plus éloignés d'un central optique. Il sera également envisageable d'éloigner les abonnés des centraux afin de réduire le nombre de locaux contenant les OLT.

Cet aspect est intégré au sein d'organismes de normalisation (standard ITU-T G984.6) depuis 2008 sous le terme "Extender Box". Deux types de solutions permettant l'extension du budget optique sont préconisés : l'une à base d'amplification optique, et l'autre à base de régénération optique-électrique-optique. Le Chapitre 2 détaille ces technologies et présente les tests réalisés en implémentant ce type d'Extender Box sur des GPON commercialisés.

A plus long terme, le réseau d'accès va évoluer vers une Nouvelle Génération de PON : NGPON, dont le principal objectif est la montée en débit jusqu'à 10Gbit/s et plus. Les enjeux et les technologies entrant dans ce contexte sont décrits au chapitre 1. Enfin, toujours dans un contexte d'extension de portée, nous allons chercher à augmenter le budget optique des technologies NGPON. A travers des tests d'architectures NGPON étendues, nous allons évaluer les capacités d'extension de budget optique de l'amplification optique en y insérant différents types d'amplificateurs. Ces expérimentations sont présentées au chapitre 3.

Chapitre 1

Le réseau d'accès optique et son évolution

SOMMAIRE DU CHAPITRE 1

Introduction au Chapitre 1 12

1. Introduction au réseau d'accès 13

1.1. Les liaisons haut-débit 16
1.2. Le réseau d'accès fibre : FTTx 22

2. Le réseau d'accès GPON 32

2.1. Eléments terminaux de l'architecture GPON 32
2.2. Caractéristiques du GPON 35
2.3. Couche MAC et encapsulation 37
2.4. Budget optique 40
2.5. BPON, GEPON 43
2.6. Extension du budget optique avec des "Extenders Box" 45

3. La future génération de réseau d'accès optique 48

3.1. Les raisons pour évoluer vers une nouvelle génération de PON 49
3.2. NGPON1 57
3.3. NGPON2 67

Résumé du Chapitre 1 77

Introduction au Chapitre 1

Ce chapitre permet de définir le réseau d'accès optique et son évolution qui feront l'objet du contexte des études menées aux chapitres suivants.

En partant du réseau d'accès de télécommunications général, on ciblera notre description sur le réseau d'accès optique et son état de déploiement actuel jusqu'à la maison: FTTH (Fibre To The Home). Différentes technologies y seront présentées, particulièrement celle déployée majoritairement en Europe : le GPON (Gigabit Passive Optical Network).

Ensuite, nous définirons le NGPON (Next Generation PON) comme la génération de réseau d'accès optique qui est susceptible de succéder au GPON. Les acteurs et les raisons de cette future migration du réseau d'accès sont présentés et l'on distinguera deux types de NGPON : le NGPON1 regroupant les études de normalisation liées à une première migration vers le 10Gbit/s et le NGPON2 qui illustre une migration long terme ouverte à de nombreuses nouvelles technologies.

1. Introduction au réseau d'accès

La fibre optique est un support privilégié pour les télécommunications à haut débit. Comparé à d'autres supports de câbles conducteurs, elle présente de nombreux avantages en performance de transmission tels qu'une très faible atténuation, une très grande bande passante et des possibilités de multiplexage qui permettent d'atteindre de très hauts débits sur une très grande portée. Des avantages de mise en œuvre sont aussi à relever : par sa toute petite taille (quelques µm), sa grande souplesse, son faible poids, sa sécurité électrique et électromagnétique (isolation). Ses atouts en font un support privilégié pour le câblage en informatique, en aéronautique et diverses applications industrielles mais surtout pour les réseaux de télécommunication à très haut débit.
Ce support est largement utilisé par les réseaux très longue distance (sous marins, réseau cœur) et apparaît depuis quelques années dans le réseau d'accès optique pour permettre aux abonnés "haut débit" de profiter de performances plus élevées que d'autres supports tels que le cuivre, coaxial, Wifi ou encore transmission satellite.

Les réseaux de télécommunications optiques

Dans la structure hiérarchique des réseaux publics de télécommunications on est amené à distingué différentes portions du réseau correspondant à différents niveaux de cette hiérarchie, illustré en Figure 1. Une première distinction est opérée entre le réseau d'accès et le réseau de transport.

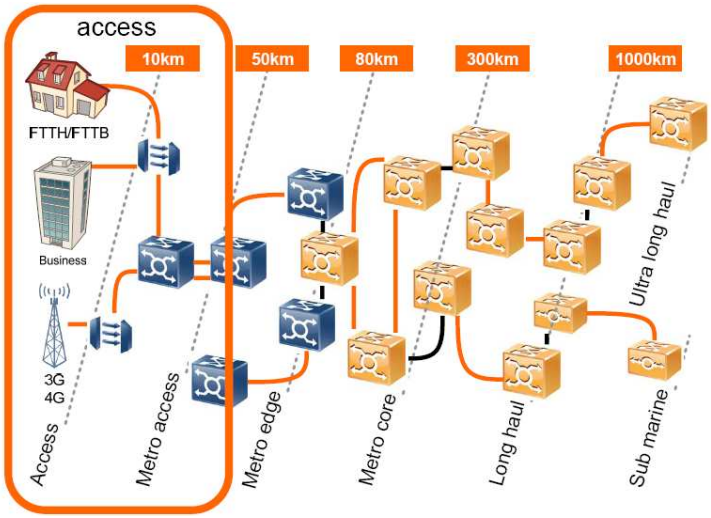


Figure 1 : Architecture d'un réseau de télécommunication

Le réseau de transport

Les commutateurs de télécommunications reliés entre eux (notamment pour des raisons de protection de trafic) forment le **réseau de collecte** (ou métropolitain) qui constitue le premier niveau du réseau de transport. On peut y distinguer principalement au niveau national des réseaux maillés formés de plusieurs sous-réseaux ayant une structure en boucle.
Au-delà des réseaux nationaux, on trouve des réseaux s'étendant sur plusieurs milliers de kilomètres à l'échelle des pays les plus grands ou de continents. On parle alors de **réseaux continentaux** ou (très) longue distance ou encore de **réseaux sous-marins**.
Le réseau de transport permet de réaliser des transmissions de données à des débits atteignant une centaine de Gigabit/s aujourd'hui, en partie grâce au multiplexage en longueur d'onde qui existe depuis une vingtaine d'années.

Le réseau d'accès

Il englobe l'ensemble des moyens servant à relier des terminaux de télécommunications (fibre, mobile ou sans fil) entre un utilisateur final et un commutateur du réseau de transport. La distance séparant ces terminaux est souvent de l'ordre de quelques kilomètres jusqu'à 20km. Le coût du réseau d'accès est généralement prépondérant à cause du grand nombre de client et d'un faible partage de l'infrastructure.

Les réseaux d'accès optiques sont déjà déployés massivement en Asie où plusieurs millions de foyers sont raccordés en fibre optique ainsi qu'aux USA où les opérateurs ainsi que de nombreuses collectivités locales installent des réseaux d'accès optiques très haut débit. Les USA et l'Asie en général sont de fervents utilisateurs des technologies optiques dans l'accès, tandis qu'en Europe nous assistons seulement aux débuts de déploiements, par des opérateurs télécom mais aussi à des collectivités locales.

En France, les réseaux d'accès optiques étaient réservés uniquement aux entreprises ayant besoin de débits symétriques, impossibles à fournir par les technologies xDSL. En 2005 de petits opérateurs ont commencé à proposer des accès fibre dans les immeubles à Paris et France Télécom a lancé en 2006 une expérimentation pilote FTTH (Fibre To The Home) visant à connecter quelques milliers de foyers à Paris et en région parisienne. Un vecteur important de ce test grandeur nature est la vidéo Haute Définition. En Allemagne Deutsch Telekom a annoncé un investissement massif dans un réseau de fibres optiques et dans des équipements VDSL (Very High Bit Rate DSL) installés près des clients dans le but d'offrir du très haut débit. Quelle que soit la technologie proposée (FTTH ou FTTx + VDSL) la fibre optique se rapproche des utilisateurs et devient indispensable dans le réseau d'accès pour fournir un débit de 100Mbit/s par foyer permettant de recevoir en simultané plusieurs canaux vidéos Haute Définition, de la vidéo à la demande, des services de visiophonie et téléphonie, des services de jeu en ligne, de l'Internet haut débit et bien d'autres services qui apparaitrons à l'usage.

Terminologie du réseau d'accès

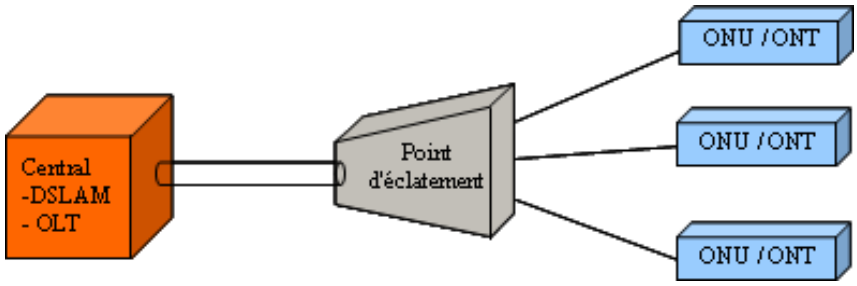


Figure 2 : Terminologie du réseau d'accès

Dans une architecture cuivre, le Central représente le NRA (Nœud de Raccordement d'Abonnés) qui désigne une co-localisation de plusieurs équipements. Le central contient, plus particulièrement, le DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) qui est la partie émettrice des signaux descendants et réceptrice des signaux montants des technologies x-DSL. Le point d'éclatement, appelé SR (Sous Répartiteur), est usuellement le point d'éclatement des paires de cuivre. Ce point d'éclatement peut être suivi d'autres points de répartition (PC : Points de Concentration) depuis le central. La partie "client" contient le modem (ADSL, data sur RTC, RNIS…).
Dans les réseaux d'accès optique, le central se dénomme NRO (Nœud de Raccordement Optique) quand il comporte un OLT (Optical Line Termination) qui est l'équipement d'émission

- réception. Le point d'éclatement contient, dans le cas de l'optique partagée, le coupleur ou un élément de multiplexage optique pour un réseau WDM (Wavelength Division Multiplexing). La partie "client" est généralement appelée ONU (Optical Network Unit) si elle est partagée entre plusieurs clients et suivi d'une transmission secondaire (cas des FTTCab/Curb/Building) sinon elle porte le nom ONT (Optical Network Termination) si elle est mono client FTTH. C'est la partie réceptrice des signaux descendants et émettrice des signaux montants. Il s'agit également de CPE (Customer Premises Equipment) mais ce terme désigne le module physique de réception situé derrière l'ONT chez le client.
Les deux directions de transmission des signaux dans un réseau optique sont le sens descendant pour une transmission du central (OLT) vers les clients (ONU) et montant pour une transmission dans le sens opposé.

Démographie du réseau d'accès en France

On peut définir 3 sortes de zones d'accès en France, illustrées en Figure 3, qui se différencient principalement par le nombre d'abonnés/km² à couvrir par un déploiement d'accès optique.

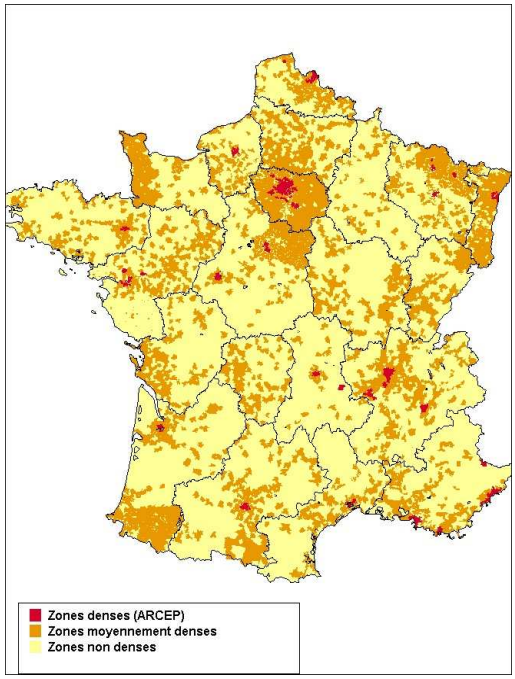


Figure 3 : Carte des zones Françaises

Zone (très) dense

La concurrence y est livrée par l'infrastructure optique déployée (chaque opérateur y déploie sa propre infrastructure).
Ces zones concernent 148 municipalités dans 20 métropoles qui couvrent environ 5 millions de foyers dont 50% sur Paris et grand Paris. Cela représente un total d'environ 25% de la population française.
Cette zone est la seule pour laquelle les règles d'ingénierie de déploiement sont définies.

Zone moyennement dense

Les zones moyennement denses sont considérées comme non ouverte à la concurrence pour une infrastructure séparée : un co-déploiement et un co-investissement privé dans l'architecture optique y est ciblé.

Ces zones devraient représenter environ 50% de la population française, dont en majeure partie des villes de taille moyenne (< 300 000 habitants).

Zone non dense
La couverture des zones non denses seraient financée par les régions et les municipalités. Des Délégations du Service Public (DSP) sont constituées sur plusieurs sites par les services locaux.
Environ 25% de la population française y est concernée, principalement en zone rurale.
La position d'un point de mutualisation permettant l'accès au réseau déployé à d'autres opérateurs, n'a pas encore été définie pour ces deux dernières zones. Cependant, deux alternatives se présentent : un point de mutualisation à la fin du segment de transport optique ou au sein même du nœud d'accès optique.

1.1. Les liaisons haut-débit

Le réseau d'accès connaît actuellement une évolution très rapide qui accompagne le développement de l'Internet et des services de télécommunication dans le monde entier. En Europe cette évolution est particulièrement visible au travers de l'essor des déploiements xDSL et les débits par utilisateur augmentent de façon très rapide. En 2000 le débit offert ne dépassait pas 512kbit/s tandis qu'il s'élève aujourd'hui à 100Mbit/s. La course au débit a été menée jusqu'à maintenant pour des questions de concurrence et de part de marché et les débits offerts étaient donc généralement bien supérieurs aux besoins réels des services proposés. Un tournant est survenu en 2005 avec l'apparition, dans le catalogue des opérateurs, de services audiovisuels: bouquets télévisuels et vidéo à la demande. C'est un tournant dans la mesure où ces services requièrent des débits très importants et nécessitent l'évolution des technologies xDSL et l'introduction de l'optique pour supporter ces services. En effet l'xDSL connaît de fortes limites de portée avec l'augmentation des débits et l'optique est une solution à ce problème.

Un panorama de l'accès en général (sans fil, cuivre et optique) est ici dressé afin d'établir un état des lieux des technologies disponibles et de leurs performances respectives.

1.1.1. Accès sans fil

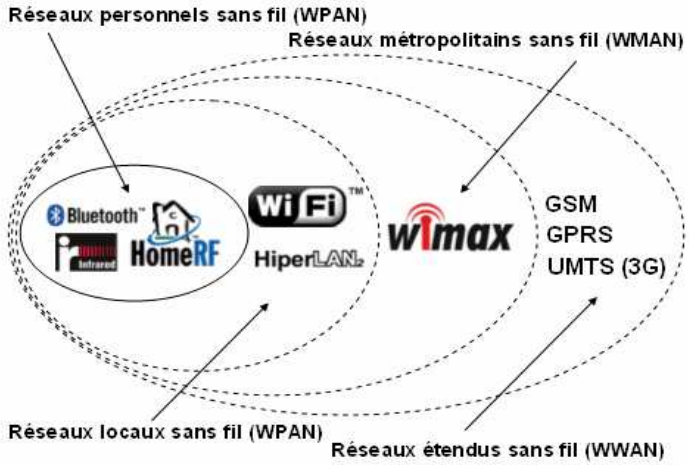


Figure 4 : Catégories de réseaux sans fil [1]

Le réseau d'accès sans fil se répartit en quatre catégories illustrées sur la Figure 4 [1]. Ces catégories se distinguant d'une part par la fréquence d'émission utilisée et d'autre part par le débit et la portée des transmissions.

Le réseau personnel sans fil (Wireless Personal Area Network) concerne les réseaux sans fil d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseaux sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, ...) ou un assistant personnel (PDA) à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN dont principalement le Bluetooth fonctionnant à un débit théorique de 1 Mbit/s pour une trentaine de mètres maximum.

Le réseau local sans fil (Wireless Local Area Network) permet de couvrir un réseau d'une portée d'environ une centaine de mètres. Parmi les technologies utilisées dans ce type de réseaux on note le Wi-Fi qui offre des débits allant jusqu'à 54Mbps sur une distance de plusieurs centaines de mètres en espace ouvert. Ainsi, des opérateurs commencent à irriguer des zones à forte concentration d'utilisateurs (gares, aéroports, hôtels, trains, ...) avec des réseaux sans fil. Les travaux de la norme sont actifs pour faire évoluer le débit vers quelques 100Mbit/s. Les performances des différentes normes sont résumées dans le Tableau 1.

	Fréquence liaison hertzienne	Débit maximum	Distance maximum	Remarque
802.11	2,45 Mhz	2 Mb/s	100 mètres	Premier réseau sans fils
802.11A **Wifi5**	5 à 6 Ghz	54 Mb/s maximum	Jusque 366 mètres à l'extérieur, 91 m à l'intérieur.	Incompatible avec les autres liaisons
802.11B **Wifi**	2,4 Ghz	11 Mb/s	100 mètres	Liaison sans fils la plus courante en Europe
802.11B+	2,4 Ghz	22 Mb/s	100 mètres	Amélioration du 802.11B et compatible Cryptage sur 64, 128 et 256 bits.
802.11G	2,4 Ghz	54 Mb/s	100 mètres	Compatible 802.11, 802.11B et 802.11B+
802.11G+	2,4 Ghz	108 Mb/s	100 mètres	Version améliorée du 802.11G

Tableau 1 : Performance des normes sans fil

La norme de réseau métropolitain sans fil (Wireless Metropolitan Area Network) la plus connue est le WiMAX, permettant d'obtenir des débits de l'ordre de 70 Mbit/s sur un rayon de plusieurs kilomètres. Un des usages possibles du WiMAX consiste à couvrir la zone dite du «dernier kilomètre» et fournir un accès à internet haut débit aux zones non couvertes par les technologies filaires classiques.
Le réseau étendu sans fil (Wireless Wide Area Network) est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont le GSM (Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile), GPRS (General Packet Radio Service) et l'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Cette dernière technologie permet par exemple un accès à 384kbit/s et les évolutions futures vont vers des débits de 2Mbit/s.

Connexion 3G et 3G+

Le 3G et son évolution le 3G+ découlent au départ de la téléphonie pour GSM. C'est leur principale utilisation, mais ils permettent également le transfert de données (vidéo, internet…). Cette solution permet une vitesse de transfert théorique de 14,4Mb/s d'une antenne vers un récepteur mobile et de 5,8Mb/s dans l'autre sens.
La portée est limitée à quelques kilomètres. Quelques régions plus reculées utilisent une vitesse de 160kb/s ou sont hors de portée.
Cette solution peut être implantée sur un ordinateur via un port USB, on parle alors de clé 3G.

Connexion internet par satellite

La connexion internet par satellite permet de se connecter quasiment partout, notamment loin de systèmes de télécommunications filaires.
Les premières connexions utilisaient un système hybride : réception par la parabole, émission par modem classique. Ceci permet d'utiliser des antennes standards mais offre une performance limitée.
Les paraboles intègrent un module d'émission pour une connexion internet depuis seulement quelques années. Les débits transférés varient de 128kb/s à 1024kb/s pour une l'emission et de 512kb/s à 8Mb/s en réception (avec une limite théorique de 155 Mb/s). Pourtant, un tel système utilise des satellites géostationnaires, distants d'environ 36 000km de la terre. Lors de l'émission (ou de la réception), le signal parcourt d'abord cette distance vers le satellite puis est renvoyé vers la base de réception (soit un déplacement de plus de 72000 kilomètres. L'écart entre l'émission et la réception est de l'ordre de 700ms (temps de latence), ce qui est alors peu pratique pour le transfert de données bidirectionnelle instantanées du type VoIP (Voice over IP) ou jeux en ligne.
Depuis la naissance du plan national numérique, visant la disponibilité d'un accès haut débit pour 100% des Français, les offres internet par satellite viennent combler les zones blanches (non couvertes) par la 3G et l'xDSL. Les prix sont maintenant bien plus attractifs avec des tarifs comparables aux autres technologies mais ce type de connexion propose une bande passante plus faible (3Mbit/s).

1.1.2. Les technologies xDSL

Les technologies DSL regroupent les systèmes de télécommunication qui permettent de transmettre des données à haute vitesse sur des lignes téléphoniques torsadées.
Il en existe différentes variantes [2] : HDSL (High bit rate DSL) ; SDSL (Single pair, ou Symmetric DSL) ; ADSL (Asymmetric DSL) ; RADSL (Rate adaptative DSL) ; VDSL (Very high DSL).
Les différences essentielles entre ces différentes technologies sont la vitesse de transmission, la distance maximale entre l'utilisateur et le point d'accès, une variation de débit (vitesse) entre le flux montant et flux descendant.

Les technologies xDSL sont divisées en deux familles, celles utilisant une transmission symétrique et celles utilisant une connexion asymétrique.

L'éligibilité d'une offre xDSL dépend du rapport signal sur bruit. Ce dernier dépend en premier lieu de la distance, la qualité de la paire cuivre, des perturbations électromagnétiques et autres.
On parle également éligibilité à la TV par DSL qui requiert une certaine proximité de l'utilisateur au central afin de pouvoir assurer le débit des flux vidéo.

Leurs principales caractéristiques des différentes technologies xDSL sont résumées par le Tableau 2.

Abréviation	Définition	Mode	Débit Internet -> PC	Débit PC -> Internet	Distance maximum	Nombre de paires
HDSL	High data rate DSL	symétrique	1.544 Mb/s	1.544 Mb/s	3,6 km	2 ou 3 suivant le débit souhaité
			2.048 Mb/s	2.048 Mb/s		
HDSL 2	High data rate DSL 2		1.544 Mb/s (USA) - 2 Mb/s (Europe)	1.544 Mb/s (USA) - 2 Mb/s	2,5 km	1
SDSL	Single line DSL		128 Kb/s à 2 Mb	768 Kb/s	3,6 km	1
SHDSL	Single-Pair High-Speed DSL		- 192 Kb/s à 2,3 Mb/s (une paire),	- 192 Kb/s à 2,3 Mb/s (une paire),	5 km	1 ou 2 suivant le débit souhaité
			- 384 Kb/s to 4.6 Mb/s (deux paires)	- 384 Kb/s to 4.6 Mb/s (deux paires)		
ADSL	Asymmetric DSL	Asymétrique	128 Kb/s à 8 Mb/s	16 à 640 Kb/s	5,4 km (6,5 en réduisant la vitesse)	1
ADSL 2			128 à 12 Mb/s			
ADSL 2+			128 à 24 Mb/s	16 Kb/s à 1 Mb/s	5,4 Km	
RADSL	Rate Adaptive DSL		0.6- 8 Mb/s	128 kb/s-1 Mb/s	5,4 km	1
VDSL	Very high data DSL		15-53 Mb/s	1.544-2.3 Mb/s	1,3 km	1
ReADSL	Reach Extended ADSL		512kb/s	128 kb/s	8 km	1

Tableau 2 : Synthèse des technologies xDSL [2]

1.1.3. HFC : Hybride Fibre - Coaxial

Le HFC est une technique de distribution qui combine un support de transport de donnée fait de fibre optique puis de câble coaxial (d'où le nom de réseau hybride fibre coaxial, HFC).

La distribution HFC utilise une architecture en étoile faite de câbles coaxiaux qui desservent des groupes d'abonnés (de 500 à 2 700). Le centre de cette étoile effectue la conversion des signaux optiques en signaux électroniques et réciproquement. Cette structure permet de réhabiliter les anciens réseaux de diffusion télévisuelle analogique et de les ouvrir à la nouvelle gamme de services interactifs numériques.

Les câbles coaxiaux de distribution constituent un réseau de type Ethernet, des bandes de fréquences spécifiques étant allouées à chacun des sens de transmission et pour des services bien définis, selon les principes de modulation décrits dans les normes. La norme des modems-câble a été établie sous le sigle DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification), et rédigée par le centre de recherche et de développement d'un groupe d'industriels d'Amérique du nord et du sud, appelé "Cable Television Laboratories" (ou CableLabs), avec l'aide du MCNS (Multimedia Cable Network System). DOCSIS attribue les débits copartagés montants et descendants disponibles sur les coaxiaux selon les services et les signalisations nécessaires. De tels réseaux

diffusent des programmes télévisuels analogiques, des programmes de radiodiffusion en modulation de fréquence ainsi que des applications interactives (télévision numérique à péage ou par abonnement, téléphonie publique, accès à Internet, etc.). La technique des réseaux câblés est très diffusée en Amérique du Nord et les normes propriétaires y sont très nombreuses. En Europe du Nord, un certain nombre de réseaux câblés ont été édifiés, dont celui de "Numéricable" en France.

La distribution télévisuelle sur réseau HFC était concurrencée par le développement de l'ADSL. De plus, la réhabilitation des réseaux HFC anciens est longue et coûteuse. Cependant, le redéploiement des réseaux HFC est possible en zone urbaine pour réaliser du FTTB (Fibre To The Building), la fibre s'arrêtant au pied de l'immeuble est prolongée par un câble coaxial jusqu'à l'appartement de l'abonné (solution adoptée par Numéricable). DOCSIS 3.0 se rapproche ainsi des performances du GPON avec 2,5Gbit/s au pied de l'immeuble et des débits théoriquement symétriques atteignant quelques centaines de Mbit/s chez l'utilisateur en point-à-point. Numéricable a annoncé pouvoir desservir ainsi, sur un réseau rénové, près de 10 millions d'utilisateurs (soit 40 % des foyers français) dans 1200 communes à la fin 2009.

1.1.4. Le marché du haut débit en France

Le marché de détail du haut débit n'est pas régulé mais son dynamisme est lié aux effets de la régulation sur le marché de gros et notamment à la mise en œuvre du dégroupage par l'ARCEP[1] depuis 2002.
En 2008, le marché de détail du haut débit est resté dynamique avec une croissance de 14% sur l'année (+ 2,175 millions d'abonnés). Au 31 décembre 2008, la France comptait environ 17,725 millions d'accès haut débit, dont 16,825 millions par DSL et près de 900000 par câble. La technologie DSL reste ainsi prépondérante avec 95% des accès haut débit.
Le succès du DSL s'explique par un taux de couverture du territoire important correspondant à plus de 98% de la population fin 2008, contre environ 40% pour le câble. Une autre raison de ce succès est liée au fort dynamisme du développement de la concurrence sur le DSL, grâce au dégroupage de la boucle locale.

Une consolidation du marché du haut débit

La typologie des acteurs présents dans les communications haut débit a évolué au cours des dernières années.
Depuis 2005, le secteur de l'Internet haut débit fait l'objet d'un important mouvement de consolidation, caractérisé par des rachats et des fusions-acquisitions entre opérateurs concurrents de France Télécom; Cette tendance s'est confirmée en 2008 avec l'acquisition d'Alice par Iliad (Free). Par ailleurs, SFR a absorbé Neuf Cegetel et l'ensemble des offres résidentielles haut débit du groupe, Neuf Cegetel, SFR et Tele2 France sont désormais commercialisées sous la marque unique SFR.
Le secteur du câble a connu un phénomène analogue. Depuis juillet 2006, la holding Ypso (détenue par Cinven, Altice et Carlyle) concentre sous la marque Numericable la quasi-intégralité des réseaux câblés en France (ex-UPC, ex-Noos, ex-France Télécom câble, ex-NC Numericable).

[1] L'ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes) assure un rôle important pour les opérateurs de télécommunications. Cet organisme prend en charge principalement : l'analyse des marchés et les obligations, la délivrance des autorisations sur les activités qui s'ouvrent à la concurrence, l'attribution et la gestion des ressources rares, le contrôle comptable et tarifaire du prestataire du service universel, le règlement des litiges entre les opérateurs. L'ARCEP apporte ainsi une régulation de la concurrence au service du consommateur et peut également disposer d'un pouvoir de sanction sur les opérateurs.

Parallèlement, les opérateurs mobiles ont poursuivi leur entrée sur le marché du haut débit. L'accord de la Commission européenne au rachat des activités de téléphonie fixe et d'accès à Internet de Tele2 France par SFR a permis à l'opérateur mobile de proposer des offres de convergence. Par ailleurs, Bouygues Télécom a négocié avec Neuf Cegetel le rachat d'une partie des infrastructures de T-Online France, assorti d'une offre de gros commerciale. Le troisième opérateur mobile français a ainsi lancé la commercialisation d'offres de convergence fixe-mobile grand public en octobre 2008, avec pour la première fois des forfaits d'appels fixe vers mobile inclus dans le forfait de communications téléphoniques associé l'abonnement haut débit.

Le succès des offres multiservices

Depuis quelques années, les offres multiservices (ou Triple Play) sont devenues le standard du marché de l'Internet haut débit. Les FAI proposent quasi systématiquement un bouquet de services incluant :

- l'accès à Internet au meilleur débit disponible, notamment grâce à l'ADSL2+ (25Mb/s).
- la téléphonie sur large bande (VoIP), permettant au client de s'affranchir de l'abonnement téléphonique auprès de France Télécom et d'avoir accès gratuitement à plus de 80 destinations internationales.
- l'accès à des services audiovisuels (chaînes de télévision et vidéo à la demande- VoD).

Aujourd'hui, environ 50% des foyers français peuvent accéder à des services audiovisuels par le haut débit, essentiellement via une connexion ADSL. La longueur de la paire de cuivre permet à deux tiers des foyers de recevoir la télévision par ADSL, mais l'offre reste limitée aux zones dégroupées.

Depuis 2007, de nouveaux services sont venus compléter ces offres Triple Play :

- les services de téléchargement légal illimité de fichiers musicaux, comme l'offre de Neuf Cegetel qui s'est associé à Universal pour proposer un catalogue de titres, ou celle d'Alice en partenariat avec EMI.
- les premières offres de convergence fixe-mobile, associant généralement un abonnement mobile et un abonnement haut débit comme par exemple les offres "Unik" d'Orange, "Twin" de Neuf Cegetel ou encore "Home Zone" de SFR.
- d'autres opérateurs – Free, Numericable et Bouygues Télécom – ont également annoncé leur intention de proposer de telles offres.

Le nombre d'abonnements à un service de télévision par ADSL poursuit sa progression. Ce moyen de diffusion est aujourd'hui le principal vecteur de croissance de la télévision payante et la possibilité de disposer d'une offre haut débit incluant une offre de TV par ADSL constitue un critère d'achat important pour les abonnés éligibles.
Dans ce contexte, France Télécom a lancé une offre de télévision par satellite lui permettant d'offrir une offre Triple-Play sur l'ensemble du territoire, la télévision étant diffusée soit par le réseau haut débit DSL, soit par satellite.

En outre, la vidéo à la demande s'est significativement développée avec la possibilité de regarder des programmes directement sur la télévision via une "box". Néanmoins, une évolution des modèles actuels de relations entre éditeurs de contenus et opérateurs de réseaux paraît nécessaire pour favoriser le développement du très haut débit, au bénéfice de tous les acteurs et en particulier des consommateurs.

1.2. Le réseau d'accès fibre : FTTx

En France quasiment 100% des foyers français sont raccordables en ADSL à 512kb/s. Par contre, même si l'ADSL 2+ peut délivrer 15Mb/s, l'ADSL quad 30Mb/s, le VDSL 50Mb/s et le VDSL2+ prochainement 100Mb/s, les distances de transmission à ces débits demeurent très faibles.
Pour avoir 100Mb/s par les paires de cuivre, il faudra être très proche du DSLAM (150 ou 200 mètres) ce qui est problématique pour raccorder tous les clients à ce débit.
De plus le réseau cuivre, de plus en plus vieillissant, sollicite des coûts importants de maintenance et reste limité en débit, il est donc nécessaire de trouver des alternatives pour le transport des données.
La Figure 5 permet d'avoir une rapide observation des performances de transmission sur cuivre, en termes de portée et de débit possible. Cela permet de montrer l'intérêt de l'utilisation d'une solution alternative qui permettra la montée en débit pour tous les utilisateurs.

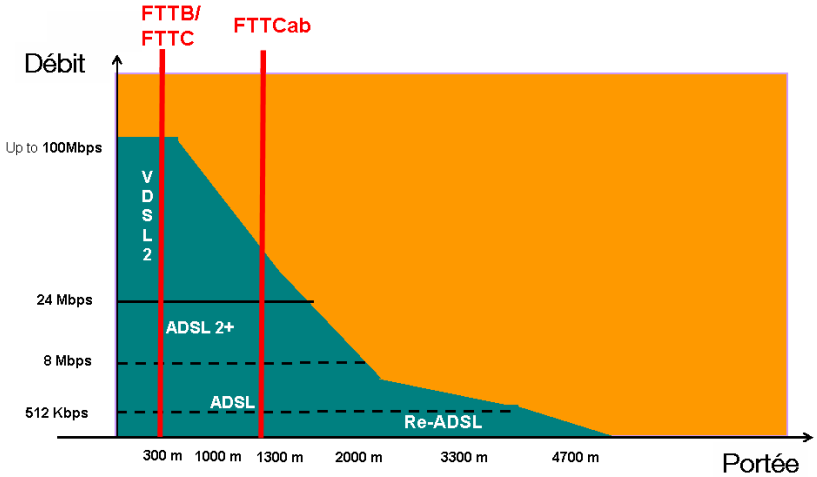
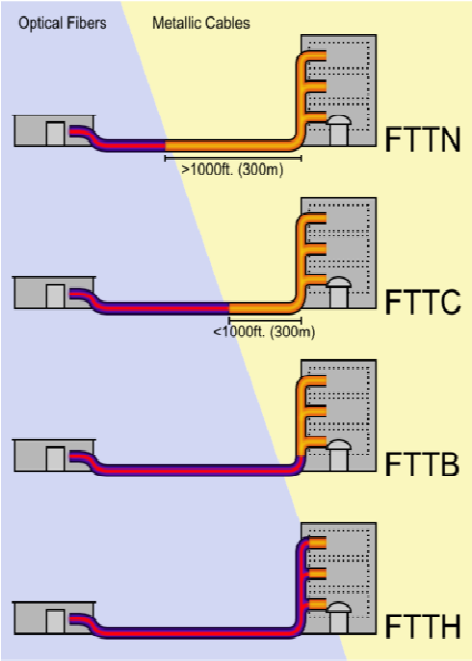


Figure 5 : Débit possible selon la technologie et la portée

L'avènement de la technologie Ethernet dans les réseaux d'accès depuis 2002 a permis le déploiement à grande échelle de raccordements optiques résidentiels à 10, 50 où 100Mb/s (FTTx, Fibre To The x = Home, Building, etc) par des opérateurs asiatiques.

Etant donné que l'affaiblissement linéique de la fibre est moins important que celui du cuivre à très haut débit, une solution est d'amener la fibre plus près du client et donc d'ajouter un équipement actif tel qu'un mini DSLAM entre le NRA et le client. Cela consiste à faire du FTT-Cab/Curb si on amène la fibre jusqu'au Sous-Répartiteur (SR) et du FTT-Building si le mini-DSLAM se trouve en pied d'immeuble. Un inconvénient du FTTC est la nécessité de nouvelles sources d'alimentation électrique dans les sous répartiteurs. En pied d'immeuble, le problème de l'alimentation ne se pose pas car des sources d'énergie électrique y sont déjà présentes.
Une autre solution envisageable pour offrir 100Mb/s à chaque client, voire plus, est de déployer la fibre jusqu'à la maison (FTTH), donc des réseaux d'accès tout optique. Cette technique ne nécessite plus d'équipement actif entre le NRA et le client, mais des composants optoélectroniques chez le client, qui verra arriver la fibre dans son appartement ou sa maison.
Enfin, selon la démographie et les équipements des zones à couvrir, on peut distinguer de multiples répartitions de la fibre et du cuivre dans l'accès, donnant nom aux divers FTTx tels qu'ils sont présentés sur la Figure 6.



FTTN : Fibre To The Neighbourhood (Fibre jusqu'au quartier)
FTTC : Fibre To The Curb (Fibre jusqu'au trottoir)
FTTN : Fibre To The Node (Fibre jusqu'au répartiteur)
FTTB : Fibre To The Building (Fibre jusqu'au bâtiment)
FTTC : Fibre To The Cab (Fibre jusqu'au sous-répartiteur)
FTTP : Fibre To The Premises (Fibre jusqu'aux locaux - entreprises)
FTTH : Fibre To The Home (Fibre jusqu'au domicile)
FTTO : Fibre To The Office (Fibre jusqu'au bureau - entreprises)
FTTLA : Fibre To The Last Amplifier (Fibre jusqu'au dernier amplificateur)

Figure 6 : Notations FTTx

1.2.1. Etat du déploiement mondial

En fin 2008, selon l'IDATE*, le marché FTTx global (incluant les architectures FTTH/B, VDSL, FTTLA et FTTX+LAN) représentait un total de 48 millions d'abonnés. Le FTTH et FTTB restent les architectures dominantes en raccordant plus de 61% des abonnés connectés via la fibre. Ces architectures, et plus particulièrement celles basées sur le FFTB, sont en effet les plus économiques et les mieux adaptées pour permettre aux opérateurs d'augmenter leur bande passante dans la plupart des pays et notamment en Asie (zones particulièrement denses) mais également dans de nombreux pays émergeants.

En effet, FTTH et FTTB sont les architectures dominantes et connaissent surtout une croissance rapide. A la fin 2008, on comptait ainsi plus de 8 millions de nouveaux abonnés (+39% sur les 12 derniers mois) ce qui a permis de dépasser les 29 millions d'abonnés FTTH/B au niveau mondial.

La majorité du marché FTTH/B est située dans la zone Asie-Pacifique et on observe une accélération de la croissance en nombre d'abonnés, en particulier en Chine. La zone Asie-Pacifique reste ainsi le principal contributeur avec près de 5 millions de nouveaux abonnés en une seule année. La concentration la plus importante d'abonnés FTTH/B est localisée en Asie (et plus particulièrement au Japon et en Corée du Sud) avec près des quatre cinquième de l'ensemble des abonnés FTTH/B à fin 2008. Le nombre d'abonnés FTTH/B en Asie-Pacifique est ainsi passé de 17.9 millions à plus de 22.7 millions entre décembre 2007 et décembre 2008.

* L'IDATE assure par l'intermédiaire du FTTx Watch Service, une mission spécifiquement conçue pour fournir aux opérateurs, fournisseurs, organismes gouvernementaux, régulateurs et autorités locales une analyse complète des problèmes qui affectent ce marché prometteur du FTTx. Grâce à une base de données mondiale des projets FTTx, elle produit des rapports chiffrés des états de déploiements, des évolutions et des acteurs de cette technologie.

Le marché nord américain est principalement animé par les Etats-Unis avec 5 millions d'abonnés à la fin 2008, dénombrant une progression de 1,9 million de nouveaux abonnés au FTTH/B en une seule année. Les Etats-Unis s'imposent ainsi comme le marché FTTH/B à la plus forte croissance et comptabilise 16% des abonnés au niveau mondial, ce qui le classe en troisième position derrière le Japon et la Corée du Sud.

Bien que loin derrière les marchés asiatique et nord américain, le marché d'Europe de l'Ouest semble en pleine accélération. En fin 2008, il pesait 5% du marché FTTH/B mondial avec plus de 1.5 million d'abonnés, à rapporter au million d'abonnés de fin 2007 (une croissance de +60% en un an). Cependant, le marché est caractérisé par de fortes disparités puisque 6 pays totalisent à eux seuls 81% de la base d'abonnés de la zone : Suède, Italie, Norvège, France, Danemark et Pays-Bas. Pour l'Europe de l'Est, c'est la Russie qui fait figure de marché en fort développement avec 630 000 abonnés FTTB et 6.3 millions de foyers raccordables à la fin 2008.

Au niveau mondial, le nombre de ports FTTx installés est estimé à 83.3 millions en fin 2008. A mi-2009, le marché des systèmes FTTx est dominé par des équipementiers originaires d'Asie : ZTE a pris le leadership suivi par Huawei en seconde position et par le constructeur japonais Mitsubishi à la troisième place.

L'accès très haut débit (FTTH/B et VDSL5 ensemble) devrait connaître une croissance continue durant les prochaines années, pour atteindre les 140 millions d'abonnés au niveau mondial en 2014. Bien sur, les taux de progression resteront très différents en fonction des pays dans la mesure où chaque marché national restera marqué par ses propres spécificités et par les dynamiques des acteurs en présence.

1.2.2. Déploiement en France

France Télécom a débuté sa propre expérience pilote de "fibre jusqu'au domicile" FTTH dans la capitale et les Hauts-de-Seine, tous deux prêts à s'engager dans l'aventure. A la date du 25 juillet 2006, l'opérateur déclarait avoir raccordé une centaine de foyers répartis entre les 3, 4, 6, 7, 13 et 16ème arrondissements de Paris et dans 5 villes des Hauts-de-Seine : Asnières, Boulogne, Issy-les-Moulineaux, Rueil-Malmaison et Villeneuve-la-Garenne.
Pour mener à bien ce test, France Télécom a déployé 100 kilomètres de fibre optique depuis ses équipements jusqu'aux appartements et pavillons des foyers concernés. Dans la région parisienne, l'architecture du réseau retenue par France Telecom est du type point-à-multipoint, ou GPON (Gigabit Passive Optical Network, réseau optique passif). Celle-ci permet d'atteindre jusqu'à 2,5 Gb/s en débit descendant et 1,25 Gb/s en débit remontant en fonction du taux d'occupation du réseau.
L'offre "triple play" associée (Net/Tel/TV sur IP), dans le cadre de ce pilote, était facturée 70€ TTC/mois avec 2 mois d'abonnement offerts. Par ailleurs, l'installation des équipements à domicile et la mise en service de l'offre étaient incluses. Par comparaison, l'offre 'Max VDSL' d'Erenis, 60Mb/s en flux descendant et 6Mb/s montant, complétée de la téléphonie filaire, était elle aussi facturée 70€ TTC/mois. Quant au 'PackPremium' de Cité Fibre (20Mb/s symétriques sur l'Internet à domicile, téléphonie illimitée, bouquet de chaînes numériques, VOD), il coûtait 59€ TTC/mois.
En résumé, l'offre 'fibre' pilote de France Télécom coûtait plus du double d'une offre 'triple play' par ADSL de France Telecom (35€ TCC/mois pour Internet "18 mégamax" et TV incluse). Elle s'adressait, par conséquent, à une clientèle restreinte prête à expérimenter de nouveaux usages : télévision HD (flux de 12Mbit/s), télévision interactive, visioconférence, jeux, nouveaux modes de partage des contenus numériques, etc.

Par ailleurs, le FAI Free a annoncé le 11 septembre 2006 qu'une offre de FTTH, à 50Mb/s au minimum, serait développée dès le premier semestre 2007. Ce déploiement concernait dans un premier temps l'ensemble de la ville de Paris, en commençant par le 15ème arrondissement, puis la petite couronne et le reste de la France dans les secteurs où la société compte au moins 15% d'abonnés.
Grâce aux rachats successifs de Mediafibre (à Pau) et Erenis (à Paris), Neuf a lancé en avril 2007, la fibre optique dans 55 000 logements à Paris et 44 000 foyers à Pau.
À la différence des expérimentations effectuées par France Télécom dans la région parisienne, l'architecture déployée par Free est celle d'un réseau point-à-point c'est-à-dire de l'Ethernet Pair à Pair (Peer-to-Peer), ou Ethernet par fibre directe (Ethernet direct fiber). C'est notamment cette architecture qui permettra de le dégrouper pour y donner accès à des opérateurs tiers.
À Paris, le déploiement du réseau de chacun des opérateurs devrait se faire par un passage quasi systématique dans les égouts de Paris. Ce déploiement a été grandement facilité par le plan Paris Ville Numérique, lancé à l'initiative de la municipalité, et qui prévoit notamment une réduction de 90% de la redevance d'utilisation des égouts de la ville.
Parallèlement, Numéricable Noos déploie progressivement son réseau FTTB dans toutes les villes desservies par les réseaux câblés en coaxial.
Le 15 décembre 2006, réagissant à l'annonce de Free, France Telecom a indiqué vouloir investir 270 millions d'euros dans le FTTH sur 2 ans. L'offre d'accès internet par la fibre est alors disponible à Paris depuis mars 2007 et depuis juin 2007 dans plusieurs villes : Lyon, Lille, Marseille, Poitiers, Toulouse avec pour cible 150 000 à 200 000 clients en fin 2008.
L'offre actuelle propose une connexion à 100Mbit/s descendant et 10Mbit/s montant pour 45€ par mois (option 100Mbit/s symétrique pour 65€).

Au total, l'ARCEP estime que 3 à 4,5 millions de foyers se situent à proximité d'un réseau en fibre optique au 31 décembre 2008.
L'équipement des immeubles en fibre optique est en cours. Le nombre total d'immeubles équipés en fibre optique et raccordés au réseau d'au moins un opérateur s'élève à 20 500 au 31 décembre 2008. 550 000 foyers se situent dans ces immeubles et sont éligibles aux offres très haut débit en fibre optique jusqu'aux abonnés.
Le nombre d'abonnements à un service très haut débit est encore limité. Au 31 décembre 2008, le nombre total d'abonnements très haut débit, tous opérateurs et toutes technologies confondus, s'élève à plus de 170 000, parmi lesquels :

- environ 40 000 abonnés aux offres très haut débit en fibre optique jusqu'aux abonnés;
- environ 130 000 abonnés aux offres très haut débit en fibre optique avec terminaison en câble coaxial.

Afin d'éviter la constitution de monopoles locaux au niveau de chaque immeuble, il est nécessaire que les opérateurs mutualisent la partie terminale de leurs réseaux fibre optique. C'est-à-dire que le premier opérateur qui installe la fibre optique dans un immeuble, donne accès à son réseau aux autres opérateurs dans des conditions permettant une concurrence effective, afin que ceux-ci puissent également desservir les habitants concernés. L'accès aux immeubles est aujourd'hui le principal obstacle aux déploiements, et il concerne tous les opérateurs.
La mutualisation se limite principalement aux immeubles fibrés situés dans les zones d'expérimentation. Les travaux d'expérimentation et d'évaluation de la mutualisation menés au cours des trois derniers mois par les opérateurs sous l'égide de l'ARCEP concernent à ce jour une vingtaine de sites et recouvrent environ 2 000 foyers.
Au 31 décembre 2008, le nombre d'abonnements très haut débit pour lesquels le fournisseur de services accède au réseau d'un opérateur tiers dans le cadre de la mutualisation, demeurait inférieur à 25, sur une centaine de foyers situés dans des immeubles équipés en fibre optique et raccordés par au moins deux opérateurs.

En Novembre 2009, environ 50000 clients français sont connectés au FTTx pour un potentiel de 650000 connectables. A l'avenir une forte croissance est envisageable, soutenue par l'état. Le Premier ministre a souhaité que "l'investissement public" soit " complémentaire de l'initiative privée". La Caisse des Dépôts et Consignations était chargée en Septembre 2009 de mobiliser 750 millions d'euros de fonds propres pour accélérer le déploiement de la fibre optique dans les zones peu peuplées. [3]

Au 18 Janvier 2010, le Premier Ministre a annoncé un plan d'aide au déploiement du très haut débit pour tous, à hauteur de 2 milliards d'euros provenant du grand emprunt, sur une durée de 5 à 10 ans. Sachant que le déploiement de la fibre optique dans les grandes villes, soit 5.16 millions de foyers, sera financé par les opérateurs de télécommunication eux-mêmes, le programme concerne les zones moins denses en population, ce qui représente un peu plus de 20 millions de foyers. [4]

1.2.3. Architectures du réseau d'accès optique*

Techniquement, on dénote plusieurs topologies de réseau d'accès optique [5] :

- L'architecture point-à-point qui est celle choisie en France par l'opérateur Free qui vise un déploiement dans les zones très denses.
- L'architecture point-à-multipoint TDM (Time Division Multiplexing) choisie par les opérateurs France Telecom, Neuf Cegetel pour son avantage économique.
- L'architecture WDM (Wavelength Division Multiplexing) qui est un cas particulier du point-à-multipoint basé uniquement sur un multiplexage en longueur d'onde.

1.2.3.1. L'architecture Point-à-Point

Le point-à-point est l'architecture la plus simple à mettre en œuvre parmi les topologies physiques du réseau d'accès optique. Elle consiste à avoir un lien physique en fibre optique directement entre le central et l'abonné (généralement bi-fibre).

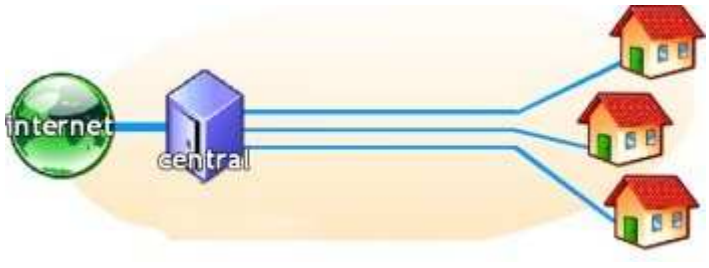


Figure 7 : Architecture Point-à-Point optique [6]

Une telle architecture offre plusieurs avantages, tout d'abord, parce qu'elle est aussi bien adaptée pour les clients résidentiels que pour les entreprises. Ensuite, dans une structure point-à-point, il n'y a pas de composant optique entre l'OLT et l'ONT. Par conséquent, le budget optique est traduit par une distance de transmission pouvant atteindre 100km sans amplification pour des débits jusqu'à 10Gbit/s. De plus, la gestion du réseau est simplifiée. En revanche, cela implique

* Compte-tenu du fait que ces statuts n'ont pas évolué depuis 3ans, une partie de ce paragraphe est extraite de mon rapport de stage de master [**], publié à l'ENSSAT en 2007. Le paragraphe 1.2.4 est en partie extrait de la thèse de Zineb Belfqih [62] publiée en 2008.

une absence de mutualisation de la fibre et une multiplication du nombre des interfaces optoélectroniques. Il en résulte un coût très élevé de déploiement d'un tel réseau.

1.2.3.2. Point-à-Multipoint passif : PON

Le PON (Passive Optical Network) représente une solution Point-à-Multipoint optique permettant de mutualiser une partie de l'infrastructure entre plusieurs clients. L'élément clé de l'architecture est un coupleur optique passif 1 vers N qui divise la puissance optique vers autant de ports de sortie.
La norme ITU-T définissant le GPON (Giga PON) est la série G.984.x [7]. Le GPON utilise un multiplexage temporel (TDM) pour 32 ou 64 (voire 128 utilisateurs) qui se partagent un débit de 2.5Gbit/s pour le sens descendant et 1.25Gbit/s pour le sens montant.
Le multiplexage temporel alloue des périodes, dans une trame, pour chaque client. Chaque ONU chez l'utilisateur reçoit toutes les informations mais n'est autorisé à lire que les données qui lui sont destinées. Dans le sens montant, chaque client a un intervalle de temps bien précis pour émettre afin de ne pas interférer avec un autre client.
Une composante WDM est déjà présente dans les PON TDM de la norme G.984.2 puisque le signal descendant est à 1.49 µm et le signal montant à 1.31 µm.

La Figure 8 représente une liaison unidirectionnelle où une fibre est dédiée pour le sens montant et une autre pour le sens descendant.

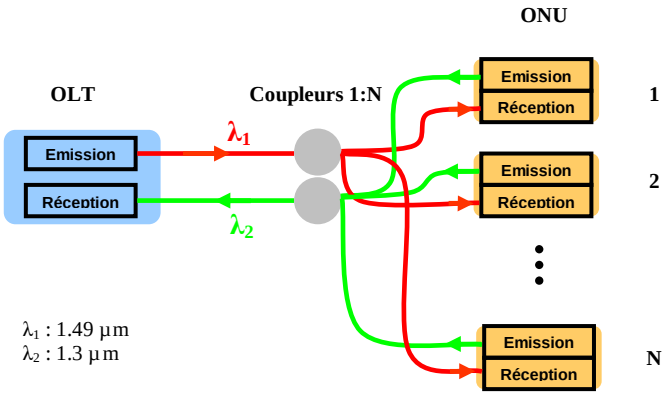


Figure 8 : Architecture PON unidirectionnelle

Pour simplifier le réseau, économiser de la fibre et limiter les points de raccordements, une liaison bidirectionnelle peut être utilisée. L'utilisation d'un duplexeur est alors nécessaire (Figure 9). Il peut s'agir d'un coupleur, d'un circulateur ou d'un multiplexeur en longueur d'onde. Ce dernier, noté (MUX/DMUX) est celui qui est généralement utilisé et intégré aux modules d'émission et de réception.

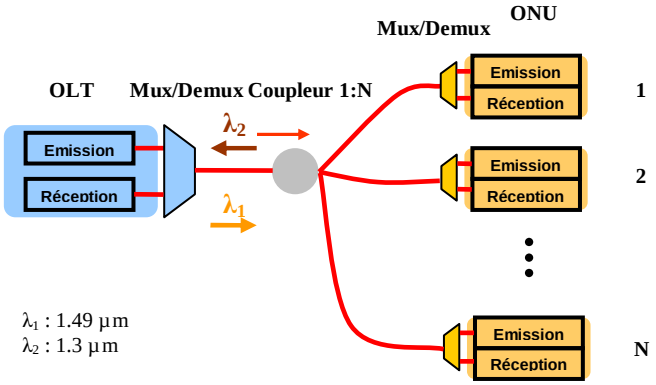


Figure 9 : Architecture PON bidirectionnelle

Le GPON illustrant cette architecture PON bidirectionnelle sera détaillé plus tard dans ce manuscrit.

1.2.3.3. PON avec multiplexage en longueur d'onde (WDM)

L'introduction du multiplexage en longueur d'onde "WDM" est d'abord la réponse à une augmentation des débits et du taux de partage dans le réseau d'accès. Le WDM est une solution qui permet le partage du réseau en utilisant la longueur d'onde comme composante de multiplexage. En effet, la limite en débit imposée par le TDM peut être évitée en introduisant le WDM et en affectant, par exemple, une longueur d'onde par utilisateur avec un accès statique ou dynamique, ce qui revient à faire du point-à-point en longueur d'onde. Nous cumulons ainsi les avantages et inconvénients du point-à-point et de la mutualisation de la fibre afin que le WDM offre le plus haut débit possible par ONT. Il est possible de combiner les méthodes de multiplexage TDM et WDM. On parle alors de multiplexage hybride qui a beaucoup d'intérêt dans le réseau d'accès optique et que l'on va étudier par la suite dans le cadre de la Nouvelle Génération de PON (NGPON).
Un multiplexage optique par longueur d'onde est possible à plusieurs degrés : CWDM pour Coarse WDM ($\Delta\lambda$ de 20nm) ou encore DWDM pour Dense WDM ($\Delta\lambda$ de 0.8nm). Le but étant d'allouer une longueur d'onde par client. Dans l'accès optique, des taux de multiplexage de 20 à 100 sont possibles et des travaux de recherche sont menés sur de l'Ultra Dense WDM ($\Delta\lambda$ de 0.2nm).

En termes d'architecture, il existe principalement deux techniques de PON WDM, l'une utilisant un coupleur comme composant de répartition, il s'agit alors du "broadcast and select", l'autre utilisant un multiplexeur et faisant appel à du démultiplexage spatial.

Architecture PON WDM "broadcast and select"

Dans ce type d'architecture, nous remarquons la présence du même élément principal que dans un PON TDM, c'est-à-dire le coupleur passif achromatique qui va diffuser les longueurs d'onde vers tous les ONU ("broadcast"). Chaque abonné reçoit toutes les longueurs d'onde mais un filtre optique différent chez chaque client (ou un filtre optique accordable) permet de sélectionner la longueur d'onde qui lui est attribuée ("select"). Il existe une configuration unidirectionnelle avec deux fibres, une pour chacune des voies montante et descendante.

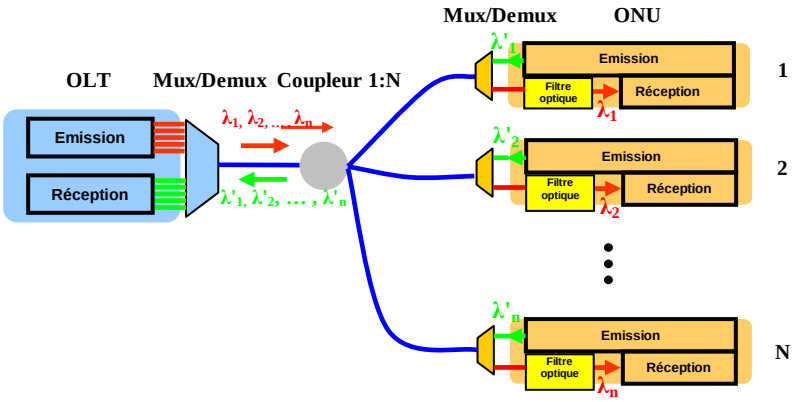


Figure 10 : Architecture PON WDM bidirectionnelle "broadcast and select"

Architecture PON WDM avec démultiplexage des longueurs d'onde

Le composant qui effectue la répartition des flux descendants n'est pas un coupleur mais un démultiplexeur qui va orienter chaque longueur d'onde vers son destinataire.

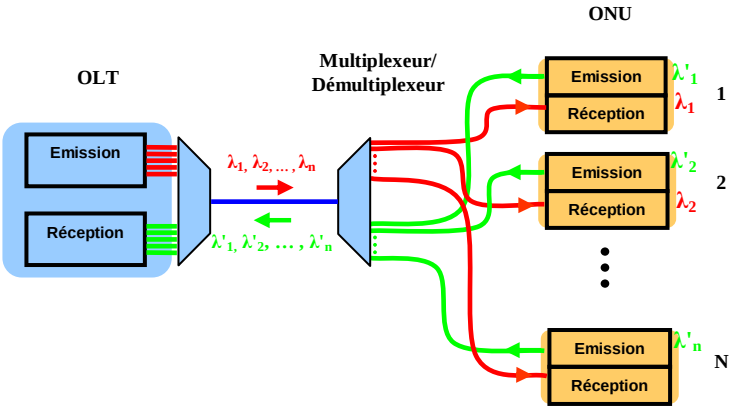


Figure 11 : Architecture PON WDM bidirectionnelle avec aiguillage en longueur d'onde

Cette structure permet d'atteindre un maximum d'efficacité en bande passante par client. De plus, les pertes optiques du multiplexeur sont indépendantes du nombre de ports de sortie. Toutefois, le prix du multiplexeur / démultiplexeur reste très élevé pour l'instant.

1.2.4. Eléments Actifs optiques

Plusieurs éléments actifs optiques entrent en jeu dans les architectures présentées précédemment. Une description succincte des émetteurs et des récepteurs les plus couramment utilisés dans les réseaux de télécommunication est réalisée dans ce paragraphe.

1.2.4.1. Les sources laser

LASER est l'acronyme de "Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation".

Les diodes lasers sont des composants primordiaux de l'optoélectronique d'aujourd'hui. Elles ont connu un développement important durant les deux dernières décennies et cela grâce au développement des techniques d'épitaxie. Elles ont bénéficié du développement des télécommunications par fibre optiques et de l'émergence de l'interconnexion optique.

Pour le réseau d'accès optique, des lasers Fabry-Perot ou DFB (Distributed Feed Back) sont majoritairement choisis. Voici une description succincte de ces technologies :

Laser Fabry-Perot (FP)

Il s'agit d'une structure laser comportant un guide amplificateur dans un résonateur. La réalisation pratique d'un résonateur de Fabry-Pérot est relativement simple dans le cas de diodes à semi-conducteurs. En effet, l'indice de réfraction des semi-conducteurs est très élevé par rapport à l'indice de l'air. La différence d'indice entre un semi-conducteur et l'air implique une réflexion partielle d'environ 40% de tout faisceau perpendiculaire. Ainsi la surface du semi-conducteur constitue un miroir semi-transparent naturel.
Les diodes lasers Fabry-Pérot émettent sur plusieurs raies et le taux de suppression des modes latéraux (Side Mode Suppression Ratio : SMSR) ne dépasse pas 20dB. Ceci limite la bande

passante en transmission. Concernant la dérive en température, les diodes Fabry-Pérot sont très instables (0.5nm/°C), et utilisées pour des applications supportant des spectres larges et des dérives en longueur d'onde élevées.
De nombreuses études ont été entreprises pour tenter d'améliorer la stabilité de ces diodes et diminuer l'élargissement du spectre lors de la modulation [8-9] ou lors des dérives thermiques pour pouvoir augmenter la portée d'émission par réduction des effets de la dispersion chromatique* et du bruit de partition de mode. Les solutions proposées nécessitaient des montages très difficilement industrialisables ou étaient insuffisamment performantes.
En s'appuyant précisément sur la proportionnalité de la puissance optique émise avec la puissance de l'émission spontanée de même fréquence, est rapidement apparue l'idée d'injecter dans la cavité, une puissance optique sur une raie stable pour faire émettre au laser cette même raie (lasers à injection). Cela permet au second laser un fonctionnement quasi-monomodal sur la raie principale du laser maître, tout en autorisant une modulation à 500MHz ou plus (1GHz) [10]. Cette technique "injection locking" a été proposée par des équipes coréennes pour les applications bas coût pour l'accès WDM-PON en 2002 [11]. C'est pratiquement la seule technique qui a véritablement permis de réduire très efficacement l'élargissement spectral dynamique.

Lasers à contre réaction répartie (DFB)

Les lasers à contre réaction répartie permettent un fonctionnement sur une seule raie spectrale. Ce sont les lasers DFB pour Distributed FeedBack. Dans un laser DFB, la contre réaction optique n'est pas obtenue par la réflexion des faces du composant mais par l'intermédiaire d'un réseau de diffraction transverse qui induit un couplage contra-propagatif tout le long de la cavité.
La réalisation de ce réseau, gravé à la surface d'une couche déposée sur la couche active, permet une variation périodique de l'indice de réfraction effectif. Cette variation d'indice provoque une réflexion partielle de l'onde qui se propage à chaque discontinuité de l'indice. Ces réflexions partielles interfèrent de façon constructive si le déphasage induit entre deux discontinuités est un multiple de 2π. Il y a donc réflexion pour une longueur d'onde unique; celle qui correspond au pas ou à un multiple du pas du réseau de Bragg. Il y a donc sélectivité d'une seule longueur d'onde, d'où une émission monomodale.
Typiquement, la largeur de raie d'un laser DFB est inférieure à 1MHz (10^{-5}nm). De tels composants sont disponibles pour émettre à de nombreuses longueurs d'onde (au moins de 0,8µm à 2.8µm). La longueur d'onde du laser peut varier de quelques nanomètres. Cependant, des circuits de contrôle de température associés au DFB permettent de garantir une grande stabilité en longueur d'onde.
Des puissances atteignant 20dBm peuvent être obtenues pour ces dispositifs grâce à une parfaite maîtrise des procédés de gravure, de reprise d'épitaxie et d'optimisation des géométries de couplage.

1.2.4.2. Les récepteurs optiques

Les photo-détecteurs effectuent la transformation d'un flux de photons en signal électrique utilisable dans un circuit électronique. Pour les transmissions par fibre optique, les contraintes sont la faible puissance optique reçue et le faible diamètre du faisceau lumineux en sortie de la fibre. Il faut donc disposer de photo-détecteurs capables de détecter de faibles signaux, adaptés aux modes optiques en sortie de la fibre et qu'ils représentent des caractéristiques de rapidité

* La dispersion chromatique dans les fibres optiques limite la bande passante d'une transmission. Dans un milieu dispersif, chaque longueur d'onde se propage à une vitesse différente, d'où un élargissement temporel d'une impulsion lors de sa transmission. C'est pour cette raison, entre autres, qu'on utilise des diodes laser dont la largeur spectrale est faible.

compatibles avec les débits de transmission. De plus, il est essentiel que ces dispositifs soient peu couteux, fiables dans le temps et alimentés sous des tensions faibles. Les dispositifs retenus sont les photodiodes à base de semi-conducteurs. Dans les deux paragraphes qui suivent, nous allons rappeler brièvement le principe de fonctionnement des photodiodes PIN et APD.

Photodiodes PIN

Une photodiode PIN représente une jonction où un matériau extrinsèque positif est mis en contact avec un autre matériau extrinsèque négatif en intercalant une zone non dopée dite intrinsèque entre ces deux zones. L'intérêt de cette région intrinsèque est de pouvoir augmenter la largeur de la zone de charge d'espace afin d'augmenter la fréquence de coupure lors de la photo-détection ce qui permet leur utilisation pour des bandes passantes élevées. Cependant, les photo-détecteurs de type PIN sont naturellement limités en détectivité à une puissance reçue de l'ordre de -30dBm.

Photodiode APD

Une photodiode à avalanche, dite APD, est un dispositif de réception capable de multiplier de façon interne le courant obtenu par absorption photonique. Une APD permet de gagner en seuil de détectivité par rapport à une PIN. En revanche, l'amplification interne du courant contribue à l'augmentation du bruit et à la limitation de la bande passante.
Le principe de fonctionnement de ce type de photodiode repose sur l'augmentation du champ sous polarisation inverse afin de créer des paires électron-trou sous le mécanisme de multiplication par avalanche.
Dans le réseau d'accès optique, l'APD est majoritairement présente dans les transceivers car son coût est intéressant en production de masse.

1.2.4.3. Les transceivers SFF et SFP

Parmi les différents modules optoélectroniques développés pour les applications de réseaux d'accès, on trouve les modules SFP en version "prêt à brancher" dite "pluggable (Small Form factor Pluggable optical transceiver) et les SFF (Small Form Factor optical transceiver) à souder sur la carte support [12].

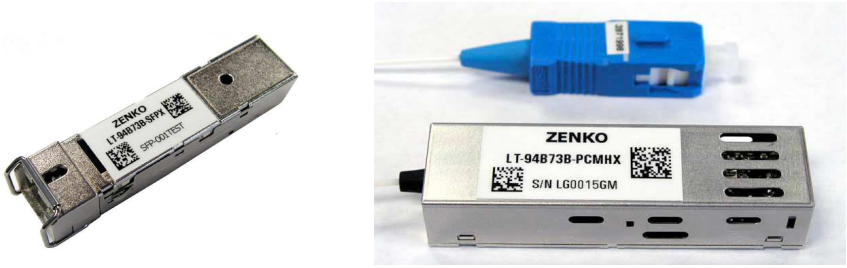


Figure 12 : Exemples de modules SFP et SFF fabriqués par Zenko Technologies

Il s'agit de modules combinant un émetteur et un récepteur et leurs systèmes électroniques, dans un support compact, de largeur 13.6mm, de longueur 50.1mm et de hauteur 9.6mm. L'appellation française de ce module est émetteur-récepteur mais la terminologie anglaise "transceiver" est également largement utilisée en France.
Ces transceivers peuvent être bi-fibres, dans ce cas, ils disposent d'une fibre pour le sens descendant et d'une autre pour le sens montant. Ainsi, l'émetteur et le récepteur sont connectés chacun sur une fibre différente.

On parle également de transceivers mono-fibre ou bidirectionnels lorsqu'une fonction de multiplexage/démultiplexage est intégrée au module d'émission-réceptions.
Ces modules intègrent alors au moins trois fonctions optoélectroniques dans le même boîtier :

- Le module d'émission
- Le module de réception
- La partie séparation de signaux montant et descendant pour les modules bidirectionnels

L'intérêt de ce type de module intégrant ces trois fonctions est d'offrir un coût de revient plus faible qu'avec l'utilisation de trois composants séparés.

2. Le réseau d'accès GPON

En Europe, Orange a fait le choix de la norme GPON Giga PON) pour ses déploiements en France (à Paris et dans douze villes de province) ou en Slovaquie. Les avantages sont ceux d'une architecture PON (coûts de déploiement par rapport au point-à-point…) ainsi qu'une efficacité supérieure et le support de différents services (par rapport à l'E-PON).
On définit la série G.984.x comme la norme issue de l'ITU-T spécifiant en détail le fonctionnement du GPON [13-15-16]. Deux systémiers majeurs fournissent les équipements GPON actuels à France Telecom : ALU (Alcatel-Lucent) et Huawei.

2.1. Eléments terminaux de l'architecture GPON

Le GPON est basé sur une architecture point-à-multipoint à base de multiplexage temporel. Il présente une architecture passive optique à base d'un coupleur de type de celle qui est schématisée ci-dessous. Le coupleur est achromatique pour permettre une transmission des longueurs d'ondes 1.3, 1.49 et 1.55 µm.

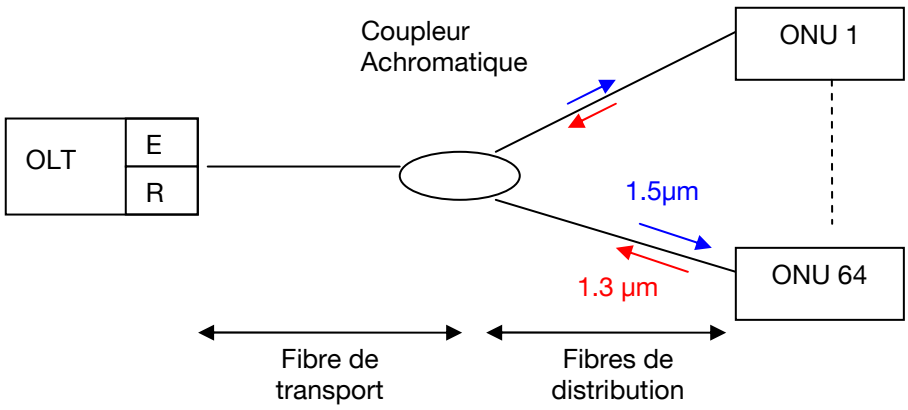


Figure 13 : Schématique simplifiée du GPON

2.1.1. OLT (Optical Line Termination)

L'OLT peut être considéré comme un DSLAM optique. Il est l'équipement maître d'accès optique pour des clients connectés au FTTx. Des services Triple Play (téléphonie, internet et vidéo) y sont distribués par l'intermédiaire d'un lien de collecte. Un gestionnaire propre à chaque fournisseur permet d'implémenter à chaque ONT son identification, sa position dans le réseau, la

déclaration des services qui lui sont attribués, leur priorité, etc. Ce gestionnaire permet également d'observer le fonctionnement du GPON par l'intermédiaire d'alarmes provenant de l'ONT.

Le transmetteur optique est actuellement constitué d'un module SFF dont l'émetteur est généralement un laser DFB. Un récepteur mode rafale plus généralement dit mode burst par abus d'anglicisme, intègre généralement une photodiode APD et un TIA (Amplificateur trans-impédance) qui permet d'adapter le seuil de décision de la photodiode en fonction des paquets de données reçues.
Les valeurs typiques d'émission et réception des modules à l'OLT et ONT doivent être conformes à la norme ITU-T G984.2. [13]

De manière générale, les OLT et ONT doivent respecter les normes du GPON, autant au niveau de la couche physique que de la couche protocolaire. On observe pourtant certaines différences selon les systémiers et plusieurs projets d'interopérabilité se chargent de rendre compatibles chaque marque entre elles.

Quelques différences sont déjà visibles sur les interfaces réseau des OLT ALU et Huawei, que nous allons décrire maintenant.

2.1.1.1. OLT ALU (Alcatel-Lucent)

L'accès à l'OLT Alcatel-Lucent se fait par l'intermédiaire du gestionnaire AMS connecté à la carte de gestion (ACU) intégrée au châssis de l'OLT.

Deux cartes de collecte (NTA et NTB) permettent de recevoir les services à partir d'un routeur ou directement d'une plateforme de services. Deux ports XFP à 10Gbit/s et 4 ports SFP à 1Gbit/s assurent le lien de collecte nécessaire sur cette carte. 16 cartes réseau fournissent ensuite la sortie optique vers l'architecture GPON, à raison de 2 ports optiques GPON par carte. Chaque port de sortie permet de desservir jusqu'à 64 ONU. Ainsi, 2048 clients sont gérés par châssis.

Figure 14 : Photographie d'un OLT GPON Alcatel-Lucent

2.1.1.2. OLT Huawei

L'accès à l'OLT Huawei se fait par l'intermédiaire du gestionnaire NBS2000 que l'on vient connecter aux deux cartes de gestion (ACU) intégrées au châssis. Deux cartes de collecte permettent de recevoir les services à partir d'un routeur ou directement d'une plateforme de services. Deux ports SFP à 1Gbit/s assurent le lien de collecte nécessaire sur chacune de ces deux cartes. Ensuite 16 cartes réseau fournissent la sortie optique vers l'architecture GPON, à raison de 4 ports GPON par carte. Chaque port de sortie permet de desservir jusqu'à 64 ONU. Ainsi, 4096 clients sont gérés par châssis.

Une future génération de carte GPON a été annoncée par Huawei. Elle prévoie une couche MAC permettant un nombre d'abonné de 128 et une connectique SFP pour les ports de sortie optiques de l'OLT afin que les émetteurs-récepteurs soient interchangeables.

2.1.2. ONT / ONU

L'ONT (Optical Network Termination) peut être considéré comme un modem optique auquel le client vient connecter sa passerelle d'accès au haut débit (Live Box, Neuf Box, etc). Il est l'élément terminal du réseau optique et un cas particulier de l'ONU pour une application FTTH. L'ONU (Optical Network Unit), quant à lui, désigne un élément générique terminal du réseau d'accès optique FTTx.

Les ONT ALU et Huawei ont tous deux une interface similaire. ALU se différencie en proposant deux ports de sortie Ethernet (RJ45).
Le tableau suivant présente les consommations électriques mesurées sur un ONT de chaque fournisseur.

		Conso Min (W)	Typ (W)	Conso Max (W)
ONT ALU	Modèle I020E-B			
	Seul	3,7	4,2	4,5
	fibre connectée	3,4	4	4,4
	Ethernet Connecté	3,8	**4,4**	4,6
ONT HUAWEI	Modèle HG810			
	Seul	1,8		2
	fibre connectée	2,3	2,6	2,7
	Ethernet Connecté	2,9	**3**	3,3

Tableau 3 : Consommation électrique des ONT Huawei et ALU

En termes de coût, le fait que l'ONT soit un module installé chez l'abonné, oblige les fournisseurs à garantir un élément bas coût. De ce fait, les technologies implémentées doivent respecter ces contraintes de coût. On a donc généralement, enfichés dans un module SFF, un émetteur optique à base de laser DFB ou Fabry Pérot, allié à un photorécepteur APD.

Des activités de recherche et développement sur les SFP et l'intégration des ONU ont permis aujourd'hui d'imaginer une future génération d'ONT qui serait totalement enfichable dans une passerelle réseau, à l'instar du port RJ45 ou d'une clé USB. [14]

2.2. Caractéristiques du GPON

2.2.1. Longueurs d'ondes

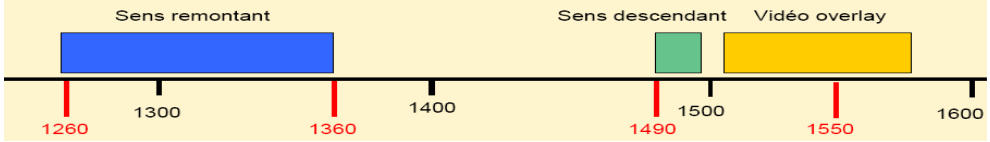


Figure 15 : Plan d'allocation des longueurs d'onde GPON

L'allocation des longueurs d'ondes du GPON, illustré en Figure 15 est définie dans la spécification ITU-T G.983.3.
Dans le cas où la vidéo est diffusé sur IP (Internet Protocol), une composante WDM est présente dans les PON puisque le signal descendant est à une longueur d'onde de 1.49µm et le signal montant à 1.3 µm. Le choix de ces longueurs d'onde est lié aux "fenêtres Telecom" qui permettent d'avoir une atténuation linéique faible (Section 2.4.1) : typiquement 0.31dB/km à 1.31µm et 0.25dB/km à 1.49µm pour une SMF28 (fibre monomode standardisée).
En y regardant plus en détail, les fenêtres Télécom sont choisies pour profiter des plus faibles atténuations de la fibre. Elles se découpent en plusieurs bandes dénommées comme suit :

Bande O : de 1.28 µm à 1.35 µm – λ montante GPON
Bande E : de 1.38 µm à 1.44 µm –
Bande S : de 1.47 µm à 1.525 µm – λ descendante GPON
Bande C : de 1.528 µm à 1.562 µm – λ WDM (Wavelength Division Multiplexing)
Bande L : de 1.569 µm à 1.603 µm – λ NGPON (Next Generation PON)

Concernant le GPON, il existe également une option avec un triplexeur en réception à l'ONT pour la diffusion de vidéo sur un canal analogique à 1.55 µm. Néanmoins cette option semble de plus en plus être abandonnée au profit de la vidéo sur IP, ce qui permet de supprimer les composants analogiques plus coûteux. En effet ce type de transmission nécessite une importante linéarité (puissance optique / fréquence) des composants optoélectroniques.

2.2.2. Multiplexage temporel

2.2.2.1. Transmission montante

Le partage des ressources dans le sens montant s'effectue par le TDMA (Time Division Multiple Access). Chaque client a un intervalle de temps bien précis pour émettre afin de ne pas interférer avec un autre client. Un récepteur en mode burst est nécessaire à l'OLT. Ce récepteur permet de récupérer et de synchroniser rapidement l'horloge avec les données venant d'utilisateurs situés à des distances différentes, donc avec des phases différentes. De plus le gain de l'amplificateur trans-impédance (TIA) qui suit la photodiode s'adapte en fonction de la puissance optique reçue, car celle-ci varie à chaque trame en fonction de la distance de l'utilisateur. Cela permet de modifier le seuil de décision et de récupérer correctement les données.

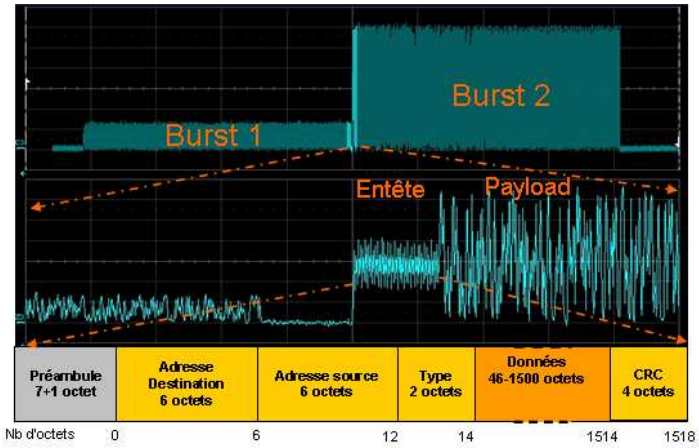


Figure 16 : Détails des paquets et de la trame montante

La trame montante est constituée de paquets et burst optiques d'une durée variable selon le client auquel ils sont associés. L'en-tête de ce paquet permet son identification à travers un flux au format standardisé typique (ici Ethernet 802.3) sur 1518 octets : préambule (7 octets + 1 octet pour le délimiteur), adresse destination (6 octets), adresse source (6 octets), type (2 octets), données (au moins 46 octets (le protocole rajoute du remplissage à la suite du paquet pour atteindre 46 octets au minimum), au plus 1500 octets), et CRC (Cyclic Redundancy Check : 4 octets). Cet en-tête est ensuite suivi de la charge (payload) qui contient les données à transporter.

2.2.2.2. Transmission descendante

Pour une transmission descendante, les données sont réparties dans les trames temporelles en fonction du client destinataire. Chaque ONU reçoit tout le flux d'informations car les données sont diffusées, mais la synchronisation et le codage lui permettent de récupérer uniquement les données qui lui sont destinées.

La trame descendante contient le « calendrier » de la trame remontante comme le montre la Figure 17.

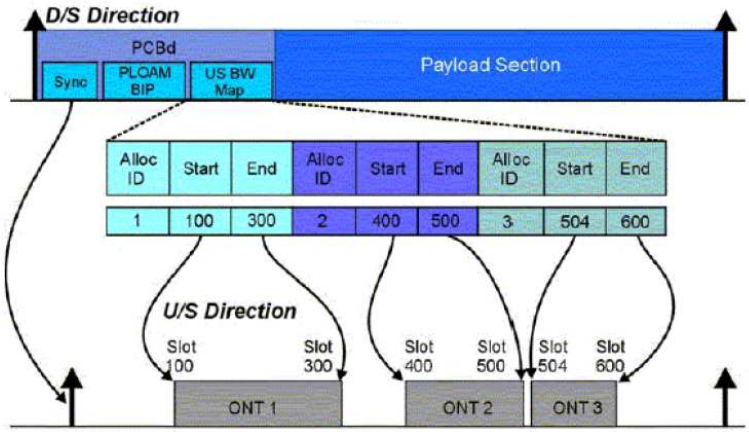


Figure 17 : Programme de la trame descendante

2.2.3. Débits et bande passante

Les trames GPON ainsi définies sont transmises à un débit de 2,5Gbit/s en descendant. Pour une transmission montante le débit effectif est de 1,25Gbit/s partagé entre les 64 clients dont la bande passante est gérée par un algorithme d'allocation de bande passante dynamique (DBA).

En effet, la répartition du débit entre les clients peut être fixe ou variable. Dans ce second cas un mécanisme d'allocation dynamique de bande passante (DBA) permet d'allouer pendant un instant un débit supérieur à un client parce que les autres utilisateurs à cet instant précis n'utilisent pas 100% des ressources. Ainsi la bande passante par client du FTTH définie commercialement à 100Mbit/s est souvent réduite en cas de pleine charge du PON.

2.3. Couche MAC et encapsulation

La couche MAC (Medium Access Control) [15]

Les mécanismes d'allocation dynamique de bande passante du GPON sont situés dans la couche MAC (Contrôle d'Accès au Medium), c'est-à-dire au niveau 2 du modèle OSI[5].
En général, le but d'une couche MAC est de permettre à tous les équipements d'émettre et de recevoir des informations par le médium de transmission, sans être perturbés par les autres équipements du réseau. Il s'agit donc de mettre en place un protocole d'accès à ce médium visant à répartir les ressources de transmission entre les différents hôtes.

La topologie du réseau ainsi que les besoins relatifs au support de services multiples rendent la couche MAC du GPON plus complexe que celle d'une technologie point-à-point.
Au niveau protocolaire, le GPON fonctionne de manière synchrone et centralisée. En sens descendant, l'OLT diffuse les trames vers tous les ONU et ceux-ci déchiffrent celles qui leur sont destinées. En sens montant, l'OLT alloue successivement des droits de parole (grants) aux ONU, pour chacun de leurs flux, de manière à éviter les collisions au niveau du coupleur. Il s'agit donc d'un TDMA dont les slots ont une taille variable.

2.3.1. La phase de Ranging

Il s'agit d'un calcul par l'OLT de la distance des différents ONU du PON. Un échange de trames permet de récupérer le délai de propagation aller-retour RTD (Round Trip Delay). Suite à cet échange, l'OLT transmet aux ONU un délai d'égalisation en temps. Le but est de recaler les émissions de tous les ONU sur celles de l'ONU le plus éloigné pour éviter les collisions dues aux différences de délai de propagation. Cette phase est indispensable au fonctionnement du GPON.

2.3.2. Mécanisme d'encapsulation des trames

Le multiplexage de trafic TDM (voix numérisée…) ou Ethernet peut être réalisé soit par ATM (cellules de 53 octets) soit par l'encapsulation GEM (GPON Encapsulation Method), protocole issu du Generic Framing Protocol.

> **GEM** (GPON Encapsulation Method) : format d'encapsulation de paquets de données (trames Ethernet ou trafic TDM) pour le transport dans un T-CONT. Il s'agit d'un complément à l'ATM. Les trames ont une taille variable (jusqu'à 4095 octets avec un en-tête de 5 octets), elles sont identifiées par un numéro de port (port-id) et peuvent être fragmentées.

[5] La couche « liaison de données » du modèle OSI gère les communications entre deux machines directement reliées entre elles par un support physique. Le modèle OSI était prévu pour des réseaux maillés et ne prévoyait donc pas le partage d'un même support physique entre plusieurs émetteurs. La couche MAC a donc été introduite dans les normes de l'IEEE (Ethernet…) pour permettre ce partage de medium. Elle occupe donc la partie supérieure du niveau 2 dans le modèle OSI.

Cette dernière solution permet de limiter le sur-débit dû aux en-têtes tout en offrant la fragmentation/réassemblage et un numéro de flux (port-id). La tendance actuelle est à la généralisation d'Ethernet au détriment d'ATM.

Transmission en sens descendant
Chaque trame de 125µs en sens descendant transporte une succession de trames GEM ainsi qu'un en-tête contenant diverses informations.
Le champ "US BW map" a une importance particulière car il contient les valeurs des intervalles de temps durant lesquels chaque ONU pourra émettre en sens montant.
Typiquement, chaque ONU devra prendre connaissance de ces informations pour planifier l'envoi de ses trames GEM dans la trame upstream correspondante. Le champ "US BW map" contient également des flags indiquant quels en-têtes chaque ONU devra ajouter aux transmissions de chacun de ses flux.

Transmission en sens montant
L'émission des données en upstream par les ONU est planifiée par l'OLT. Afin d'assurer différents niveaux de qualité de service par flux, la norme GPON a repris le concept de conteneur de trafic (T-CONT) introduit par le B-PON.

> **T-CONT** (Transmission Container) : Conteneur permettant de regrouper plusieurs flux. Un T-CONT est identifié par son Alloc-ID (entier de 12 bits) et associé à un contrat de trafic (CIR/PIR par exemple). L'allocation dynamique de bande passante se fait sur la base des T-CONT.

Un T-CONT permet de définir un flux ou un agrégat de flux en sens montant, le tout étant associé à un contrat de trafic (SLA). Un T-CONT peut donc transporter plusieurs flux GEM ou ATM en sens montant. Chaque T-CONT reçoit des données issues d'une ou plusieurs files d'attente.
L'OLT peut prendre connaissance du volume de données présent dans ces buffers grâce à l'en-tête DBRu (Dynamic Bandwidth Report upstream) envoyé par les ONU. Il peut ainsi modifier l'allocation des grants pour les trames suivantes.
Le DBRu est optionnel, dans le cas où il est utilisé on parle de mode Status Reporting (DBA-SR), dans le cas contraire, on parle de Non Status Reporting (DBA-NSR) et l'OLT estime la demande en bande passante à partir de mesures d'occupation des T-CONT précédents. Dans tous les cas, l'allocation de bande passante par l'OLT se fait par TCONT et non par ONU.
L'utilisation de cinq types de T-CONT permet d'offrir différentes classes de services sur le PON. Les opérateurs membres du FSAN ont par exemple identifié quatre classes de services (CoS) intéressantes :

· CoS 4: délai, gigue et taux de pertes de paquets faibles
· CoS 3: délai et gigue moyens, taux de pertes de paquet faible.
· CoS 2: délai, gigue et taux de pertes moyens.
· CoS 1: Classe Best Effort, le délai, la gigue et le taux de pertes de paquets peuvent être élevés.

Les T-CONT ne sont qu'un des mécanismes permettant de fournir ces classes de service.
Ils sont en général associés à d'autres techniques comme le marquage des paquets (DSCP ou 802.1p) et les files d'attentes non-FIFO (Weighted Fair Queueing) qui permettent de distinguer et privilégier certains flux.

L'allocation dynamique de bande passante (DBA)
L'OLT possède toutes les informations relatives aux contrats de trafic (configuration du PON) et aux débits instantanés soumis en upstream par les différents flux (explicitement grâce aux DBRu ou implicitement par des mesures d'utilisation). Il peut donc adapter la taille des grants à la demande instantanée en bande passante et aux paramètres des TCONT : c'est l'allocation dynamique de bande passante (DBA).
L'allocation dynamique de bande passante concerne uniquement le trafic upstream, le but et de permettre une meilleure utilisation du PON qu'avec une allocation statique en reversant la capacité non utilisée aux T-CONT faisant une demande de débit non-assuré ou Best-Effort.
Le DBA permet de prendre en compte le fait que tous les utilisateurs du PON n'émettent pas en même temps. Ceci permet ainsi de profiter du phénomène de multiplexage statistique pour pratiquer l'oversubscribing, et de mieux adapter la bande passante allouée à des flux qui présentent un profil de trafic en rafale comme le trafic IP.
L'allocation dépend également du type de T-CONT : elle est constante pour un T-CONT 1 et varie avec la demande pour un T-CONT 2. Pour un T-CONT 3 ou 4, elle tient compte de la bande passante laissée disponible une fois que les demandes en débits fixes/assurés ont été satisfaites.

Les V-LAN
Un VLAN (Virtual Local Area Network ou Virtual LAN, en français Réseau Local Virtuel) est un réseau local regroupant un ensemble de machines de façon logique et non physique.
En effet, dans un réseau local, la communication entre les différentes machines est régie par l'architecture physique. Grâce aux VLAN, il est possible de s'affranchir des limitations de l'architecture physique (contraintes géographiques, contraintes d'adressage, ...) en définissant une segmentation logique (logicielle) basée sur un regroupement de machines grâce à des critères (adresses MAC, numéros de port, protocole, etc.).
Dans le cas du GPON, un VLAN peut être attribué par service, permettant ainsi de d'identifier les flux multiservices (tagué les flux multicast) vers la passerelle de chaque client. Le tableau suivant identifie chaque V-LAN à son service de la façon couramment utilisée.

VLAN ID	Service Multicast
835	Internet (10 ou 100Mbit/s)
838	VOD (128Kbit/s)
840	TV numérique (32Kbit/s)
851 ou 852	TOIP (320Kbit/s)

Tableau 4 : Allocation des services par VLAN

A chaque service ainsi défini, est attribuée une priorité pour la file d'attente du DBA et pour la connexion GEM.

2.3.3. Mécanisme de transport OMCI

L'OMCI (ONU Management and Control Interface) est un service d'opération, d'administration et de maintenance qui fournit un moyen standard de découvrir les capacités de l'ONU, de le gérer et de le contrôler. L'OMCI du GPON est défini par l'ITU-T Rec G984.4.
Selon cette norme, l'OMCI agit sur une connexion virtuelle bidirectionnelle dédiée entre le système de management (généralement à l'OLT) et l'ONU. Pour ce faire, sur un lien GPON, l'OLT configure un port GEM dédié (GEM Port-ID) dont les trames encapsulent une charge de 48 octets et un en-tête de 12 bits correspondant au port dédié à l'OMCI. Un adaptateur OMCI

assure les fonctions d'encapsulation/dé-encapsulation à l'ONU et à l'OLT, respectivement pour les trames descendantes et montantes.

2.3.4. Sécurité

On entend par sécurité ici, les problèmes d'accès aux données que le PON soulève. La menace principale réside dans le fait que les trames descendantes sont diffusées à tous les ONU. Si un utilisateur malicieux venait à reprogrammer son ONU, il pourrait ainsi avoir accès à toutes données descendantes de chaque utilisateur. C'est à ce fait "d'écouter aux portes" que le système de sécurité du PON répond.

Pour répondre à ce problème, un algorithme de cryptage provenant de l'Advanced Encryption Standard (AES) est basé sur des codes secrets de 16 octets de données contenant des clés de 128, 192 ou 256 bits. Cet algorithme est décrit dans les documents publiés par le National Institute of Standards and Technology (NIST) (USA).

Ensuite l'OLT et l'ONU doivent configurés un Port ID pour le cryptage afin d'établir une clé de codage qui leur sera propre. Cette clé est ensuite stockée sur les registres à l'OLT et à l'ONT. L'algorithme de cryptage utilise ensuite ces registres afin de coder/décoder les données.

D'autres menaces plus exotiques seraient aussi remarquables mais sont abandonnées car ce sont des attaques inenvisageables pour leur rapport effort déployé / résultat.

2.4. Budget optique

Le budget optique comptabilise la perte ou l'atténuation optique possible entre un émetteur et un récepteur reliés par des composants optiques passifs tels que fibres, coupleurs, atténuateurs ou encore multiplexeurs. Cette notion de budget optique prend de l'importance pour le GPON. Elle constitue la principale limite dans la réalisation d'architecture d'accès optique sur une longue portée.

2.4.1. Atténuation linéique de la fibre et portée

L'atténuation dans une fibre monomode à base de Silice est due aux impuretés du verre qui peuvent absorber et diffuser la lumière. Les caractéristiques d'atténuation linéique (pertes en fonction de la distance parcourue) sont données en Figure 18 en fonction de la longueur d'onde transmise pour une fibre standardisée SMF28 (Single Mode Fibre).

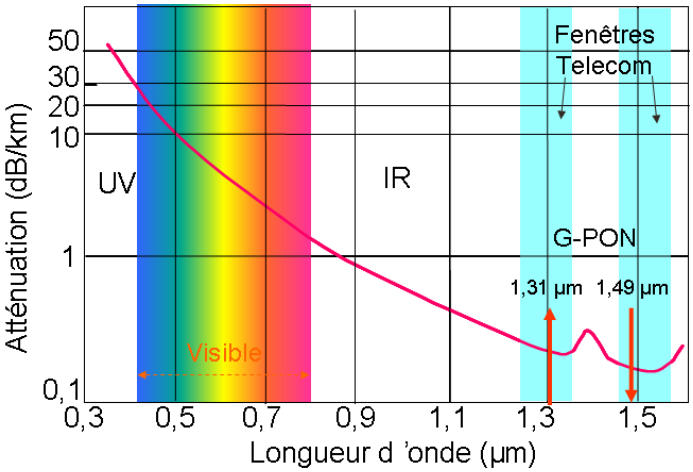


Figure 18 : Atténuation linéique d'une fibre SMF28

Pour le GPON, on retiendra les valeurs d'atténuation, typiquement, de 0.31dB/km pour les signaux montants à 1.31µm et 0.25dB/km pour les signaux descendants à 1.49µm.
Remarque : Pour rappel et comparaison, typiquement l'atténuation d'une paire cuivre (4/10) est de 15dB/km à 300kHz et 21dB/km à 512 kHz

La portée du GPON, désignant la distance possible entre l'OLT et les ONTs, est ainsi limitée par l'atténuation linéique souvent à 20km selon le taux de couplage utilisé par l'architecture.
La norme G984.1 définit également une portée logique maximale de 60km.
De plus, une distance différentielle de fonctionnement de 20km est fixée, entre le client à connecter le plus proche du central, et celui le plus éloigné. Ceci est lié notamment à la taille de la fenêtre de ranging nécessaire à la synchronisation des ONT, conformément à la norme ITU-T Rec. G.983.1.

2.4.2. Coupleurs optiques

Les coupleurs optiques sont des composants passifs à faible coût et à encombrement réduit. Ils permettent de partager un canal optique en N branches de sortie, on parle alors d'un coupleur optique 1 vers N ou 1:N. La division du faisceau optique entre plusieurs branches induit une réduction du signal transmis vers chaque destinataire. Cette réduction exprimée en dB est au mieux pour un coupleur sans perte supplémentaire, donné par l'expression : Att(dB)= Pout - Pin = 10 log (1/N). Les valeurs d'atténuation des coupleurs utilisés le plus fréquemment sont résumées dans le tableau suivant. La valeur réelle doit inclure les pertes de connexions et les pertes internes du coupleur qui sont de l'ordre de 1dB. Les études de dimensionnement d'une transmission optique utilisent de telles valeurs typiques.

Coupleur 1:N	Atténuation (dB)	
	Théorique	Typique
1:2	3	4-5
1:4	6	7-8
1:8	**9**	**10-11**

Tableau 5 : Pertes d'un coupleur optique

Pour le GPON les coupleurs assurent le multiplexage temporel. L'intérêt de l'opérateur réside dans un fort taux de couplage afin d'atteindre un maximum de client et de mutualiser au mieux les équipements du coté du central (ports OLT et fibre).

Cependant, le budget optique disponible, défini par les puissances émises et les sensibilités des récepteurs, limite ce taux couplage. L'architecture du GPON est ainsi souvent basée sur deux étages de coupleurs 1:8 afin d'atteindre 64 clients.

2.4.3. Classes A, B, C

Les classes A, B, B+, C, C+ sont définies par la norme GPON. Elles définissent le budget optique entre le central et les clients :

Classe	Atténuation (dB)	
	Min.	Max.
A	5	20
B	10	25
B+	13	28
C	15	30
C+	**17**	**32**

Tableau 6 : Classes A, B, B+, C, C+

La Figure 19 illustre un schéma justifiant le budget défini pour la classe B+. En effet, le client le plus proche peut se trouver aussi bien après un premier coupleur 1 vers N, ce qui représente environ 10dB de perte pour le signal dans le cas où N=8 ; il peut également être à l'extrémité du réseau après 2 coupleurs et 20km de fibre qui représentent environ 25dB de perte pour le signal (dépendant de la longueur d'onde). Pour garantir à chaque client une bonne réception, la classe B+ est ainsi définie avec un minimum de 13dB de pertes depuis l'OLT pour le client le plus proche et un maximum de 28dB pour le client le plus éloigné.

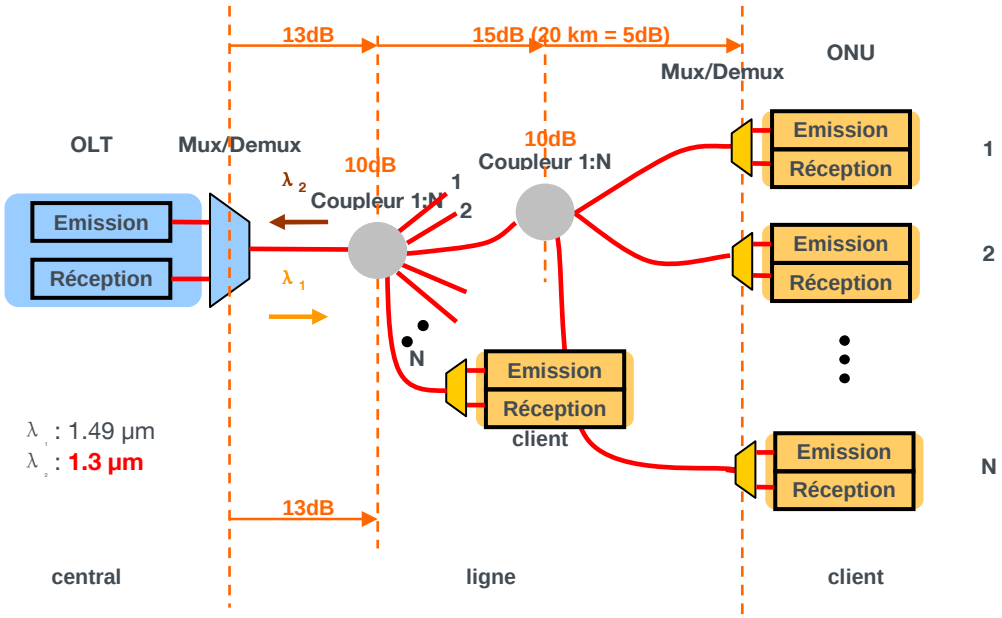


Figure 19 : Architecture d'un système PON de classe B+

Les performances des émetteurs-récepteurs en termes de puissances respectivement émises et reçues vont permettre de définir le budget optique d'une liaison. Elles sont définies par la norme G984.2 à l'ITU-T. Le tableau suivant résume ces spécifications pour une transmission descendante à 2,5Gbit/s et montante à 1,25Gbit/s.

OLT	Classe				ONT	Classe			
	A	B	C	C+		A	B	C	C+
Tx Max (dBm)	4	9	7	7	Tx Max (dBm)	2	3	7	5
Tx Min (dBm)	0	5	3	3	Tx Min (dBm)	-3	-2	2	0,5
Rx Max (dBm)	-3	-7	-8	-12	Rx Max (dBm)	-1	-1	-8	-8
Rx Min (dBm)	-24	-28	-29	-32	Rx Min (dBm)	-21	-21	-28	-30

Tableau 7 : Spécifications des émetteurs et récepteurs à l'OLT et à l'ONT selon les classes.

Dans une optique de profiter d'un budget optique supérieur, il existe désormais des émetteurs-récepteurs GPON Classe C+ mais leur utilisation est freinée pour une question de coût de cette technologie.

2.4.4. FEC

Un code correcteur d'erreur FEC (Forward Error Correction) peut être utilisé pour la couche de transport dans les systèmes de télécommunication. Il est basé sur un format encodé pour la transmission des données. L'encodage introduit une redondance qui permet au décodeur de détecter et corriger les erreurs de transmission. Par exemple, pour un taux d'erreur binaire (BER: Bit Error Rate) de 10^{-4}, en sortie du décodeur du FEC on obtient un BER de 10^{-15}. En utilisant cette technique, on peut réaliser de bonnes transmissions avec des taux d'erreur faibles, évitant ainsi des besoins de réémission des données transmises.

L'utilisation d'un FEC permet ainsi d'augmenter le budget optique du lien de l'ordre de 3 à 4 dB. En conséquence, l'OLT et les ONU peuvent supporter des débits plus élevés, une plus longue distance de transmission ainsi qu'un plus grand taux de couplage par arbre PON.
Cette solution est normalisée à l'ITU-T et son fonctionnement est détaillé sur la norme G984.3.

2.5. BPON, GEPON

Outre le GPON (Gigabit PON) qui utilise un mécanisme d'encapsulation multi- protocole (GEM), il existe, de façon normalisée, le BPON (Broadband PON) qui peut transmettre tout service sur encapsulation de type ATM et l'EPON (Ethernet PON) qui supporte uniquement l'Ethernet. Le GPON et le B-PON sont issus du groupe de pré-normalisation FSAN et sont normalisés par l'ITU-T. Le système E-PON ou GEPON est quant à lui issu de la normalisation IEEE.

Par la suite, nous n'avons pas traité tous ces systèmes en particulier mais les études que nous allons mener au chapitre 1 et 2 portent sur la couche physique de la technologie GPON et peuvent être extrapolées pour des technologies BPON ou GEPON.
Nous n'avons alors pas reporté les spécifications concernant les couches protocolaires du BPON ou de l'EPON qui sont définies respectivement par les normes [16,17].

Un résumé des caractéristiques physiques de ces systèmes s'avère alors utile. Le Tableau 8 présente cette synthèse pour le BPON, GPON et l'EPON.

	BPON	GPON	EPON
Standard	**ITU G983**	**ITU G984**	**IEEE 802.3ah**
Débit des données (Mbps)	***Descendant*:** **1244, 622, 155** ***Montant*:** **622, 155**	***Descendant*:** **2488, 1244** ***Montant*:** **2488, 1244, 622, 155**	***Descendant*:** **2500** ***Montant*:** **1250**
Modes de trafic	**ATM**	**GEM (ATM , Ethernet, TDM,)**	**Ethernet**
Nombre de clients	**64 max**	**128 max**	**32 max**
Distance "logique"	**20 km**	**60 km max, 20 km différentiel**	**10km, 20 km**
Longueur d'onde	***Descendant*:** **1490 nm** ***Vidéo analogique*** **1550 nm** ***Montant*:** **1310 nm**	***Descendant*:** **1490 nm** ***Vidéo analogique*** **1550 nm** ***Montant*:** **1310 nm**	***Descendant*:** **1490 nm** ***Vidéo analogique*** **1550 nm** ***Montant*:** **1310 nm**
Budget optique	**15/20/25 dB**	**15/20/25/28 dB**	**15/20 dB**

Tableau 8 : Récapitulatif des performances des PON normalisés

Notons que la différence concerne principalement le débit et le nombre de clients desservis par chaque standard ainsi que la couverture en nombre de kilomètres de fibre parcourue. Les longueurs d'onde, montante et descendante, sont les mêmes pour les trois groupes de normalisation.

La figure suivante décrit la répartition des technologies et des systémiers majoritaires dans le déploiement de ces réseaux, en date du dernier trimestre 2008.

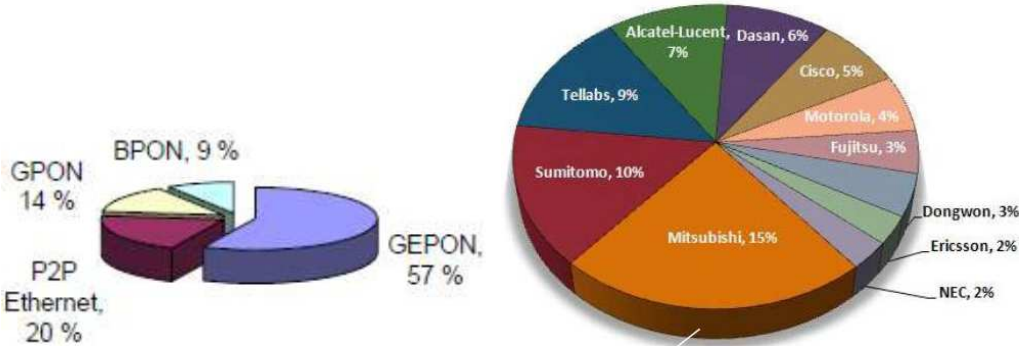


Figure 20 : Répartition des technologies et des systémiers BPON, GPON, GEPON (Source "Dittberner Associates, Inc.")

2.6. Extension du budget optique avec des "Extenders Box"

L'aspect extension de portée (Reach Extender) s'entend comme une solution basée sur un boitier actif (Extender Box) positionné dans l'infrastructure qui permet l'augmentation du budget optique. Cette augmentation du budget optique peut être tout autant utilisée pour augmenter le taux de partage que la portée dans la limite des 60km spécifiés par la norme GPON G984.2. Dans la définition de l'Extender Box (EB) apparaissent les termes ODN (Optical Distribution Network) et OTL (Optical Trunk Line) qui se trouvent être les parties du réseau d'accès de part en part du boîtier (Figure 21). Dans le cas où l'Extender Box se trouve au Central Office (cas typique), on retrouve l'ODN habituel de l'infrastructure d'accès du GPON.

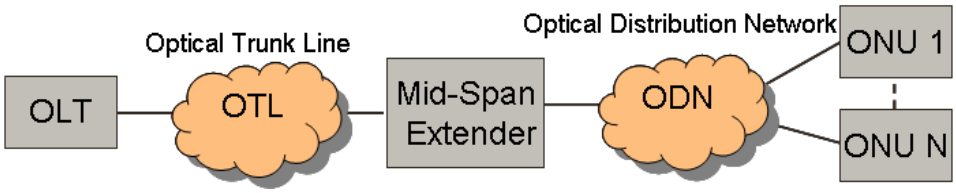


Figure 21 : Schéma d'implémentation d'une Extender Box

2.6.1. Norme G.984.6 pour le GPON

La recommandation G.984.6 vise de façon privilégiée la réutilisation des ONT B+ et répond aux normes B+ et C+ du GPON coté OLT. Deux technologies sont envisagées dans le standard : l'une est tout optique avec des amplificateurs optiques à semi-conducteur (SOA) et une seconde est basée sur la régénération des signaux par une conversion optoélectronique (OEO : Optique-Electrique-Optique).

2.6.1.1. Solution à base d'amplification optique

La norme G984.6 recommande l'utilisation d'amplificateurs optiques comme Extender Box afin d'augmenter le budget optique du PON grâce au gain apporté par l'amplification du signal optique. Comme le montre la Figure 22, un amplificateur pour chaque sens de transmission est nécessaire malgré leur faculté bidirectionnelle. En effet les amplificateurs optiques sont limités à

une largeur spectrale de l'ordre de 50nm qui ne permet pas de couvrir les bandes C et bande S à la fois.

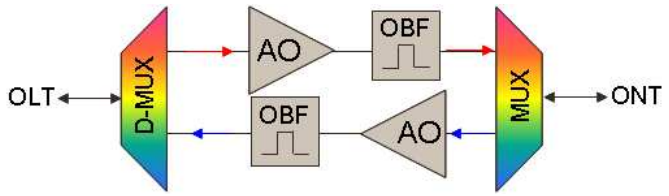


Figure 22 : Extender box à base d'amplification optique

L'utilisation d'un filtre spectral optique (OBF : Optical Band Filtre) est envisageable pour diminuer l'impact du bruit d'Amplification Spontanée Amplifiée (ASE) intrinsèque à l'amplificateur. Nous reviendrons sur cette technologie au cours du Chapitre 2 qui traite en détail de l'amplification optique sur PON.

2.6.1.2. Solution à base de convertisseur OEO

Une alternative à l'amplification optique est une Extender Box basée sur une conversion Optique-Electrique-Optique (OEO). Celle-ci permet de réémettre un signal optique après l'avoir régénéré électriquement selon des techniques habituelles 2R ou 3R :

- 2R : le signal est **R**emis en forme et **R**é-amplifié électriquement
- 3R : le signal électrique est **R**emis en forme et **R**é-amplifié puis **R**esynchronisé.

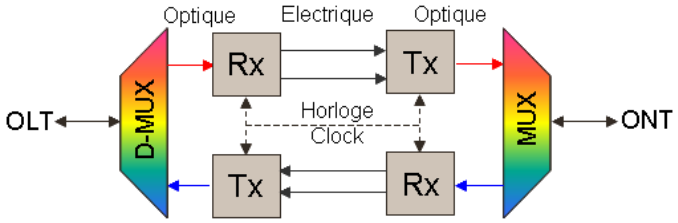


Figure 23 : Extender Box à base de convertisseur OEO

La solution "2R" n'est pas envisagée par la norme G984.6, mais fera tout de même partie d'études détaillées lors du chapitre 2.

2.6.1.3. Contraintes et spécifications

2.6.1.3.1. Règles d'ingénierie

Les règles d'ingénierie du PON en elles-mêmes ont tendance à retarder son déploiement sur le terrain. Un PON étendu par des Extender Box doit permettre d'élargir la zone de couverture tout en conservant une implémentation simple en termes d'emplacement ou de budget optique. Ainsi la norme G984.6 recommande de placer l'EB au central ou en ligne dans un ancien central pour satisfaire les besoins en alimentation de cet élément actif. Dans le cas d'un emplacement de l'EB en ligne, le PON perdra alors son caractère "passif".
En termes de budget optique, l'objectif est de conserver au minimum une architecture d'accès (ou ODN) de type "Classe B+" et d'étendre le budget de déport (ou OTL) d'autant (13 à 28dB). Dans le cas où le gain en budget de l'Extender Box le permet, une extension de Classe C+ [G984.2 Am2] est envisagée pour l'ODN.

2.6.1.3.2. Management du boitier

Une des problématiques ouvertes sur l'Extender Box est, dans l'immédiat, l'interopérabilité au niveau du management de cette "boite" via l'OMCI du GPON (l'EB devrait être vue comme un ONT) ou via un canal séparé. L'intérêt ici est d'avoir une box managée de façon à ce que, vu comme un ONT par l'OLT, elle remonte les alarmes nécessaires au bon fonctionnement du PON (alarmes d'alimentation, émission, réception, synchronisation, pertes de signal, etc…).

2.6.1.3.3. Réflectométrie

Le principe de la réflectométrie permet de détecter avec précision la position d'une panne physique sur l'architecture, par exemple fibre ou coupleur cassé. Un signal optique est émis dans la fibre à mesurer, et par principe de réfraction sur le dioptre créé par la cassure, une partie de ce signal est réfléchie. Le temps de parcours de ce signal réfléchi permet ainsi de déterminer avec précision l'emplacement de la cassure de la fibre (ou du coupleur).
La réflectométrie, connue également sous le nom de tir OTDR (Optical Time Domain Reflector), peut ainsi s'appliquer à la détection de pannes sur l'architecture GPON. Dans le cas d'un GPON étendu, un problème se pose alors, lié à la longueur d'onde OTDR émise dans la bande L (1600nm). En effet les solutions d'Extender Box proposées intègrent des multiplexeurs 1310nm /1490nm qui bloqueraient le tir OTDR. De plus, dans le cas d'un boitier OEO, la régénération électrique élimine la possibilité de réflectométrie de bout en bout du GPON.
Une suggestion de l'appendice V de la norme G984.6 propose d'intégrer un filtrage supplémentaire de part et d'autre de l'EB qui devra entrer en compte comme budget supplémentaire nécessaire. Ce filtre devra être bloquant si l'OTDR venait à perturber le bon fonctionnement de l'EB ou il permettra de court-circuiter l'EB si on envisage un tir OTDR de bout en bout (dans la limite des pertes du signal optique OTDR).

2.6.1.3.4. Coût

La question économique reste dominante quant au futur déploiement du réseau d'accès. Bien que comme l'OLT, le coût de l'EB est partagé par le nombre d'utilisateurs desservis, il doit représenter un pourcentage faible du coût d'un OLT.
Pour des raisons de simplifications des règles d'ingénieries qui découlent des performances des Extender Box ainsi que des coûts estimés, la solution optoélectronique est généralement préférée.

Différents vendeurs commencent à proposer des Extender Box sans pour l'instant réellement générer un volume de production :

- Solutions basées sur l'amplification optique : Alphion; ZTE
- Solutions basées sur l'optoélectronique : Huawei, Zenko, Telnet

Le sujet de l'extension de portée de GPON a fait l'objet d'études complètes et détaillées. Elles sont décrites au cours du Chapitre 2.

Les solutions d'extension de budget de type "Extender Box" n'ont été normalisées en 2009 que pour le cas du GPON (G.984.6 à l'ITU-T) mais ce principe d'extension de portée du réseau d'accès optique pourrait également être mis en application pour les nouvelles générations de PON "NGPON" et apparaît d'ailleurs souvent en parallèle de la roadmap de normalisation du NGPON.

3. La future génération de réseau d'accès optique

L'objectif de ce paragraphe est de présenter et de comparer les solutions optiques pour le réseau d'accès au-delà du GPON. Ces futures générations de réseau d'accès optique sont en cours de normalisation ou discutées en pré-normalisation. On tachera d'en exposer les dernières évolutions et d'en dégager les principales différences entre les normes.

Ce document détaille plusieurs raisons pour lesquelles un opérateur peut être amené à migrer du GPON actuel vers une nouvelle génération. Ces raisons pourront être liées à une évolution du domaine d'emploi du GPON, à l'apparition de nouvelles fonctionnalités proposées par la nouvelle génération ou encore en lien avec la réglementation, etc.

Ensuite nous distinguerons et détaillerons les différentes technologies proposées par les organismes de normalisation de l'ITU-T et de l'IEEE, définis ci-après.

Paysage de la normalisation post GPON

Groupe de travail informel piloté par des opérateurs et fort de 76 compagnies membres, le FSAN (pour Full Service Access Network) travaille comme un groupe de pré-normalisation dont les travaux sont par la suite disséminés dans différents organismes de normalisation dont le principal est l'ITU-T.
Dans ses travaux préparatoires à la succession du GPON, les opérateurs du FSAN ont distingué deux cadres de technologie ainsi qu'un échéancier, priorisant un élément certain, à savoir que dans l'avenir le remplacement du GPON (GEPON pour les partenaires asiatiques) sera inéluctable, et ont fixé un calendrier préliminaire pour indiquer leurs objectifs temporels pour la finalisation des standards et la disponibilité des systèmes.

Une première étape dite "NGPON1" intègre les solutions permettant une montée en débit jusqu'à 10Gbit/s et qui nécessitent une compatibilité avec une infrastructure classe B+ existante. On distingue le XGPON1 du XGPON2 qui offre respectivement un débit asymétrique et symétrique sur technologie 10GPON. En option, la possibilité d'une coexistence (overlay WDM) avec un système GPON en service est également discutée. Cette option est rendue possible si les éléments du GPON sont conformes à la recommandation G.984.5 qui précise la superposition en longueurs d'onde de chaque système, sur différentes architectures.

Une seconde étape dite "NGPON2" permettra de poursuivre la montée en débit mais cette fois l'opérateur s'autorise des reprises majeures de son infrastructure. Par exemple, des techniques de multiplexage variées apparaissent : un multiplexage dense en longueurs d'onde avec un partage de la fibre par des AWG (Arrayed Waveguide Grating) et non plus de simples coupleurs optiques, ou bien une technique hybride mixant WDM et TDM sur une même infrastructure ou encore l'utilisation de formats de modulation avancés associés à un multiplexage fréquentiel du type OFDM.

Ces étapes sont reportées sur la Figure 24 qui décrit la planification de l'évolution du NGPON au FSAN.

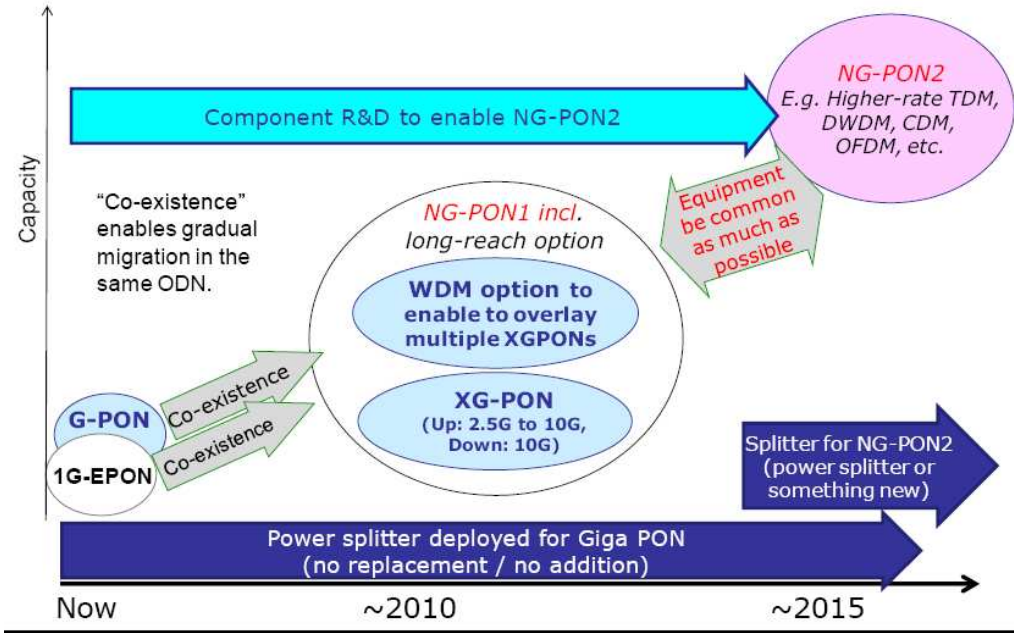


Figure 24 : Planification de l'évolution du NGPON au FSAN (Source FSAN)

Les variantes techniques du NGPON1 et les prémices du NGPON2 seront développées dans la partie technique du document.

En parallèle, depuis Juillet 2006, le groupe IEEE 802.3av s'est fixé pour objectif de fournir un standard d'interface optique répondant aux critères suivants :

- fournir un accès optique point-à-multipoints
- fournir à l'interface physique utilisateur un taux d'erreur égal ou supérieur à 10^{-12}
- fournir des spécifications de la couche physique pour une transmission à 10Gbit/s descendant et 1 ou 10Gbit/s montant sur un support bidirectionnel à base de fibre monomode standard.
- définir trois classes de budget optique qui permettront à l'infrastructure de supporter un taux de partage de 1:16 et 1:32 avec au moins 10 et 20km de portée.

Ce groupe a livré une première version de ce standard en septembre 2009 et certains points seront décrits en détail par la suite.

Nota : Dans le document l'appellation 10GPON concernera à la fois le standard NGPON1 de l'ITU-T et le 10GEPON de l'IEEE (mais pas le standard NGPON2).

3.1. Les raisons pour évoluer vers une nouvelle génération de PON

La première hypothèse que nous développerons ici est une saturation de la bande passante offerte par le GPON, ce qui conduira à chercher un système supportant des débits plus importants. Cela pourrait se rencontrer si des applications spécifiques, comme la collecte mobile, les services business ou des déploiements FTTx, étaient supportées par le GPON. Enfin, dans le cas d'une adoption importante de l'offre FTTH résidentielle, les évolutions des usages conduiront à un besoin croissant en bande passante.

D'autres contraintes de type réglementaire pourraient également pénaliser le GPON. En l'absence de spécifications stabilisées, il sera impossible d'assurer que les éventuelles adaptations seront possibles pour le NGPON. Particulièrement, des obligations de dégroupage ou de vente en gros pourraient être difficiles à réaliser selon les conditions requises.

En tout cas, il est intéressant de tenter de déterminer les besoins fonctionnels déterminants, l'évolution du trafic dans les années à venir et le point d'inflexion pour lequel le GPON avec les règles d'ingénierie actuelles ne répondrait plus à ce besoin. Il est d'ailleurs encore possible d'étendre certaines normes par des extensions et amendements à la marge de leur domaine d'application (exercice plus courant à l'ITU-T, car l'IEEE fige ses standards et ne les ré-ouvre que très rarement).

3.1.1. Montée en débit

Les études d'évolution des usages résidentiels et en entreprise montrent que les débits élevés supportés par la fibre à l'accès encouragent l'utilisation de services gourmands en bande passante (par exemple les services vidéo HD) et aussi la simultanéité d'usage des différents services. La symétrie des flux descendant et montant, ainsi que la latence améliorée par la disponibilité de débits importants sont les atouts technologiques des transmissions sur fibre optique. Ils répondent aux besoins des clients à court terme et ouvrent des pistes pour de nouveaux services à moyen terme. Aussi de nouveaux services pourront apparaître afin d'enrichir l'offre Triple Play actuelle tels que le jeu à la demande (Game on Demand) ou encore la vidéoconférence HD sur téléviseur.

Les offres commerciales Très Haut Débit (THD) basées actuellement sur le GPON proposent 100Mbit/s au client en flux descendant et 10Mbit/s, ou 100Mbit/s en option, dans le sens montant. Pour en proposer davantage et aller vers les ultra-hauts débits (UHD), il faudra envisager le passage à la technologie NGPON. Une autre alternative au NGPON serait de limiter le nombre de clients par PON (passage de 64 à 32 par exemple). Limiter le taux de partage du PON permet d'offrir plus de bande passante par client et donc de repousser dans le temps le besoin de migration pour un système de plus forte capacité. En contrepartie, cela nécessitera un investissement initial par client plus important.

Le THD permet de transmettre et de recevoir des volumes de données très importants. Elle devrait donc favoriser les applications de type téléchargement, déport de volume important de données en ligne, transfert de fichiers haute définition ou la possibilité d'accéder à plusieurs types d'applications depuis un même point d'accès. D'autre part, la faible latence, induite en partie par la bande passante importante, permet le développement des applications temps réel et interactives, en partie déportées en ligne.

En marge de cette thématique, un enjeu majeur pour assurer une bonne qualité de service (QoS) sur ce type d'applications et ne pas pénaliser l'expérience client est la continuité de réseau et de service au domicile. La satisfaction du client passe par la livraison de services THD à QoS garantie dans tout le domicile, quelles que soient les connectivités utilisées.
Un risque important de saturation du débit lié à la pénétration du THD se situe sur le réseau local domestique (RLD), à l'intérieur de la maison. La saturation sur le cœur du réseau ou les réseaux métropolitains ne se présentera pas de façon imminente. Notamment si une partie des investissements engagés par les opérateurs sont réalisés pour mettre à niveau ou dimensionner largement ces infrastructures.

La montée en puissance des services vidéo influence fortement l'évolution de la consommation de la bande passante à l'accès. C'est une des composantes majeures des projections de trafics réalisées par les analystes. Les estimations de Cisco[18] montrent qu'en 2013, la vidéo, sous toutes ses formes, TV, VoD, Internet video, et Peer to peer, représentera 91% de la consommation globale de trafic IP estimée à 667 Eo (667.10^{18} octets), cinq fois la consommation de 2008. Mais au-delà de la simple augmentation de consommation des flux vidéo, il faut également considérer les différents services associés (VoD, time shifting) qui enrichissent l'offre vidéo. Ils vont en effet générer un trafic différent (multicast vs unicast, flux à débit constant ou variable, en direct ou léger différé, téléchargement…) et à plus ou moins long terme, une augmentation générale des débits liés aux futurs standards (1080p 50/60Hz, 3D, 4k cinéma, 8k super hi-vision : voir l'Annexe 1, page 206). C'est le Très Haut Débit au service de la Très Haute Définition.
En parallèle à ces augmentations de données à traiter, les puissances des terminaux croissent régulièrement ainsi que la complexité des traitements embarqués et la demande des clients de sécurisation des données. La possibilité de déporter dans le réseau une partie des services, permettrait de proposer des terminaux multiservices à coût modéré. Les traitements complexes seraient déportés dans le réseau, mutualisés au moyen de puissants processeurs multitâches, partagés à grande échelle.

3.1.1.1. Usages en entreprises

Pour les usages en entreprise, deux applications pourraient se diffuser plus largement avec le déploiement de la fibre et l'augmentation des débits disponibles, notamment montants. La télé-présence ou visioconférence HD devrait favoriser le travail collaboratif à distance, dans un contexte de développement durable. Selon les solutions commerciales actuelles, la télé-présence nécessite de 3 à 20Mbit/s de bande passante symétrique par système et un temps de latence de 100ms pour recréer le sentiment de présence physique du correspondant.
Pour faire face à l'augmentation de la quantité de données, des solutions de stockage souples, en temps réel, dans le réseau : « backup in the cloud », répondent à un besoin des entreprises. Ce service nécessite environ 2Mbit/s de bande passante symétrique et un temps de latence de 20ms.

A moyen terme, le THD offrira à l'entreprise un LAN « sans couture » entre ses différents sites et ceux de ses fournisseurs, l'autorisant à externaliser une partie de ses données et son système informatique, à ne pas devoir choisir l'endroit où installer ses serveurs. Le THD permet l'utilisation d'applications en ligne qui exigent performance et disponibilité du réseau. D'autres offres permettent la gestion du poste à distance avec des solutions de maintenance externalisées. Ces opportunités ne seront possibles que si les entreprises sont convaincues de la très grande disponibilité du réseau et de sa sécurisation afin de ne pas percevoir la dépendance vis-à-vis du réseau comme un danger. Une entreprise aura besoin de garanties en termes de confidentialité des données, de résistance du PON aux attaques et d'évolutivité du réseau en termes de bande passante pour permettre son adaptation en temps réel à ses besoins.

A court terme, une tendance semble être le recours à des solutions collaboratives en mode ASP (Application Server Provider) ou SaaS (Software as a Service). Les enjeux sont l'accès performant et évolutif aux applications et la garantie de disponibilité. L'étape suivante à moyen ou long terme est l'arrivée sur le marché du modèle à la demande appliqué au matériel : le « cloud computing ». L'usage de l'infrastructure informatique est considéré comme un service. L'utilisateur dispose de la puissance informatique qu'il souhaite au moment où il la souhaite, sans devoir acheter des unités de puissance et de calcul qu'il n'utilise pas ou très peu. Cela peut être un moyen d'optimiser les ressources disponibles des centres de données de l'opérateur tout en générant des besoins en bande passante dans le réseau de l'opérateur.

D'autre part, un salarié d'entreprise demande de plus en plus à accéder à l'ensemble de ses applications et données professionnelles à la maison et personnelles au travail, et ce, dans des conditions similaires en termes de rapidité et de disponibilité, bien que certaines données ou applications ne soient pas localement stockées. C'est ce besoin d'accéder à l'ensemble de ses applications et données simultanément et de pouvoir les partager avec différents interlocuteurs, ceci en temps réel, qui poussera les entreprises à demander la mise en œuvre de la visioconférence HD et du stockage souple caractérisés précédemment.

3.1.1.2. Usages pour les résidentiels

En ce qui concerne les usages résidentiels, le THD peut jouer un double rôle en tant que révélateur d'applications jusque-là peu usitées ou desservies par la technologie de l'époque de leur sortie (exemple de la visiophonie) et un accélérateur d'usages comme la production de contenus (exemples de YouTube et de DailyMotion). La visiophonie point-à-point ou point-à-multipoint est une nouvelle expérience, rendue en HD avec une bonne fluidité grâce au THD et qui n'est plus comparable avec les expériences passées. Le service de visiophonie HD nécessite un débit symétrique de 4Mbit/s par flux et une latence faible (100 à 200ms). L'augmentation du débit à l'accès permet également le partage de vidéos personnelles de meilleure qualité et on étend ainsi la portée des producteurs, l'étendue des lecteurs et ainsi des usages : vidéo à but commercial, vidéosurveillance, web TV locale, télémédecine, téléassistance… Certains de ces services nécessitent également une disponibilité importante afin d'offrir une expérience client de qualité.

La télévision et les contenus TV constituent déjà le cœur des offres triple-play. La fibre permet tous les usages et les futures fonctionnalités promises, telles que le time-shifting, le catch-up (techniques de visionnage différé), laissent entrevoir de nouveaux services autour de l'interactivité et de la personnalisation. La TV, historiquement un flux de nature broadcast, devient alors un flux éminemment unicast. La bande passante réservée dans les équipements de réseau en est complètement modifiée. Le THD devient pertinent, d'autant plus si on considère la juxtaposition des flux au sein du même foyer.

Les échanges entre interlocuteurs seront enrichis par des usages plus immersifs et interactifs, mélangeant le réel au virtuel au sein d'environnements 3D. Ils seront accessibles depuis n'importe quel terminal de la maison (TV, PC, …). La qualité d'immersion et le rendu de la présence des interlocuteurs résideront dans la capacité du réseau à fournir une excellente synchronisation des actions des participants, afin de maintenir la cohérence des éléments non persistants de l'environnement. Ainsi, c'est le nombre d'utilisateurs et la juxtaposition de leurs usages qui donneront la mesure de la bande passante nécessaire dans les deux sens de transmission. Une bande passante élevée et une latence très faible seront nécessaires pour accompagner l'exigence croissante des utilisateurs sur la qualité des contenus et des interactions avec leurs correspondants.

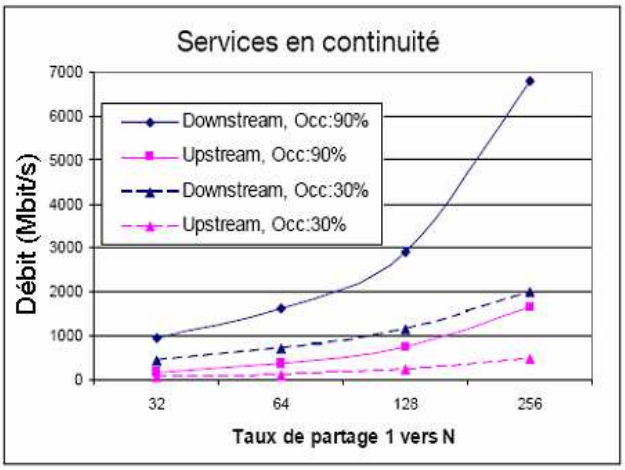
Au-delà du triple-play, les usages deviennent multiples et simultanés sans que l'utilisateur appréhende finement les caractéristiques très diverses des flux THD qu'ils induisent. Des services à faible priorité mais gourmands en débit comme des téléchargements en Peer to Peer peuvent ainsi côtoyer des services à faible débit mais à transit garanti comme la voix sur IP. Le FTTx permet de transmettre plus de débit, mais cette technologie doit surtout permettre d'accroître la perception de haute qualité et d'innovation de l'expérience de l'utilisateur. D'ici quelques années, on pourra concevoir des communications dites enrichies, agrémentées d'un support, et multi-sensorielles afin d'augmenter la réalité des échanges.

Pour répondre aux besoins de simplicité et de sécurité ainsi qu'aux possibilités de personnalisation de l'environnement informatique, les applications en ligne, les solutions de stockage en ligne et les solutions de virtualisation de machine et d'environnement se multiplient. Elles nécessitent un débit montant important et une faible latence pour être confortables. A titre

d'exemple, le service de stockage en ligne S3 (Simple Storage Service) mis en service par Amazon Web Service propose un service courrier pour l'envoi des gros volumes de données à sauvegarder en ligne pour palier les lenteurs du réseau ou le coût inhérent. On peut supposer également que ces outils découverts dans le monde professionnel se diffuseront d'autant plus facilement dans la sphère résidentielle car, de plus en plus, on constate la disparition des frontières entre les sphères professionnelle et privée.

3.1.1.3. Dimensionnement de la bande passante

Pour illustrer une évolution possible des usages résidentiels décrits précédemment sur une structure PON, l'exercice suivant a été réalisé. La simulation du dimensionnement des interfaces PON pour différents taux de partage et taux d'occupation, en considérant des projections marketing de services est réalisée. Par manque de recul suite aux pré-déploiements, ces projections restent à être confortées à l'avenir pour avoir une vision claire des usages qui seront appropriés par les futurs clients FTTH. Cette simulation a été réalisée à l'aide de l'outil Manitoo2 qui prend en compte les flux multicast de type TV, les flux VoD et les flux Internet.
A partir de ces hypothèses, en Figure 25, nous obtenons les courbes suivantes décrivant la bande passante totale nécessaire sur un PON en fonction du taux de partage et du taux de remplissage du PON :



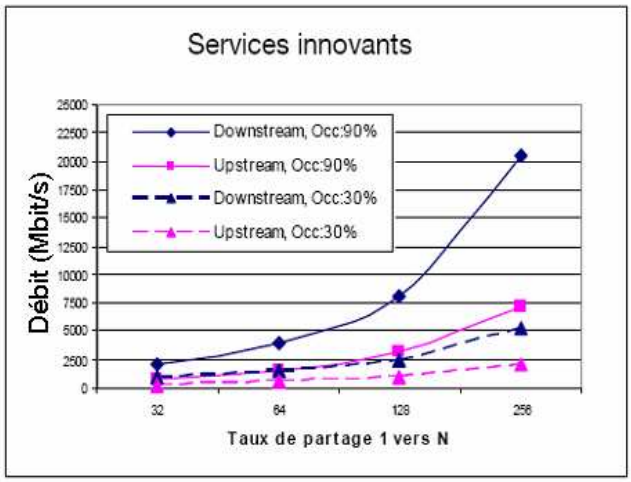


Figure 25 : Prévisions des débits des services en continuité et innovants

En omettant la part que prendront effectivement les applications de peering, les débits descendant et montant restent assez asymétriques. Le Peer to Peer et les applications de ce type réduiront cet écart, mais on peut penser que les services en diffusion persisteront et que les débits resteront asymétriques.
Les systèmes GPON semblent bien dimensionnés pour supporter les services haut-débit en continuité. L'augmentation du taux de remplissage réduit l'efficacité du GPON et les perspectives d'évolution des usages et services. Si le GPON ne répond plus aux besoins en débit, un système asymétrique ne convient pas non plus du fait d'un débit montant trop faible. Dans le scénario "services innovants", le besoin de 10Gbit/s symétrique ne s'affiche que dans des cas de taux de partage à 128 avec un taux remplissage élevé. Pour un taux de partage à 64 et un taux de remplissage élevé, le trafic Peer to Peer pourrait jouer un rôle déterminant pour le choix du débit montant entre 2,5Gbit/s et 10Gbit/s.

3.1.2. Evolution du domaine d'emploi du GPON

Il faudra déterminer l'étendue du domaine d'emploi couvert par le GPON et qui conditionnera celui des systèmes 10GPON qui ont vocation à être introduits par la suite :

- Restera-t-il celui d'un "bundle triple play" intégré sur IP pour les résidentiels ?
- L'usage du GPON restera-t-il cantonné à l'architecture FTTH ou en étendra-t-on et sous quelle condition l'usage au FTTB, dans la mesure où cette dernière architecture pourrait accélérer la saturation en débit du système ?
- Intègrera-t-il sur la même fibre lors d'une adduction de zone ou d'immeuble:
    - des usagers professionnels et des entreprises
    - des immeubles dans le cadre d'architecture FTTB
    - le raccordement de stations de base pour mobiles
    - une combinaison de plusieurs de ces applications
    - … autres …?
- Utilisera-t-on des PON dédiés d'un même châssis OLT pour l'ensemble de ces usages comme c'est le cas pour l'xDSL?

Les opérateurs seront-t-ils amenés à désinvestir leurs réseaux cuivre pendant l'ère du GPON ou ultérieurement ? La question du portage des transmissions sur cuivre vers l'optique se posera dès lors que le désinvestissement des commutateurs du RTC sera entamé avec la migration des services vers des DSLAM dédiés ou mixtes.

Quelques exemples : Verizon et Telus

L'exemple de Verizon à une extrémité du spectre illustre une des variantes possibles. En effet, Verizon pousse la logique autorisée par la FCC (Federal Communications Commission) :

- d'une part en distribuant une offre Triple-Play résidentielle FTTP/H non intégrée sur IP, puisque la voix reste POTS [19] et la vidéo reste en overlay CATV.
- d'autre part à remplacer le cuivre par la fibre pour les clients sollicitant un raccord au réseau optique, dépeuplant ainsi ses DSLAM et ses concentrateurs du réseau POTS.

Cependant le désinvestissement de l'accès cuivre reste soumis au passage de l'intégralité des clients et usages à l'optique.

L'exemple de Telus : Une autre illustration est celle du modèle de l'opérateur canadien. Telus annonce procéder à une démarche volontariste de passage systématique à l'optique sur les zones visées, qui lui permettra un désinvestissement complet et rapide du cuivre.

3.1.3. Limitations du budget optique

Une première hypothèse d'évolution du réseau serait liée au manque de budget optique des classes GPON. Etendre la zone de couverture des arbres PON afin d'atteindre les clients les plus éloignés du central pourrait être plus adapté avec les systèmes NGPON qu'avec les systèmes GPON. Cela dépendra d'une part des classes de budget retenues définitivement par le standard et les implémentations industrielles de celles-ci. Et, d'autre part, cela résultera surtout des règles d'ingénierie optiques retenues par l'opérateur en fonction des options des scénarios de déploiement et selon les types de zones considérées. En effet, une réduction du taux de partage d'un facteur 2 permet un extension de la portée d'une dizaine de kilomètres environ, envisageable dans la mesure où les volumes de clients nécessitant cette adaptation restent limités.

L'ajout de composants au système GPON, comme un multiplexeur WDM, pour préparer la migration à la génération suivante, pourrait ne pas être possible dans certaines situations. Par exemple, si les 28dB de la classe B+ ont déjà été consommés par ailleurs.
De plus, le GPON pourrait ne plus être adapté dans le cadre d'une obligation réglementaire concernant le câblage intérieur si l'on dépassait les 1,5dB alloués au câblage d'immeuble.
Une autre situation possible amenant un manque de budget optique serait un scénario de consolidation de réseau ou le choix d'un déploiement des systèmes NGPON1 plus en amont dans le réseau afin de réduire le nombre de sites actifs (points de présence d'OLT) par rapport au nombre de sites NRA. Ceci augmenterait le besoin de portée des systèmes et pourrait rendre le NGPON1 plus favorable à cette migration.

3.1.4. Nouvelles fonctionnalités apportées par les nouvelles générations PON

Sécurité / confidentialité

Les objections les plus courantes à l'extension d'usage du PON portent sur la confidentialité, la résistance du PON aux attaques de type DoS (Déni de Service) par éblouissement du récepteur de l'OLT et bien sûr l'évolutivité du réseau en termes de bande passante. L'introduction d'une nouvelle génération de PON permettant de remédier à ces manques du GPON serait alors justifiée.

Dans le cadre de la normalisation, il est indispensable au niveau des mécanismes de la couche TC (Transmission Convergence) et du management d'intégrer dès le début, les contraintes de l'ensemble de ces applications. Si ce n'est pas le cas, on risque de voir se déployer un parc important d'équipements non adaptés qui nécessiteront des reprises fondamentales sur les mécanismes de tramages et de gestion ou encore les niveaux de qualité de service.

Qualité et mécanismes de synchronisation

Ainsi pour le NGPON, dans le cadre d'une migration du réseau mobile vers le PON, une possible difficulté consisterait à intégrer les spécifications propres aux réseaux mobiles à venir, en matière de synchronisation. Ces difficultés sont de 3 ordres :

- la synchronisation du niveau de débit binaire (Horloge) : la transmission OLT vers ONU étant permanente et embrouillée, la qualité de l'horloge va principalement dépendre de celle du transfert d'horloge à l'OLT, entre la source et les interfaces PON, et à l'ONT.
- la phase qui consiste à au moins connaître voire compenser l'écart des délais de transmission entre l'OLT et chaque ONU, dans la mesure ceux-ci ne se situent pas à la même distance du central. La connaissance de cette information dont une image est mesurée par l'OLT demande à être partagée avec les équipements du réseau mobile afin d'y faciliter les "hand-shaking" entre cellules
- Enfin la datation (ou "time stamping") de la forme heure/minute/seconde du jour est demandée par certaines applications. Il convient de déterminer si celle-ci doit être le fait du PON ou si celui-ci doit être transparent. Il paraît acquis que sa transmission explicite aura lieu en cas de besoin via un champ spécifique.

On différencierait alors un ONT du réseau PON standard d'un ONT du réseau mobile, ce qui amènerait des coûts supplémentaires à modérer dans la mesure du possible.

Il est à noter que plusieurs opérateurs utilisent déjà le GPON pour cet usage de "backhauling" de stations de base mobiles. Le GPON actuel répond donc aux spécifications actuelles du réseau mobile. Il conviendra de s'en assurer dans la durée avec l'apparition de nouveaux standards.

Disponibilité et prise en compte des services de Sécurité

Il est indispensable d'intégrer dans la conception du déploiement, une dimension accrue concernant la disponibilité dans la mesure où l'opérateur voudra au choix :

- pouvoir envisager le dépôt du cuivre sur une zone ou pour les clients raccordés sur le PON (scénario Verizon)
- envisager le désinvestissement des CNE et dans le futur des DSLAM (scénario TELUS) qui implique le support sur optique de l'ensemble des applications et services
- offrir des services de haute disponibilité (par exemple le "cloud computing" pour les entreprises ou le stockage dans le réseau de l'opérateur)
- simplement proposer sur PON des services touchant à la santé ("E-santé" ou télémédecine) ou encore à la surveillance ou sécurité de sites. Ceci devient de plus en plus apparent au moment où de nombreux projets de services sont lancés par la commission européenne et les autorités nationales et locales, afin d'accompagner le vieillissement de la population. Ces services au public sur une population "captive" ne peuvent être qu'amenés à se développer, Dès lors que des vies peuvent être en jeu, une disponibilité "best effort" risque d'être inacceptable.

Il reste à quantifier notamment par une étude approfondie des points de défaillance par des calculs de fiabilité prévisionnelle et par l'analyse des retours terrains du déploiement. Quels seront les points des systèmes et des infrastructures optiques à fiabiliser, par exemple pour s'approcher de la disponibilité des interfaces Z qui reste la référence historique ? Autant il n'est pas indispensable de sécuriser / dupliquer l'intégralité des flux par un doublement des interfaces NT de l'OLT, autant cela devient important pour des services de type "lifeline" qui ne seront pas nécessairement générateur de très hauts débits. Cela pourrait nécessiter l'introduction d'une sécurisation partielle de la collecte à partir de l'OLT, alors qu'elle n'est pas réalisée à partir du DSLAM à ce jour.
Il est d'ores et déjà facile d'établir que par rapport à l'architecture de l'offre "La Fibre", il sera indispensable d'étudier une offre de maintien de la connectivité lors de coupure de l'énergie afin d'acheminer les appels d'urgence, ce qui impose la proposition d'une solution de batteries à l'ONU.
Il faut aussi rappeler que dans la plupart des villes, il y a des postes de sécurité en mairie et gendarmerie avec besoin de sécurisation vers la préfecture et les autorités de rattachement qui nécessiteront soit des offres de double routage (protection du chemin optique), soit des offres de non isolement (raccordement sur deux sites OLT distants non soumis au risque d'incendie et/ou d'inondation) qu'il faudra prendre en compte.
Les besoins des entreprises de sécurité (surveillance à distance, gestion des alarmes avec déplacement éventuel in situ) peuvent également être rapprochés des besoins régaliens décrits précédemment.
Pour ces applications, il n'est pas envisageable de déporter un OLT à la limite de la distance max de transmission sur chemin direct, il faut aussi que le chemin de secours reste dans les limites de la distance maximale de la technologie (portée nominale 20km, portée maximale avec des Extender Box 60km actuellement)

Vus les délais de la normalisation de ces nouvelles générations de PON, il est souhaitable dès à présent de déterminer l'intégralité des spécifications et incertitudes à lever pour permettre au NGPON d'intégrer ces nouvelles fonctionnalités.

3.1.5. Contexte concurrentiel

Enfin, une autre motivation qui pourrait conduire à un déploiement de nouvelles générations PON est la pression concurrentielle. Celle-ci se produit en avance de phase par rapport au besoin en débit et avant que celui-ci entraine un changement de génération impératif, comme l'illustre le transparent suivant de NTT.

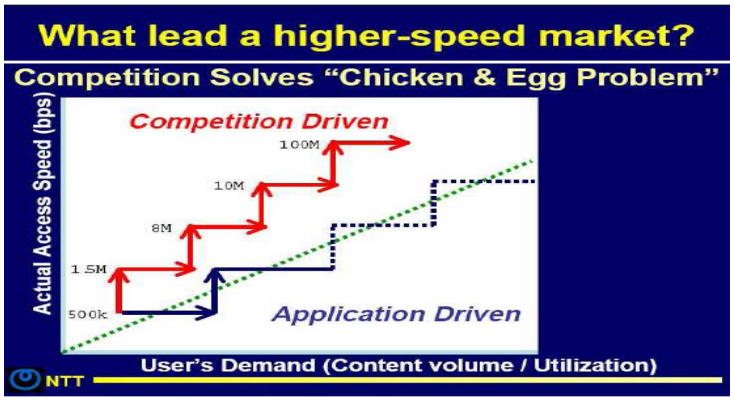


Figure 26 : Impact de la concurrence sur la course au débit selon NTT

Par exemple, dans le cas du passage du GPON au 10GPON, la motivation principale est une offre jusqu'au Gbit/s chez les abonnés.

La perception du service par le client dépendrait à la fois du dimensionnement du lien de collecte et du lien d'accès (de façon à avoir un taux de connexions simultanées comparable). Les limitations du débit descendant et montant du GPON ne permettent pas d'offrir un service à 1Gbit/s à un nombre de client satisfaisant par PON.
Dans ce cas le recours à une solution XGPON1 (10G/2,5G) ou à une solution XGPON2 (10G/10G) permettra d'offrir ce service avec un débit perçu se démarquant réellement du 100Mbit/s.
L'équation économique sera également à prendre en compte. La stratégie d'un opérateur pouvant être soit une riposte à une annonce d'un concurrent (à moindre coût, le cas le plus favorable étant la migration du GPON vers le XGPON1). On peut aussi imaginer qu'un opérateur anticipe une offre marketing à 1Gbps auquel cas le choix de la solution dépendra de la cible marketing recherchée (et pourra aussi inclure des solutions 10Gbit/s symétriques).

3.2. NGPON1

Le NGPON1 s'étend sur les réseaux PON de nouvelles générations prévues pour une évolution court terme des technologies actuellement déployées.
Dans ce cadre, on distingue plusieurs standards développés par les organismes de normalisation ITU-T ou l'IEEE. L'ITU-T propose ainsi deux variantes de PON permettant la montée en débit jusqu'à 10Gbit/s : le XGPON1 (10G/2,5G) et le XGPON2 (10G/10G). Dans une optique similaire, l'IEEE a réalisé des travaux de normalisation essentiellement basés sur le 10GEPON.

Il est important de préciser qu'autant à l'IEEE qu'à l'ITU-T, ce sont des standards ou recommandations de transmission qui sont élaborés. Ce ne sont pas des systèmes, et à ce titre, leurs implémentations présentent une gamme de matériel et de dimensionnement, voire des performances significativement différentes. De même, ces recommandations ne couvrent ni les

règles d'ingénierie, ni l'infrastructure ou encore le type de trafic qui caractérisent l'emploi qu'un opérateur fait des systèmes basés sur la norme.
Ces normes ont pour but principal de faire émerger un premier marché, le plus large possible, pour les briques de base constitutives des systèmes, à savoir les composants optiques avec leur électronique associée et les circuits temps réel de traitement de trame (couche MAC). Ces spécifications offrent ensuite une marge de manœuvre aux systémiers pour différencier leurs produits et leurs permettre, ainsi qu'aux opérateurs-clients, un marketing de leur choix.

3.2.1. 10GPON à l'ITU-T

L'ITU-T a débuté en 2009 l'étude de normalisation de systèmes PON à 10Gbit/s en déclinant dans les détails les lignes directrices établies par les opérateurs et les systémiers, lors d'études préliminaires menées par le FSAN. Ces nouvelles normes PON vont constituer la série de recommandations G.987.x qui, selon la faisabilité industrielle à des coûts acceptables, distingueront deux sous-variantes : le XGPON1 et XGPON2 détaillés ci-après. L'objectif commun à ces systèmes est de préserver l'architecture PON de première génération tout en proposant une migration des équipements actifs vers un débit en ligne descendant de 10Gbit/s. Le XGPON2 se distingue particulièrement du XGPON1 en offrant un débit symétrique de 10Gbit/s.

3.2.1.1. La variante XGPON1 du 10GPON

Le XGPON 1 se caractérise par un débit descendant de 10Gbit/s associé à un débit montant de 2,5Gbit/s. Le plan d'allocation en longueur d'onde de ces transmissions a également été défini : les signaux descendants devront être émis en 1575-1580 nm et les signaux montants entre 1260-1280nm.

Le XGPON1 faisant partie intégrante du NGPON1, son infrastructure passive (fibre, coupleurs, etc) se voudrait calquée sur celle du GPON, afin de faciliter la migration des équipements actifs vers le 10GPON. Cette mutualisation de l'infrastructure va impliquer l'insertion d'éléments de multiplexage (coupleurs ou multiplexeurs) au dépend du budget optique. En effet, pour assurer l'overlay avec un système GPON déployé, opérant sur une infrastructure de classe B+ (13-28dB), il est nécessaire d'ajouter les pertes du composant de multiplexage noté "WDM1". Ce WDM1 sera spécifié par la reprise du standard G.984.5.

Les classes de budget optique du XGPON1 ont étés définies non sans difficultés à travers de nombreux meeting du FSAN. En effet, deux préoccupations s'affrontaient en 2009 :

- d'un côté l'assurance du choix de la technologie de composants optiques la plus compétitive et compatible avec une migration "aisée" vers du 10Gbit/s symétrique. On parlait alors d'un budget optique maximum de 29dB[6] correspondant à la classe B+ plus les pertes du WDM1.

[6] Il faut noter que si les contributions industrielles du meeting FSAN de mai 2009 avaient montré un consensus autour de 29dB, celles du meeting de juin font apparaître des possibilités de valeurs plus élevées. Celles-ci mettent en jeu des technologies plus risquées parce que propriétaires ou pas encore employées dans le domaine de l'accès (EML ou electro-absorption modulator integrated laser + amplificateur optique ou CML pour Chip Managed Laser), qui repoussent le point de rupture des coûts estimés au-delà de 31dB. On peut considérer 29,5dB comme la solution prudente et 31 comme un objectif assigné aux constructeurs pour l'amélioration des performances des modules optiques

- de l'autre la couverture du "pire cas" opérationnel constaté par Verizon, ainsi que par British Telecom, à la recherche du maximum de dB initial, au risque de renchérir le système alors même que ces budgets optiques ne font sens que pour une part minime du parc de clients à raccorder. A cette position pire cas correspondrait alors un budget optique de 31dB

Ces discussions ont alors mené à un compromis permettant d'investiguer en parallèle deux classes de budget optique dites "nominales". La classe N1 est alors définie pour un budget optique de 14 à 29dB et la classe N2 correspondra à la position pire cas avec 16 à 31 dB de budget optique.

Aussi, il y a eu de la part de certains opérateurs, une demande d'amélioration des performances qui s'exprimera dans une classe dite "Extended" dont l'atténuation peut s'élever à 33dB. Par exemple, Korea Telecom y voit une possible solution à son architecture hybride WDM-TDMA PON, tandis que d'autres y voient un taux de couplage supplémentaire et d'autres encore un surcroit de portée au prix d'évolution importante des technologies vers du bas coût.

Les spécifications de la couche physique ont donc finalement été dévoilées en fin d'année 2009 à travers le standard G987.2. Il en ressort notamment la définition de trois classes de budget optiques distinguées dans le tableau suivant.

IUT - G987.2	'Nominal1' classe (classe N1)	'Nominal2' classe (classe N2)	'Extended' classe (classe E)
Atténuation Minimum	14dB	16dB	18dB
Atténuation Maximum	29dB	31dB	33dB

Tableau 9 : Identification des classes de budget optique du XGPON1

Ce standard spécifie également une portée similaire à celle du GPON : 60km avec une différence maximale de 20km entre le client le proche et celui le plus éloigné du central.

On notera également que le standard du 10GPON se distingue particulièrement de celui du GPON puisque pour réaliser ces performances, un FEC doit être implémenté pour chaque sens de transmission mais ne serait qu'optionnel pour la transmission montante à 10Gbit/s.

De nouvelles spécifications sont prévues pour la mi-année 2010 avec l'arrivée des standard G.987.3 (Transmission Convergence Layer specifications) et G.987.4 (ou G.OMCI pour le management OMCI).

3.2.1.2. La variante XGPON2 du NGPON1

La variante XGPON2 définissant également le 10GPON se distingue du XGPON1 par un débit descendant et montant de 10Gbit/s.
Le portée maximale est définie comme étant la même que celle du XGPON1 et GPON, à savoir 60km avec une différence maximale de 20km entre le client le proche et celui le plus éloigné du central.
Les autres spécifications de la couche physique (budget optique, longueurs d'onde) n'ont pas encore été spécifiées pour plusieurs raisons :

- Le degré de compatibilité XGPON1 – XGPON2 souhaité par les opérateurs n'est pas clairement établi.

- Le degré de convergence du XGPON2 avec le standard IEEE 802.3av, affichant tous deux des débits équivalents, est à débattre en fonction des logiques et des marchés respectifs.
- Pour la superposition XGPON1 – XGPON2, deux options sont possibles, par technologie WDM ou par technologie TDMA multi-vitesse. Cette dernière option permet la cohabitation d'ONU XGPON1 et XGPON2 sur une même fibre.
- Si le XGPON1 est considéré comme la technologie de substitution du GPON, alors aucune coexistence XGPON2 avec GPON n'est nécessaire et le XGPON2 pourrait réutiliser les longueurs d'onde du GPON.

Ces spécifications sont prévues pour la mi-année 2010.

Le tableau suivant synthétise les propriétés du XGPON1 et XGPON2.

	XGPON 1	**XGPON2**
Débit Descendant (Gbit/s)	10	
Débit Montant (Gbit/s)	2,5	10
Longueur d'onde voie descendante (nm)	1570-1580	ND*
Longueur d'onde voie montante (nm)	1260-1280	ND*
Budget optique (dB)	Classes N1, N2 et E	ND* (Overlay B+ possible)
Portée (km)	60km avec Δ de 20km	

*ND : Non Déterminé

Tableau 10 : Synthèse des propriétés du XGPON1 et XGPON2

3.2.1.3. Extension de portée pour le NGPON1

Les solutions d'extension de budget de type "Extender Box" n'ont été normalisées que par l'ITU-T pour le cas du GPON (G.984.6). Au niveau de la standardisation, il n'y a aucune action de l'IEEE sur le sujet.

La notion de Reach Extender peut aussi être déclinée pour les systèmes à 10Gbit/s de l'ITU-T. Mais un équipement spécifique au 10Gbit/s devra être inséré dans le réseau. Cet équipement ne pourra pas systématiquement être le même que celui du GPON.
Pour les variantes XGPON1 et XGPON2, le FSAN et l'ITU-T proposeront certainement une norme similaire à celle du G.984.6 basé sur l'extension de budget optique d'une classe initiale N1 (14-29dB).
D'un point de vue technologie, les solutions basées sur l'optoélectronique et sur l'amplification optique seront encore d'actualités. Aucune rupture technologique n'est nécessaire pour définir des "Extender Box" à 10Gbit/s.

N.B.: la notion d'Extender Box pour le NGPON2 ne peut pas être explicitée actuellement faute de définition sur les technologies du NGPON2.

Compatibilité ou substitution des EB GPON vers un NGPON1 étendu

Les solutions d'architecture GPON basées sur l'"extender box" G.984.6 sont pérennes vis-à-vis d'une migration NGPON1.

En cas de superposition de systèmes GPON avec Extender Box et de NGPON1, il est nécessaire de considérer quelle sera la solution d'extension de budget à mettre en œuvre pour chacun des deux systèmes.
Une première solution consiste à dédier une Extender Box à chaque génération de PON. Pour cela il faut séparer/combiner les canaux optiques respectifs du GPON (1310 & 1490nm) et du NGPON1 (1270&1577nm) grâce à 2 multiplexeurs optiques (filtre WDM) positionnés de chaque côté des Extender box dédiées aux 2 générations de PON. L'intérêt est de conserver l'extender box déjà existante pour le GPON. Pour faciliter cette migration, l'"extender box" GPON pourrait intégrer les filtres WDM et disposer dès l'origine des ports optiques permettant par la suite la connexion des Extender Box NGPON1.

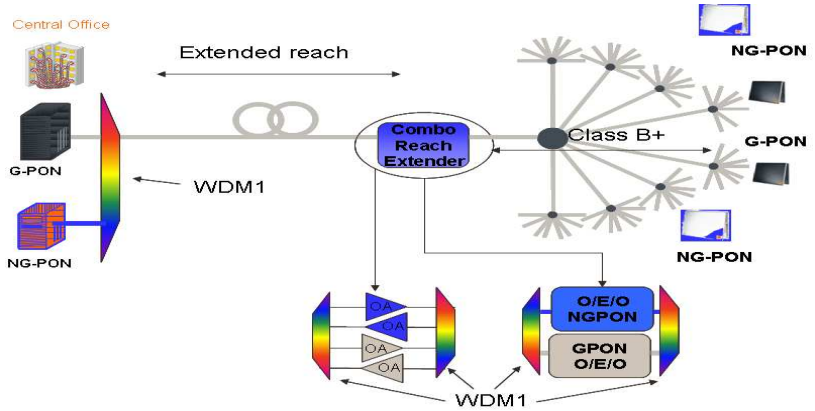


Figure 27 : PON avec superposition en λ des générations de PON et Extender Box

A terme, une solution de type "combo reach extender" combinant GPON et NGPON pourrait permettre l'extension du budget des deux générations de PON dans un seul et même équipement. La Figure 27 présente une architecture PON avec une superposition en longueur d'onde des générations de PON et d'Extender Box.

3.2.2. NGPON1 à l'IEEE

Du coté de l'IEEE, le standard 802.3av a été défini et fourni les spécifications associées au 10GEPON concernant la couche physique du modèle OSI, comme le décrit la Figure suivante.

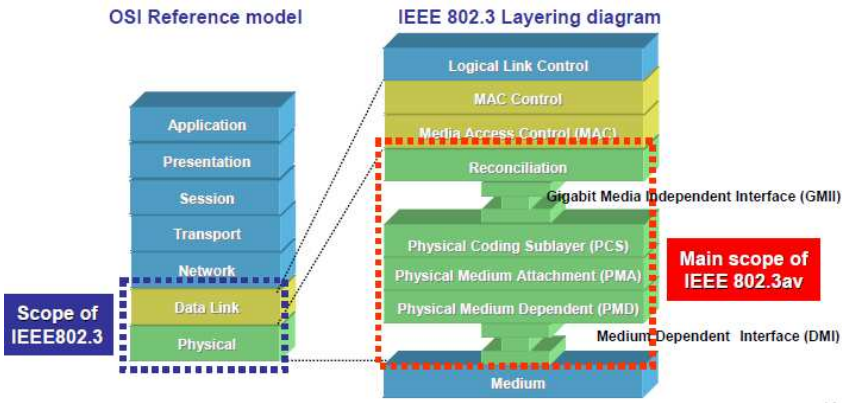


Figure 28 : Scope de l'IEEE 802.3av [20]

On y retrouve alors des spécifications allant du milieu de transmission (la fibre) à la couche MAC du 10GEPON.

3.2.2.1. Caractéristiques générales du 10GEPON

Le tableau ci-dessous présente les principales spécifications physiques du 10GEPON tirés du draft du standard en Juin 2009. Ce draft a été approuvé et aucune modification significative n'est prévue.

Description	Low Power Budget		Medium Power Budget		High Power Budget		Units
	PRX10	PR10	PRX20	PR20	PRX30	PR30	
Number of fibers	1						–
Nominal downstream line rate	10.3125						GBd
Nominal upstream line rate	1.25	10.3125	1.25	10.3125	1.25	10.3125	GBd
Nominal downstream wavelength	1577						nm
Downstream wave-length tolerance	–2, +3						nm
Nominal upstream wavelength	1310	1270	1310	1270	1310	1270	nm
Upstream wavelength tolerance	±50	±10	±50	±10	±50	±10	nm
Maximum reach[a]	≥10		≥20		≥20		km
Maximum channel insertion loss	20		24		29		dB
Minimum channel insertion loss	5		10		15		dB

[a]A compliant system may exceed the maximum reach designed for given power budget as long as optical power budget and other mandatory optical layer specifications are met.

Tableau 11 : Spécifications de l'IEEE du 10GEPON [20]

En résumé, ce tableau propose une synthèse sur les portées et taux de partage minimum :

	1:16	1:32
10km	PR10 , PRX10	PR20 , PRX20
20km	PR20 , PRX20	PR30 , PRX30

Tableau 12 : Synthèse des portées et taux de partage du 10GEPON

3.2.2.1.1. Débits

Deux gammes de débits en ligne sont étudiées :

- Débit asymétrique "PRX" : 10Gbits descendant et 1Gbit/s montant
- Débit symétrique "PX" : 10Gbit/s descendant et montant

Un FEC (Forward Error Correction) est utilisé pour relâcher les contraintes sur les spécifications des transceivers optiques. Le choix s'est porté sur le ReedSalomon RS(255,223) qui permet 1dB de gain supplémentaire comparé au classique RS (255,239). En effet ce nouveau code nécessite un taux d'erreur de $1{,}1.10^{-3}$ pour réaliser un taux d'erreur de 10^{-12} alors que le RS(255,239) nécessite $1{,}8.10^{-4}$. Cela implique un nombre de portes électroniques deux fois plus important pour l'encodeur et le décodeur.

3.2.2.1.2. Choix des longueurs d'onde

Le choix des longueurs d'onde est présenté dans le Tableau 11. Il est à noter que pour la voie montante, un plan de longueurs d'onde identique à la version 1Gbit/s (EPON) a été maintenu pour le 10GEPON asymétrique. Par contre, dans le sens montant à 10Gbit/s (version

symétrique 10GEPON), un choix différent a été fait sur un plan de longueurs d'onde plus restreint. En effet, les évolutions technologiques permettent cette restriction (IEEE n'a pu réviser son choix EPON). Cette restriction et le décalage à 1260-1280nm permet de libérer de la place dans le spectre montant pour une génération postérieure au 10Gbit/s.
Le choix du 10GEPON montant s'est porté sur le 1260-1280 nm qui permet de minimiser la dispersion chromatique et de maintenir à l'ONT des lasers à modulation directe à plus bas coût (DML). En effet ces lasers DML ont un chirp (paramètre relié à l'effet de la dégradation par la dispersion) plus élevé que les lasers EML (modulation externe).
Le schéma en Figure 29 présente la fenêtre de longueurs d'onde envisagée par l'IEEE pour la voie descendante. Elle a ensuite été restreinte pour toutes les classes symétriques et asymétriques **à 1575-1580 nm.** Cette fenêtre à forte valeur de dispersion chromatique (environ 20ps/nm/km) a amené le choix de laser à modulateur intégré EML (electro-absorption modulated Laser). Des solutions à base de compensation électronique de la dispersion ont été envisagées mais n'ont pas été retenues.

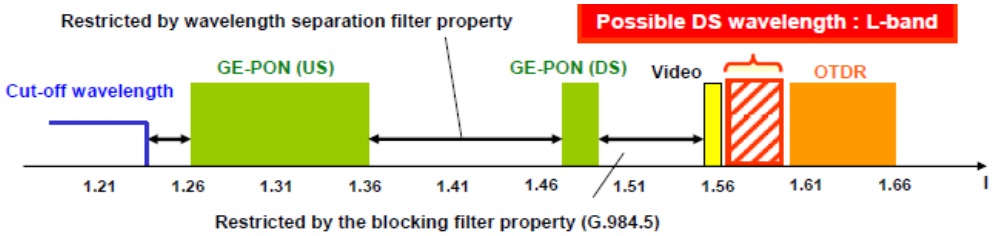


Figure 29 : Plan d'allocation des longueurs d'onde 10GEPON [20]

3.2.2.1.3. Gammes de budgets disponibles

Une synthèse est proposée en Figure 30.

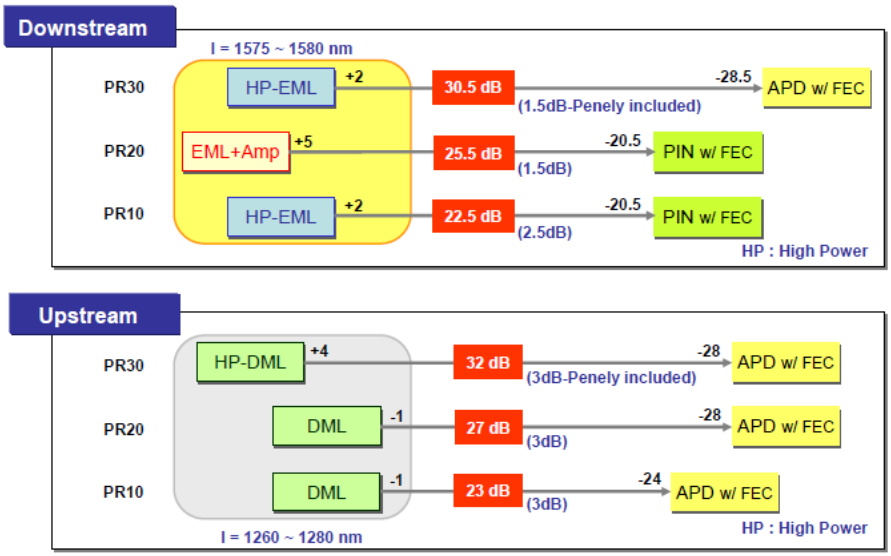


Figure 30 : Synthèse des différentes gammes de budget du 10GEPON [20]

Trois gammes de budget optique sont à l'étude:

- PR(X) 10: soit 5 à 20 dB prévue pour une portée de 10km
- PR(X) 20: soit 10 à 24 dB prévue pour une portée de 20km
- PR(X) 30: soit 15 à 29 dB prévue pour une portée de 20km.

La classe PR(X) 30 a été prévue particulièrement dans le cadre d'une compatibilité avec une infrastructure préexistante de classe B+ (mais la marge par rapport au B+ est seulement de 2dB ce qui peut s'avérer insuffisant dans certains cas). Attention l'option PRX30, contrairement au PR30 n'est pas superposable avec du GPON du fait des longueurs d'onde montantes identiques pour le GPON et le PRX30.

Le choix technologique d'un récepteur avec APD a été adopté pour les classes PR/PRX30 à l'ONT. Cela avec un laser de type EML (modulation externe) de forte puissance mais sans amplification.

3.2.2.1.4. Migration de l'EPON vers le 10GEPON

La migration à l'IEEE est vue par la capacité de l'équipement 10GEPON à émuler aussi l'EPON. C'est donc le remplacement des équipements de première génération par ceux de la seconde génération qui émulerait aussi la première génération (les cartes 10GPON devront générer des signaux EPON). Les figures ci-dessous présentent ce concept.

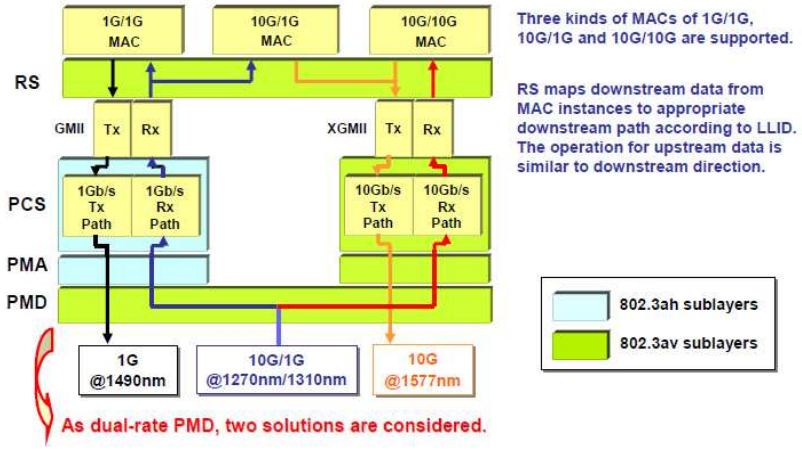


Figure 31 : Migration de l'EPON vers le 10GEPON [20]

Pour la voie montante, l'OLT 10GEPON doit pouvoir recevoir les burst optiques à deux différents débits 1Gbit/s et 10Gbit/s dans le cas symétrique du 10GEPON. Deux solutions technologiques sont offertes. Elles sont présentées dans la figure ci-dessous. En résumé, une solution à une ou deux récepteurs est possible.

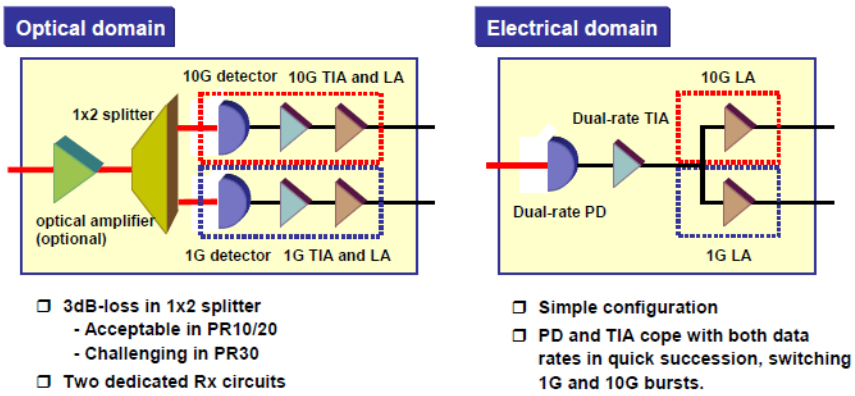


Figure 32 : Technologies de réception double-débit pour EPON et 10GEPON [20]

Il est important de noter que cette méthode de migration faisant cohabiter des ONT d'ancienne et de nouvelle génération revient à investir 2 fois pour une interface EPON car l'interface de la nouvelle carte "10GEPON" doit émettre et recevoir les deux types de signaux optiques EPON et 10GEPON.

3.2.2.1.5. Aspects extension de budget optique vu par l'IEEE

L'IEEE définit les interfaces d'un système Ethernet PON mais ne considère pas être dans ses préoccupations la définition d'une solution d'extension de budget (type Extender Box). Les raisons sont essentiellement dues au marché E-PON : technologies héritées du LAN, Boucle Locale courte distance au Japon…

3.2.3. Différentiateurs entre les normes ITU-T et IEEE

Les différenciateurs entre les normes proposées par l'IUT et l'IEEE se situent au niveau de plusieurs enjeux : l'interopérabilité, la migration, l'extension de budget, le choix des composant optiques, l'adéquation aux besoins opérateurs.

Interopérabilité

- Interopérabilité des solutions actuelles (GPON et EPON) :

Pour l'ITU-T : action en cours au FSAN sur ce sujet. un effort d'interopérabilité important et de spécifications communes à l'ensemble des opérateurs (CTS) a été réalisé pour diminuer les coûts en volume. Cela a été obtenu sur la couche physique et protocolaire en 2007, et s'est prolongé par la couche management. Ces points d'architecture ont été le cœur des travaux d'interopérabilité menés au FSAN et à l'ITU-T et devraient être finalisés fin 2009 / début 2010. Il faut rappeler ici que c'est l'abandon de la technologie ATM utilisée pour le B-PON, qui a généré l'essentiel des travaux d'interopérabilité au niveau du GPON. La poursuite de l'usage du GEM dans la technologie NGPON1 sera un facilitateur indéniable.
Pour être exploitable par FT et les opérateurs du FSAN, la décision a été prise de retenir une compatibilité totale avec les architectures définies au BBF TR156. Une migration douce GPON vers NGPON1 ne peut s'envisager qu'en continuité avec ces principes d'architecture et c'est pourquoi le FSAN envisage dès l'automne de lancer les travaux sur l'interopérabilité, bien que cela s'inscrive dans la continuité pour ce qui touche au niveau logique.

Pour l'IEEE deux fabricants de chipset fournissent l'ensemble des solutions déployées (Teknovus et PMC Sierra) ; aucune interopérabilité entre leurs implémentations de couche physique n'a pu être établie lors de plugtests (car leurs implémentations du standard présentent trop de différences, ainsi que sur le socle technologique cœur du système).
En effet la solution "Teknovus" est basée sur une allocation dynamique des liens logiques de services (LLID) entre les ONU et l'OLT (pas de scheduler) alors que la solution PMC Sierra établi un seul lien logique contenant tous les services priorisés à l'ONU à l'aide d'un scheduler.

- Interopérabilité des solutions 10Gbit/s :

Aucune action n'est menée pour l'instant à l'IEEE et l'ITU-T. Cependant les actions en cours au FSAN pour le GPON devraient êtres poursuivies pour le NGPON, alors que pour le 10GEPON l'interopérabilité est hors scope de l'IEEE. De la même façon que pour l'EPON, elle sera définie par les opérateurs et pourrait buter sur le même problème de chipsets incompatibles que pour l'E-PON.

Migration

- L'ITU-T prend en compte les contraintes des opérateurs qui souhaitent pérenniser et rentabiliser leur infrastructure pour développer une solution et une roadmap des solutions NGPON. L'IEEE construit une solution de migration par le remplacement des équipements actifs actuels par ceux de la génération suivante.
- Les PR30 et PRX30 de l'IEEE permettent l'utilisation de l'infrastructure de type class B+ que nous déployons (>28dB) et seul le PR30 pourrait être superposable en longueur d'onde avec un GPON. Pour autant le PR30 (10G-10G) n'est pas superposable avec le XGPON1 (10G-2,5G) (longueurs d'onde voie descendante identiques).

Extension de budget
Un effort à l'ITU-T/FSAN a été mené pour développer le portefeuille d'outils d'aide aux déploiements comme par exemple l'extender box (G.984.6).

Choix des composants optiques
L'IEEE a choisi des récepteurs APD plus coûteux que les PIN pour ses versions d'ONT PR/PRX30 sans FEC (29dB). Côté ITU-T, le choix a été fait d'un FEC downstream systématique obligatoire. ALU et Huawei affirment que l'APD n'est pas nécessaire et coûte plus cher. Un budget de 31 dB à 10Gbit/s peut être atteint avec une PIN et un transceiver haute puissance à base d'amplification optique côté OLT avec cependant pour condition de rentabilité d'avoir un minimum d'ONU raccordés par interface PON. Selon les estimations entre 13 et 24 ONU sont nécessaires.

Adéquation aux besoins opérateurs
Les standard de l'ITU-T prennent en compte un certains nombre de fonctionnalités "carrier class" ce qui n'est pas le cas pour les standards de l'IEEE. De ce fait, le choix IEEE impose à l'opérateur de rassembler des standards conçus indépendamment de la technologie PON ou de choisir des solutions propriétaires qui ne facilitent pas l'interopérabilité entre équipements.

3.2.4. Tableau de synthèse des standards du NGPON1

Nom Du standard	Débit total OLT -ONU (Gbit/s)	Débit total ONU - OLT (Gbit/s)	Longueur d'onde OLT-ONU (nm)	Longueur d'onde ONU-OLT (nm)	Budget optique (sans RE) (dB)	Taux de partage	Portée	Organisme & date
802.3av-PRX10	10,31	1,25	1577 (-2/+3)	1310 +/-50	5 - 20	16**	10 km	IEEE sept 2009
802.3av-PRX20					10 - 24	16**	20 km	
802.3av-PRX30					15 - 29	32**	20 km	
802.3av-PR10		10,31		1270 +/-10	5 - 20	16**	10 km	
802.3av-PR20					10 - 24	16**	20 km	
802.3av-PR30					15 - 29	32**	20 km	
XG-PON1	9,95 ou 10,31 (*)	2,488			N1 : 14 -29 N2 : 16 -31 E : 18 -33	Jusqu'à 256 (logique)	20-60 km	ITU-T mi-2010
XG-PON2		9,95 ou 10,31 (*)	ND	ND	ND		20-60 km	

ND : Non Déterminé
(*) Concernant le débit en ligne de 10Gbit/s pour le XGPON, deux possibilités sont envisagées : un débit en ligne de 10,31Git/s similaire à celui de l'IEEE et un débit en ligne de 9,95Gbit/s correspondant à 4 fois le débit effectif descendant (2.488Gbit/s) du GPON et plus proche du SDH et du 10GbE.
(**) Minimum spécifié par la norme, toutefois les implémentations industrielles peuvent aller au-delà (c'est le cas avec la norme IEEE 802.3ah concernant l'EPON avec un taux de partage minimum spécifié de 16 mais des implémentations industrielles allant jusqu'à 32, comme c'est le cas des équipements déployés au Japon).

Tableau 13 : Synthèse technique de la normalisation du NGPON1

3.3. NGPON2

Nous venons de voir que la normalisation du NGPON1 intègre une coexistence des réseaux et mène une migration lisse du GPON vers un NGPON, tout en restant basé sur une même infrastructure déployée. Par ailleurs, toujours dans une optique d'augmenter la bande passante proposée à l'utilisateur final, le NGPON2 prend en compte des solutions long terme qui devrait succéder au NGPON1 mais cette fois sans contrainte de coexistence obligatoire avec l'architecture préalablement déployée. Ainsi, cela permet de redéfinir des architectures de réseau qui utiliseront ou non les infrastructures présentes. Ainsi le NGPON2 se concentre sur des technologies bas-coûts et évolutives comme par exemple des PON TDM très haut débits (40Gbit/s ?), des PON WDM, des solutions hybrides de PON WDM-TDM, ou encore des solutions de multiplexages fréquentiel OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), etc.

Les études incluses dans le NGPON2 doivent être considérées comme des propositions de solutions qui mèneront à la définition d'une norme successive au NGPON1. Pourtant, le NGPON2 pourrait également succéder directement aux technologies GPON si l'avancement du déploiement actuel se trouvait ralenti et que le NGPON1 ne serait pas retenu pour en prendre la suite. Le FSAN prévoit un premier "white paper" pour mi-2010 et suppose une standardisation terminée pour fin 2015.

Dans ce cadre, ce paragraphe présente de nouvelles technologies en étude mondialement dans des laboratoires R&D, majoritairement par des acteurs du FSAN.

3.3.1. Convergence des réseaux

Dans le cas où une infrastructure fibre est déjà déployée, il sera tout de même intéressant de conserver ces canaux de transmission, pour des raisons économiques évidentes. La convergence des réseaux, entendue dans le NGPON2 ne se limite pas comme le NGPON1 à une migration des technologies vers une base GPON selon la norme G984.5.

3.3.1.1. Convergence des topologies (PtP et PtMP)

On peut ainsi imaginer de nouveaux terminaux à l'ONT et/ou à l'OLT qui intègreront aussi bien des émetteurs/récepteurs Point-à-Point (PtP) ou Point-à-Multi-Point (PtMP) tel que le montre la Figure 33.
L'intérêt de tels centraux sera d'autant plus fort si les collectivités locales choisissent différentes topologies pour leurs réseaux.

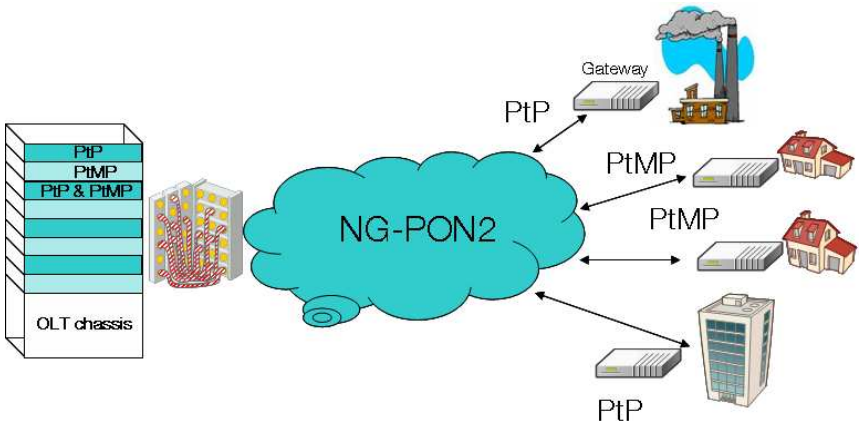


Figure 33 : Convergence des topologies dans le cadre du NGPON2

La transparence à la topologie sera notamment largement facilitée par l'intégration de couches MAC sur les transceivers de type "pluggable" comme des SFP à l'OLT ou des SFF à l'ONU.

3.3.1.2. Convergence des technologies

La notion de multiservice devrait prendre de l'importance dans le futur et son accès demanderait à être simplifier. Ainsi on peut imaginer une convergence des technologies de l'accès fixe (FTTx ou xDSL), de l'accès Mobile et des réseaux dédiés aux entreprises, mais aussi une mutualisation des équipements de transmissions de données tramées ou non tramées comme le Digital Radio Over Fiber (D-RoF).

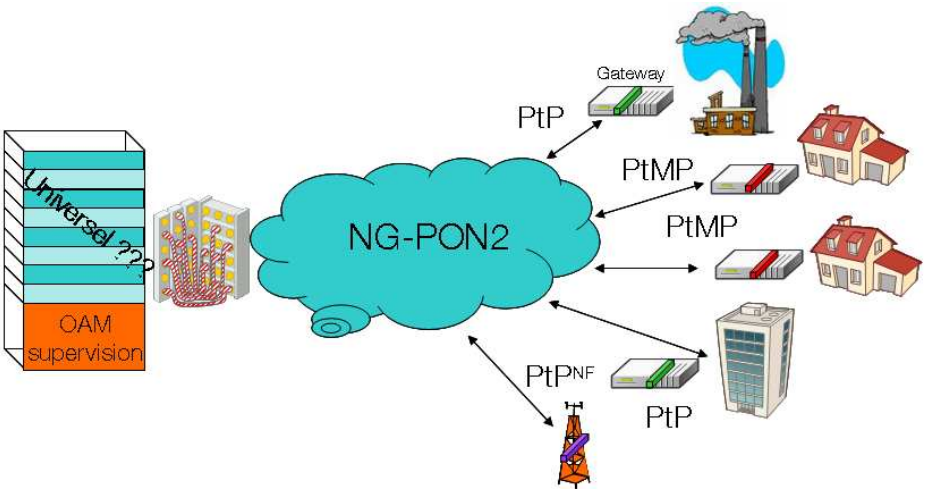


Figure 34 : Convergence des technologies dans le cadre du NGPON2

Les OLT et ONT NGPON2 pourraient avoir besoin de flexibilité en termes de connectivité, débit, protocole et une supervision globale ou OAM.
Si on considère des ports OLT universels, une allocation dynamique de connexion (en longueur d'onde ou en temps) pourrait être définie selon le type d'utilisateur.

Toutes ces idées sont à ramener au rang de suppositions tant le NGPON2 reste technologiquement ouvert à l'heure actuelle. Malgré cela, des nouvelles technologies et architectures émergent dans ce sens, non seulement en discussion au FSAN mais aussi en test en laboratoire voire en l'état de prototype.

3.3.2. le WDM-PON

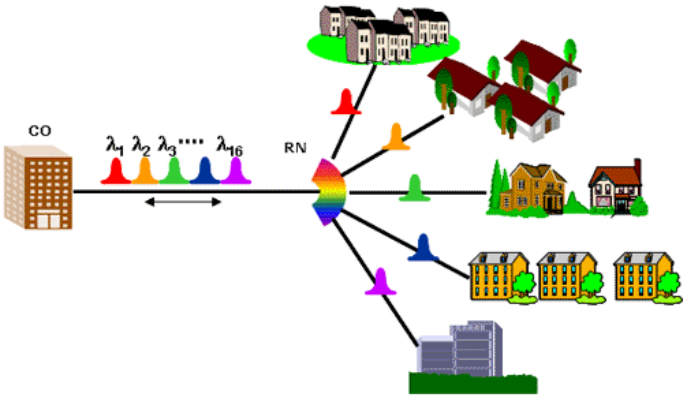


Figure 35 : Architecture WDM-PON

Parallèlement aux technologies GPON ou GEPON, le PON WDM basé comme son nom l'indique sur un multiplexage en longueur d'onde s'est développé sans pour autant faire l'objet de normalisation. Basé sur une topologie différente du PON TDM, le PON WDM (principe décrit en section 1.2.3.3) pourrait s'appliquer dans une nouvelle zone ouverte au FTTx. Cette technologie est donc envisagée dans le cadre du NGPON2.
En effet, l'avantage apporté par les systèmes WDM se porte sur l'augmentation de bande passante de l'utilisateur. En allouant une longueur d'onde par client, il permettra de délivrer de nouveaux services très haut débits et d'atteindre facilement le gigabit chez l'abonnée. Ainsi, bien que n'appartenant à aucun standard défini, certains fournisseurs et opérateurs comme LG-Nortel,

Novera, Genesxis, KoreaTelecom, NTT, ETRI ont développé un certain marché du WDM-PON.
Comme le montre la Figure suivante, plusieurs projets ont déjà étés lancés majoritairement en Asie. Ainsi Korea Telecom a déployé depuis 2005, 150 000 lignes WDM en FTTC ou FTTH, proposant des offres d'accès de 100Mbit/s ou 1Gbit/s par longueur d'onde. Cette activité est également présente en Europe (Norvège et Pays bas), avec une offre à 100Mbit/s sur quelques centaines de lignes pour des clients entreprises ou résidentiels. Aux Etats Unis, un projet pilote du même type a également été lancé en 2009.

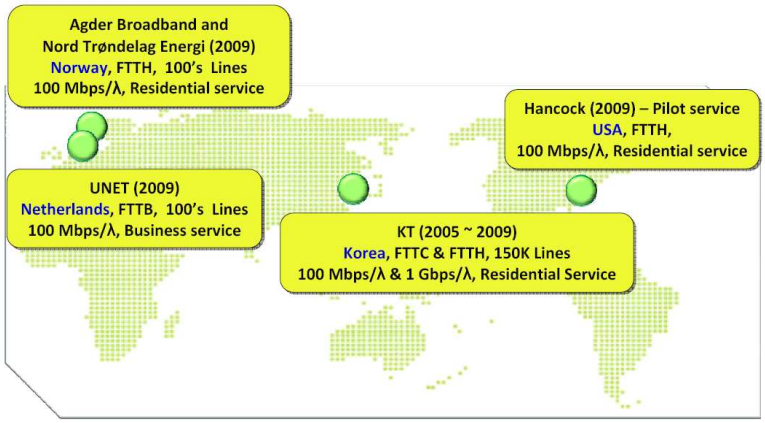


Figure 36 : Déploiement mondial du PON WDM [21]

Cependant, l'inconvénient principal de l'utilisation du WDM provient du coût supplémentaire imposé au réseau. Il est reconnu que les PON WDM sont considérablement plus coûteux à implémenter et requièrent un fonctionnement précis ainsi qu'une grande stabilité en longueur d'onde or celle-ci peut varier selon la température ambiante chez l'utilisateur. Ainsi l'un des challenges techniques du WDM est d'avoir pour chaque ONU un émetteur optique stable et un récepteur achromatique, tous deux bas-coût
Pour répondre à ce dernier problèmes, plusieurs solutions d'ONU achromatiques sont proposés comme une source large bande [22], un laser Fabry Pérot (FP) [23] à source d'injection, un Amplificateur à Semi-conducteurs Optique Réflectif (RSOA) [24] ou encore l'utilisation de sources accordables en longueurs d'onde [25].

Les sources larges et les Fabry-Pérot à injection sont désignées comme les solutions les moins couteuses et sont déjà commercialisés pour des PON WDM. Cependant, ces solutions sont limitées à un débit de l'ordre de 1Gbit/s à cause du bruit intrinsèque des lasers FP, des fluctuations de puissance optique des sources larges basées sur le découpage du spectre (Spectrum Slicing), ou encore des fortes pertes de puissances induites par le découpage du spectre optique.

Par ailleurs, l'idée d'un ONU à base réflective est très intéressante d'un point de vue recherche car elle ouvre énormément de possibilités. Cela permet d'éliminer l'utilisation d'une source laser à l'ONU, évitant ainsi l'instabilité en longueur d'onde des lasers bas-coûts du terminal client. Cependant, le principal inconvénient de cette solution réflective est la rétrodiffusion de Rayleigh [26]. Cet effet est généré par le signal venant de l'OLT et destiné à être modulé en retour au niveau de l'ONU. La rétrodiffusion de Rayleigh est alors présente dans un sens identique au signal montant, à l'entrée de la fibre incidente sur le récepteur.

Une autre approche plus prometteuse pour les PON-WDM est l'utilisation de lasers accordables en longueur d'onde et/ou filtres. Les lasers accordables font toujours l'objet d'études et leur coût

restent pour l'instant bien trop élevé. Cependant, à long terme, cette solution proposera sans doute les meilleures performances pour un maximum de canaux WDM.

Le tableau suivant résume les performances techniques relevées en 2009 pour chaque technologie d'ONU qui viennent d'être décrites.

ONU du PON WDM	Fabry -Pérot à injection		RSOA	Laser accordable
Débit / λ	125Mbit/s	1,25Gbit/s	1,25Gbit/s	1,25Gbit/s
Canaux WDM	32	16	16	16
Espacement inter-canal	100GHz	200GHz	200GHz	200GHz
Longueur de transmission	40km	20km	20km	20km
Budget optique	12dB	< 10dB	< 10dB	< 25dB
Etat de déploiement	Commercialisé	Pilote	Pilote	en R&D
Industriels présents	LG-Nortel, KAIST		ETRI	ETRI, Chemoptics

Tableau 14 : Performances WDM relevées par technologies d'ONU

Le PON WDM propose donc plusieurs techniques qui permettront d'augmenter la bande passante de l'abonné. Il sera cependant utilisé massivement uniquement si son coût de déploiement se rapproche de celui du 10GPON et si de nouveaux services viennent à requérir plus de bande passante que le 10GPON ne peut déjà offrir.

3.3.2.1. Réseaux PON hybrides WDM-TDMA

Le concept de l'architecture du réseau PON, dans la majorité des opérations de déploiements en cours en Europe, aux USA et en Asie, repose sur le partage temporel d'une seule longueur d'onde entre plusieurs utilisateurs. Pour augmenter la bande passante allouée à chaque utilisateur, le mariage entre le partage temporel et le partage en longueur d'onde dans la même architecture représente une des solutions futures pour la nouvelle génération du réseau d'accès NGPON2. On parle alors d'un PON hybride WDM/TDM. Il est important de noter que l'avènement du WDM dans le réseau d'accès ne pourra se faire brusquement. En effet, il est essentiel pour les opérateurs et fournisseurs d'accès, qui développent actuellement le réseau PON TDM, de rentabiliser le réseau en cours de déploiement et donc de réintégrer les équipements déjà installés dans la nouvelle génération. La Figure 37 illustre un futur réseau PON de type hybride intégrant le multiplexage en longueur d'onde et le multiplexage temporel.

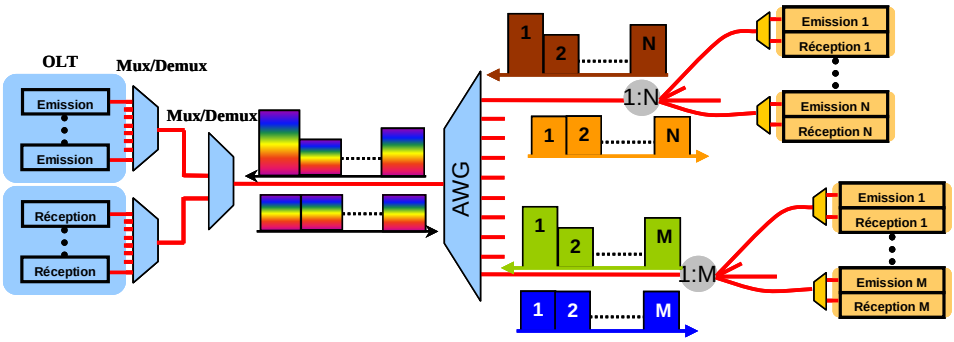


Figure 37 : Architecture d'un réseau PON hybride WDM/TDM

Ce type d'architecture permettra de mutualiser le nombre de kilomètres de fibre parcourue par plusieurs réseaux TDM ainsi que la concentration de tous les OLT dans le même central. Des

études sont menées sur des PON hybrides avec un débit de transmission à 10Gbit/s et un nombre de clients desservis qui s'élève à 1088 pour une portée de 110km [27].
La notion d'ONU achromatique citée au paragraphe précédent, entre tout à fait en jeu dans ce cadre d'architecture. De même, l'introduction de l'amplification optique avec un taux de partage aussi important et une portée autour de 100km est tout à fait envisageable.

SARDANA (Scalable Advanced Ring-based Passive Dense Access Network Architecture)

Le projet Européen ICT-SARDANA du FP7 [28] s'intéresse au futur réseau d'accès utilisant un multiplexage hybride WDM-TDM, et étudie une architecture basée sur un anneau WDM avec des nœuds de distribution d'arbres TDM.
Ce projet Européen a pour objectif d'étudier et éventuellement de construire un réseau d'accès qui permettra d'apporter une réelle bande passante au plus grand nombre d'utilisateurs, de manière illimitée sans frais supplémentaires, dans (et au-delà) le cadre du NGPON2.

Son acronyme révèle ses principales fonctionnalités :

- Evolutivité (**S**calable) :

Sardana est capable de servir plus de 1000 utilisateurs avec un débit symétrique de 300Mbit/s par utilisateur, répartis sur des distances s'étendant jusqu'à 100km, d'une manière flexible.

- Avancé (**A**dvanced) :

Pour atteindre les objectifs du projet, une série d'innovations est proposée et mise en œuvre:

- L'adoption et l'adaptation des nouveaux composants optoélectroniques, comme les amplificateurs optiques à semi-conducteurs réflectifs (RSOA), les amplificateurs à fibre dopée pompés à distance (ROPA), le décalage en longueur d'onde, etc
- De techniques de traitement du signal et de communication, comme des formats de modulation optique orthogonale (OFDMA) qui permettent de réutiliser le même domaine de longueurs d'onde en aval et en amont, de l'égalisation électronique non-linéaire des différentes déficiences optiques actuelles (dispersion chromatique, chirp…), et un multiplexage hybride du signal (en longueur d'onde et dans le domaine temporel, en acheminant les paquets optiques sans collisions ou retards).

- Architecture passive en anneau (**R**ing-Based Passive) :

La topologie du réseau est hybride avec un anneau central WDM, afin d'offrir une protection instantanée de la communication en cas de coupure de fibre, et une distribution en arbres TDM jusqu'au domicile. A l'intersection du WDM et TDM, des nœuds contrôlés à distance effectuent les fonctions de routage en longueur d'onde par insertion et extraction (add & drop). De l'amplification optique peut également être présente dans ces nœuds. Dans ce cas, on considère l'intégration d'un ROPA dont le module de pompage optique est placé au central, seule la fibre dopée est présente dans ce nœud ce qui permet de conserver une architecture passive.

- Architecture pour un réseau d'accès dense (Dense Access Network Architecture) :

Cette fonction est liée au concept de la densité des utilisateurs dans une zone (définie en section 1, page 15). Cette architecture peut alors se développer sur un scénario rural s'étendant sur une centaine de kilomètres, mais favorise un scénario urbain avec plusieurs milliers de foyers à connecter sur une zone restreinte à quelques kilomètres.

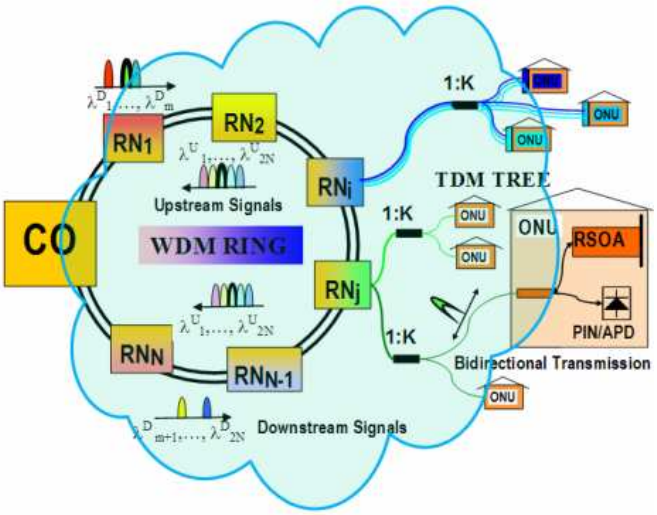


Figure 38 : Schématisation du projet SARDANA [28]

SARDANA fournit ainsi une voie d'évolution pour le courant G/EPON en incorporant également des fonctionnalités de réseaux métropolitains, et permet d'envisager une convergence métro-accès [29].
Un prototype de ce réseau doit être testé courant 2010 par les différents acteurs du projet.

3.3.3. Le PON OFDMA

Une nouvelle architecture de PON qui est de plus en plus soutenue et développée par les acteurs du futur réseau très haut débit est basée sur le multiplexage en fréquence orthogonale dit OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

OFDM

L'Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) est une version optimale du système de transmission multi-porteuse dont l'histoire remonte au milieu des années 1960. Bien que le concept de l'OFDM existe depuis longtemps, il n'a été que récemment reconnu et adopté comme une technique efficace pour la transmission haut débit bidirectionnelle des communications radio, et étudié pour le transport de données par transmissions optiques. Le Wimax, la radiodiffusion sonore numérique (DAB), la Diffusion Vidéo Numérique Terrestre (DVB-T), et la nouvelle génération de communications mobiles (4G) sont quelques-unes des nouvelles normes émergentes qui utilisent l'OFDM [30].

En principe, l'OFDM répartit les données devant être transmises sur un grand nombre de porteuses fréquentielles, dont le nombre se situe généralement entre 50 et 1000 et peut atteindre parfois plusieurs milliers. Par exemple, la norme DVB-T possède des options pour l'utilisation de 1705 ou 6817 porteuses. La quantité effective de données à transporter par chacune de ces porteuses est donc réduite d'autant. Un choix approprié de l'espacement entre porteuse assure l'orthogonalité de celles-ci et permet d'obtenir une grande efficacité spectrale. Le démodulateur destiné à traiter l'une des porteuses ne "voit" pas les autres porteuses, même si il n'y a pas de filtrage et si leurs spectres se chevauchent. Il n'y a donc pas de diaphonie ou d'interférence entre les porteuses. Grâce à cette caractéristique, le format de modulation OFDM est très tolérant à la dispersion chromatique dans la fibre.

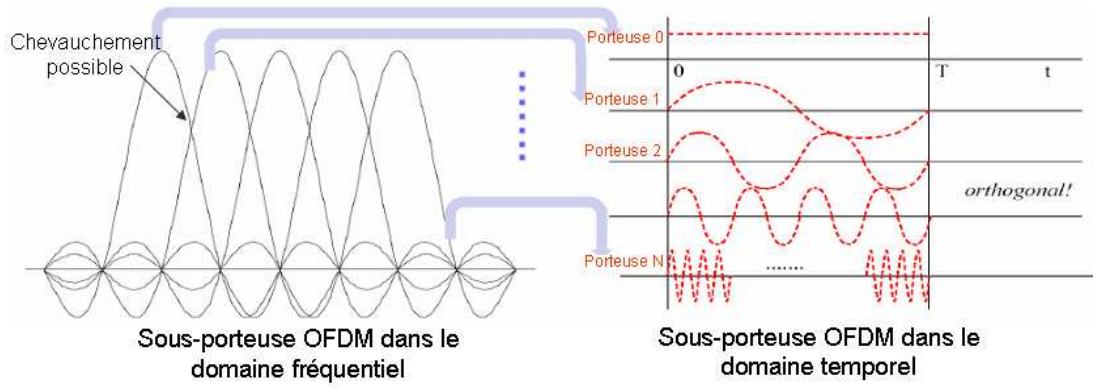


Figure 39 : Principe de multiplexage OFDM en sous porteuses [31]

L'inconvénient des systèmes OFDM est leur complexité en raison de la nécessité de nombreux modulateurs, filtres et démodulateur au récepteur. Au fil des ans, l'intérêt pour l'OFDM s'est renforcé avec l'amélioration du traitement numérique du signal. Le processus très complexe de modulation (et démodulation) de centaines de porteuses simultanément est désormais équivalent à une opération de Transformée de Fourier discrète, pour laquelle des algorithmes efficaces "Fast Fourier Transform (FFT)" existent. Ainsi, les implémentations des circuits intégrés de modulateurs et démodulateurs OFDM sont réalisables à prix abordable pour une production massive d'émetteurs et récepteurs.

En effet, la technologie OFDM a été initialement conçue comme une méthode de modulation afin d'améliorer les propriétés de transmission de données. Elle est basée sur l'utilisation de plusieurs sous porteuses à faible débit, portant chacune simultanément des symboles différents à des formats de modulation conventionnels ou avancés [32,33,34], comme la modulation de phase Phase Shift Keying (PSK) ou la modulation d'amplitude Quadrature Amplitude Modulation (QAM).

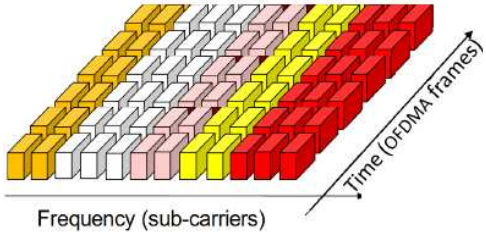


Figure 40 : Codage des sous porteuses OFDM [31]

Cas de l'AMO-OFDM

Les systèmes classiques OFDM utilisent une constellation fixe dans toutes les sous-porteuses. Ainsi, leurs performances en taux d'erreur binaire souffrent du chargement fixe des sous-porteuses. Une solution pour améliorer le taux d'erreur du système est d'effectuer une allocation adaptative des bits, où la modulation de chaque sous-porteuse varie en fonction du SNR de chaque canal de transmission.

Cette technique de Modulation Optique Adaptative OFDM (AMOOFDM) est connue sous le nom de modulation Discrete Multi-Tone (DMT) pour les techniques xDSL.

Plus tard, l'OFDM a trouvé une application très intéressante en tant que transmission permettant un accès multiple OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ou les différents utilisateurs sont affectés aux différentes sous-porteuses OFDM et tous les flux de données sont

multiplexés et transmis à travers la même ligne simultanément. Une architecture d'OFDMA-PON est représentée sur la figure ci-après.

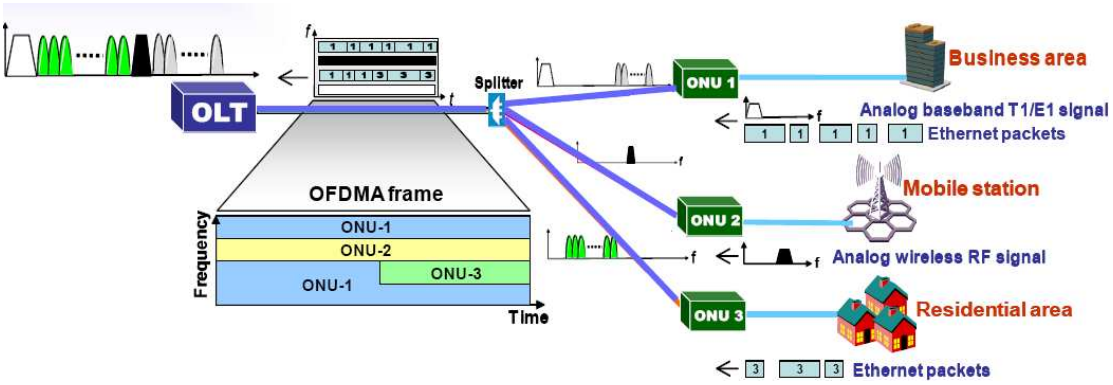
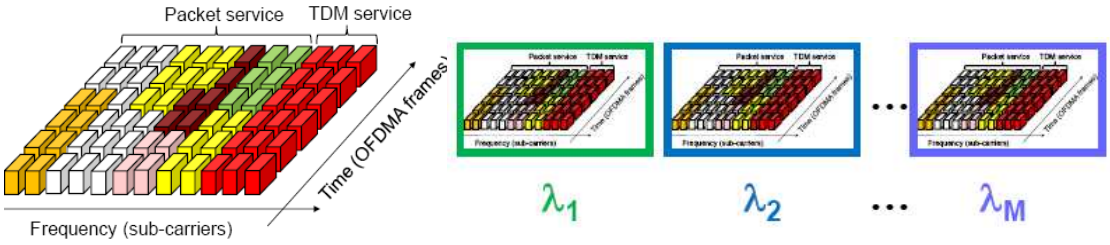


Figure 41 : Schématisation d'un PON OFDMA [31]

Pour la transmission descendante, le laser est partagé à travers tout le réseau d'accès tout comme le signal modulé, qui peut contenir tous types de signaux (FTTx, sans fil ou DSL). Le signal est diffusé à tous les utilisateurs par l'utilisation de coupleurs passifs. À la réception pour l'utilisateur, le récepteur démodule les données au sein de leur spectre alloué à chaque type de service.

Pour la transmission montante, différentes longueurs d'onde sont alloués aux différents services. La même longueur d'onde est appliquée à tous les abonnés FTTH et différentes longueurs d'onde sont affectées aux utilisateurs pour d'autres types d'accès (xDSL ou mobile). Après démultiplexage des services, la réception au central se fait par une photodiode APD ou PIN.



(a) **(b)**

Figure 42 : Combinaison OFDM + TDM (a) et OFDM + TDM +WDM (b) [31]

Une combinaison de plusieurs techniques de multiplexage peut également être envisagée :

- OFDMA + TDMA PON (Figure 42 (a)) : A chaque utilisateur différent est assigné une sous-porteuse OFDM et un intervalle TDM différent dans la même bande OFDM. Ainsi on obtient une allocation de la bande passante à deux dimensions.
- OFDMA + TDMA + WDMA PON (Figure 42 (b)) : A chaque utilisateur on peut assigner différentes sous-porteuses OFDM, intervalle TDM et longueur d'onde WDM.

Ce type d'architectures OFDMA-PON présente l'avantage d'offrir des performances nettement améliorées par rapport aux solutions PON existantes ou à venir (par exemple en termes de flexibilité d'allocation de bande passante, de complexité du système, du nombre d'utilisateurs, de la portée du réseau et de coût). Par ailleurs, l'OFDMA-PON permet également d'entrevoir la possibilité d'une convergence entre les réseaux d'accès optique, radio ou cuivre, pour lesquels ce type de multiplexage est déjà utilisé. Pour ces raisons, l'OFDMA-PON fait partie des axes d'étude entrant dans le cadre du NGPON2.

3.3.4. Autres technologies en discussion pour le NGPON2

D'autres solutions d'accès multiples font également partie du cadre d'étude du NGPON2 :

- Le PON OCDMA pour Optical Code Division Multiplexing Access (temporel ou en longueur d'onde ou encore hybride)
- Le Réseau à multiplexage de sous-porteuses (SCM)
- Le réseau à Commutation de paquets optiques [35]

Nous n'avons pas évalué l'extension de portée de réseaux d'accès utilisant ces techniques, leur description n'est alors pas détaillée dans ce manuscrit. Par ailleurs, les techniques de multiplexage OCDMA et SCM ont déjà fait l'objet de descriptions détaillées dans le rapport de thèse de Z.Belfqih [36]. De plus, l'Annexe 2 développe brièvement la technique d'un réseau à commutation de paquets optiques.

Résumé du Chapitre 1

Ce chapitre a permis de dresser un panorama du réseau d'accès optique et de son évolution. Les liaisons haut débit, des technologies cuivres aux technologies optiques, sont décrites afin de démontrer les besoins du réseau d'accès optique déployé aujourd'hui dans le cadre du FTTx. L'état d'avancement de ces déploiements en France mais aussi au niveau mondial, est détaillé. Cela a permis de mettre en évidence l'intérêt des utilisateurs et des opérateurs pour le développement d'un réseau fibré jusqu'au foyer.

Les technologies utilisées pour ces déploiements sont décrites : au niveau des topologies on distinguera alors le Point-à-Point du Point-à-Multipoint ou encore différentes techniques de multiplexage : temporel (TDM) ou en longueur d'onde (WDM). Par ailleurs, la topologie Point-à-Multipoint a été choisie par plusieurs opérateurs de télécommunications dont France Telecom sous la forme de la technologie GPON (Gigabit Passive Optical Network) qui est basée sur un multiplexage temporel des signaux montants (des utilisateurs au central).
Ce type de réseau fait alors l'objet d'une description détaillée : il permet pour un budget optique de Classe B+ de desservir à partir d'un central optique (OLT) jusqu'à 64 clients (ONT) sur une architecture comprenant 20km de fibre et deux coupleurs optiques 1 vers 8.
Au niveau protocolaire, le GPON diffère d'autres technologies point-à-multipoint, comme le BPON ou l'EPON, principalement par sa méthode d'encapsulation des données, basée sur un protocole GEM.

Ayant reporté les paramètres du GPON définis par les normes G984.x à l'institut de normalisation ITU-T, nous avons choisi de prêter une attention particulière à la norme G984.6 qui introduit l'extension de portée des systèmes GPON. En effet, l'architecture GPON ainsi déployée demande à être optimisée selon les démographies des zones à couvrir. S'exprime alors un besoin supplémentaire de budget optique, afin de permettre une portée plus longue, un taux de partage plus élevé ou encore une plus grande flexibilité de l'architecture GPON.
Le chapitre 2 traitera alors en détails des solutions d'amplification du budget optique spécifiées par ce standard.

A plus long terme, avec l'arrivée de nouveaux services de plus en plus gourmands en bande passante, les réseaux d'accès optiques déployés dans quelques années devront fournir des débits de plus en plus élevés aux utilisateurs. On parle alors de Nouvelle Génération de PON "NGPON" qui se compose d'une solution à moyen terme NGPON1, normalisée en 2009 et 2010 (par l'IEEE pour le 10GEPON et par l'ITU pour le 10GPON) et d'une solution à plus long terme NGPON2 qui reste très ouverte car encore à l'heure des prémices de la normalisation. On y parle notamment de PON WDM, ou de multiplexage hybride WDM-TDM sur PON, ou encore de PON OFDMA.
Le Chapitre 3 sera consacré ainsi à l'extension de portée de ces nouvelles générations de réseau d'accès optique.

Chapitre 2

Extension de portée de systèmes G-PON

SOMMAIRE DU CHAPITRE 2

Introduction 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 82
1.3. Evaluation du budget supplémentaire nécessaire 84

2. Technologies d'Extender Box 85

2.1. L'amplification optique 85
2.2. Les répéteurs OEO 92

3. Evaluation d'Extender Box sur GPON 99

3.1. Critère de qualité d'une transmission optique 99
3.2. Première évaluation en mode continu 101
3.3. Evaluation sur GPON commercialisés 106

Résumé 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

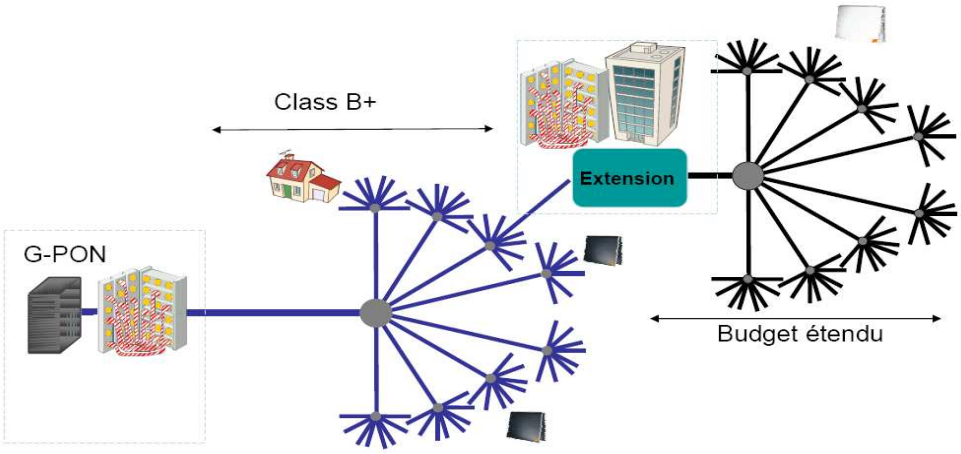


Figure 43 : Implémentation de l'Extender Box une architecture GPON

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.

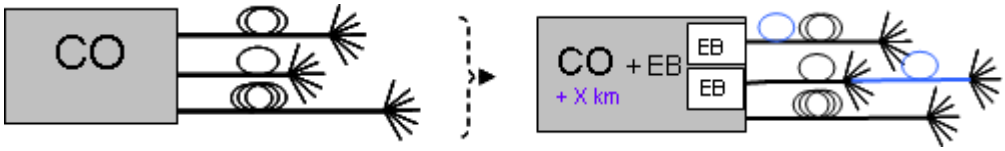


Figure 44 : Schématisation de l'augmentation de portée du GPON

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.

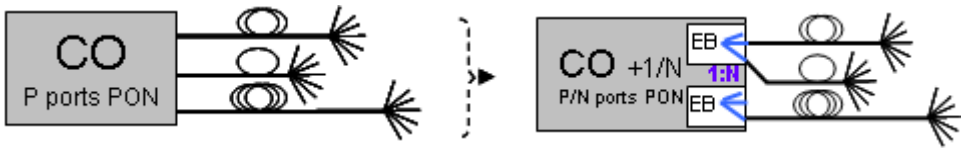


Figure 45 : Schématisation de l'augmentation du taux de remplissage du GPON

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.

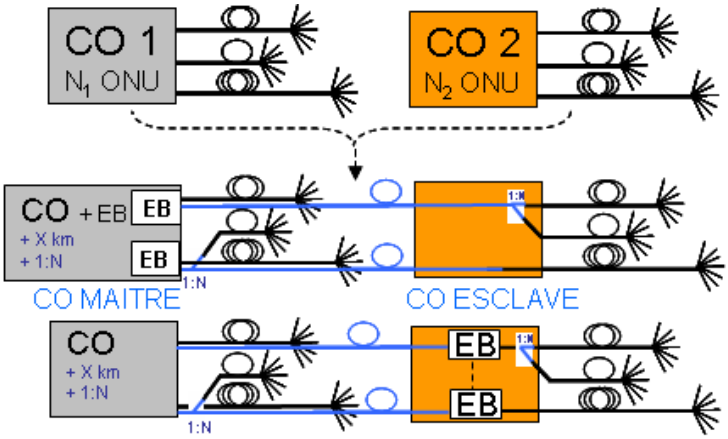


Figure 46 : Schématisation de la remontée des centraux vers le réseau de collecte

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.

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 l'éligibilité	+ 3 à + 12dB	Extender Box / Classe C+
Remonter l'OLT	+25 à +30dB	Extender Box en ligne

Tableau 15: Evaluation du budget supplémentaire nécessaire selon l'objectif

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.

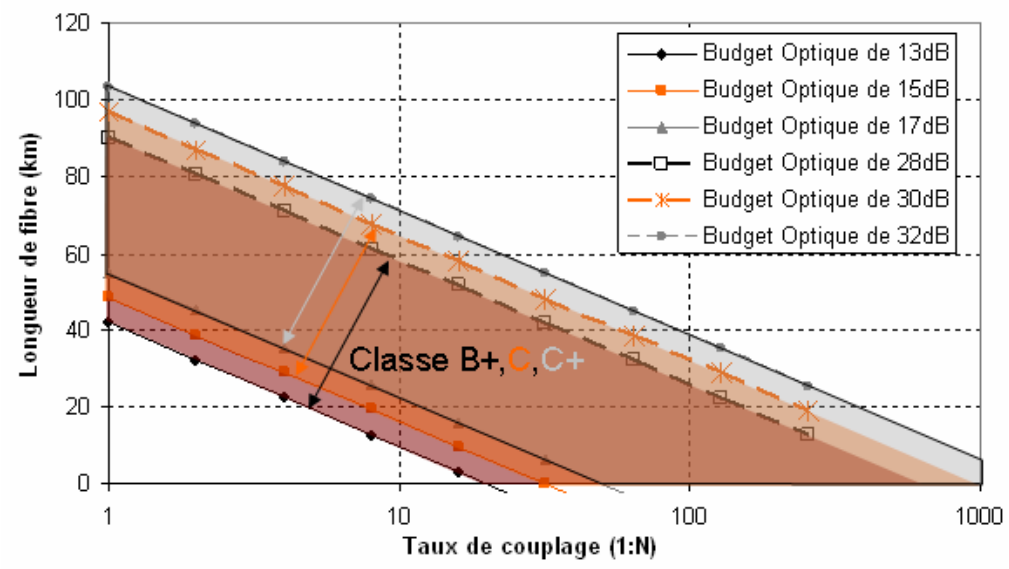


Figure 48 : Exploitation du budget optique en longueur de fibre ou taux de couplage

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 optique[7]

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.

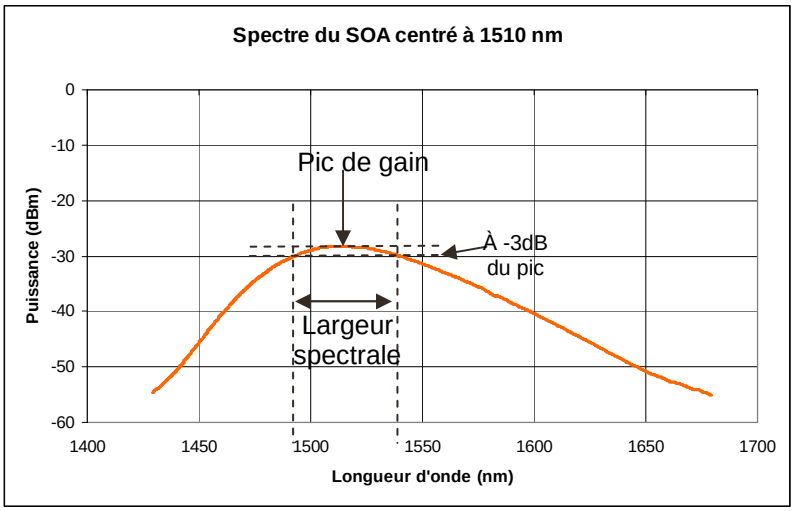


Figure 49 : Relevé de spectre d'un amplificateur centré à 1510nm

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]:

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

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

ν_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.

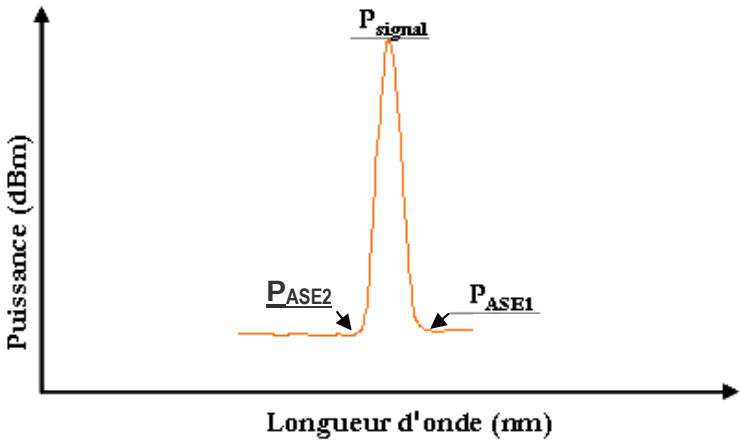


Figure 50 : Mesure du NF à partir du spectre optique relevé sur l'OSA

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.

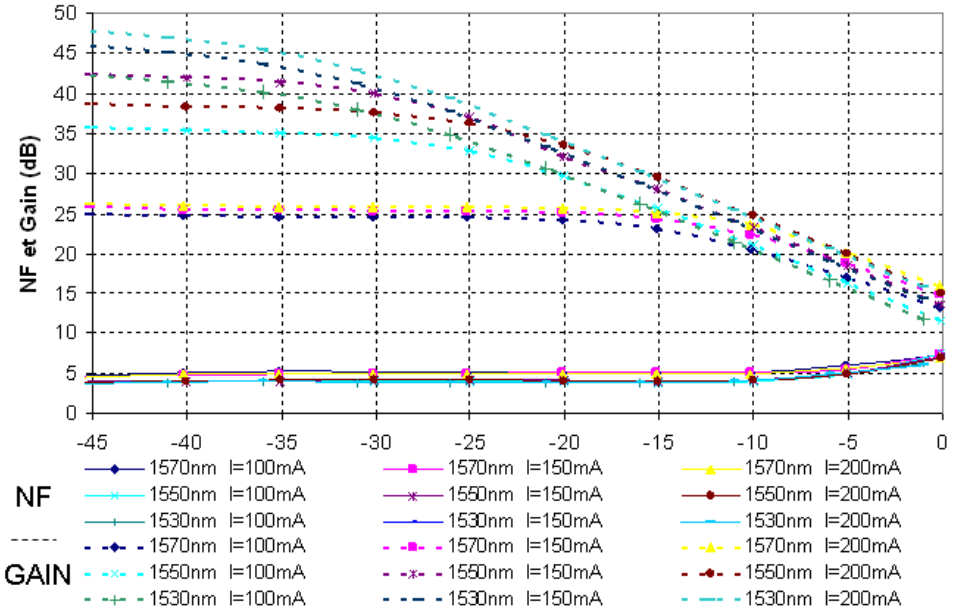


Figure 51 : Courbe de NF et gain en fonction du courant de pompe et de la longueur d'onde

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.

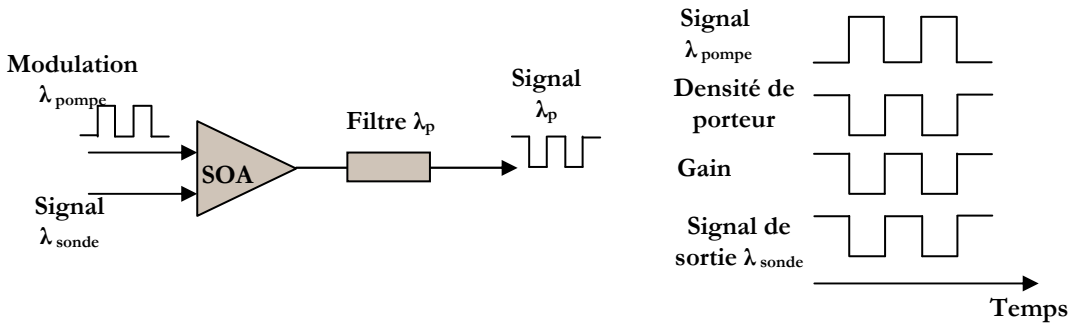


Figure 52 : Principe de la modulation de gain croisée dans un SOA

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).

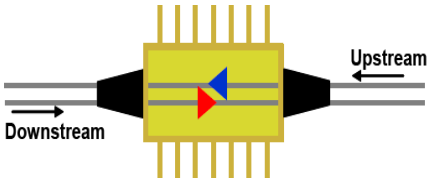


Figure 53 : Schéma d'un Double SOA [42]

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.

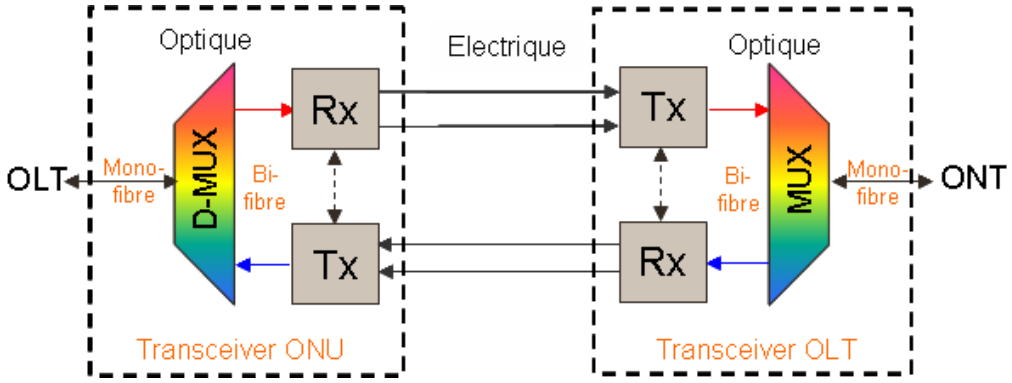


Figure 54 : Schéma de fonctionnement d'un répéteur OEO

2.2.2. Sélection des transceivers OEO

La performance des répéteurs OEO 2R ou 3R est liée au choix des modules d'émission-réception 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.

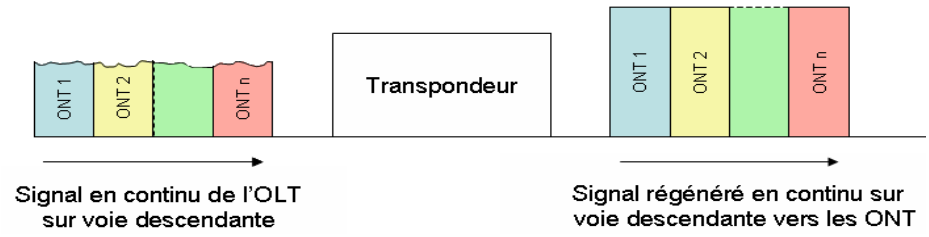


Figure 55 : Régénération des signaux sur la liaison descendante

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.

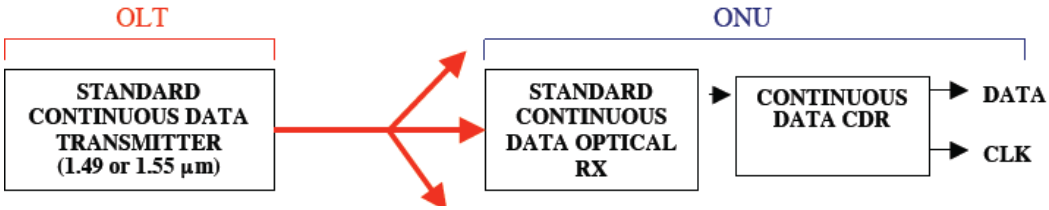


Figure 56 : Emission et réception des signaux descendants [49]

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.

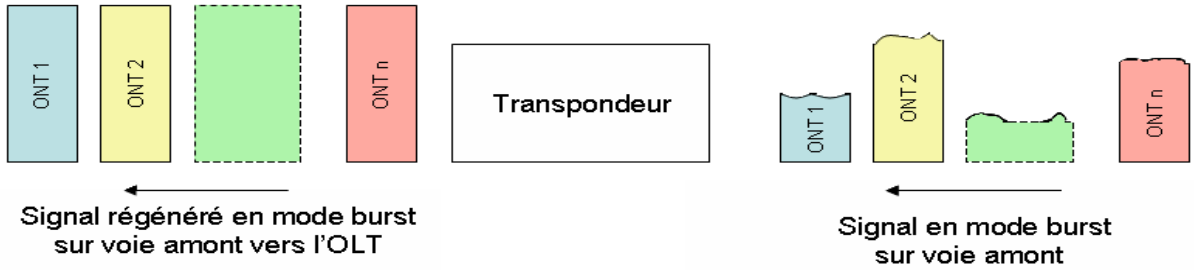


Figure 57 : Régénération des signaux en mode burst sur la voie montante

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.

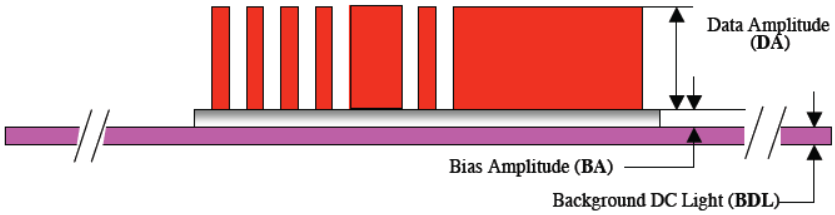


Figure 58 : Modulation à l'ONU des signaux montants [49]

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 photo-courant 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.

2.2.2.2.2. Récepteur mode burst à l'OLT

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

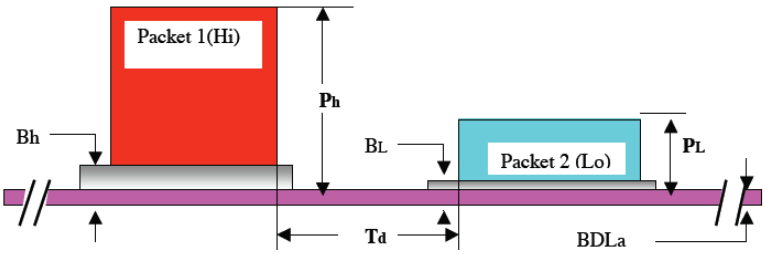


Figure 59 : Réception à l'OLT des signaux montants [49]

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

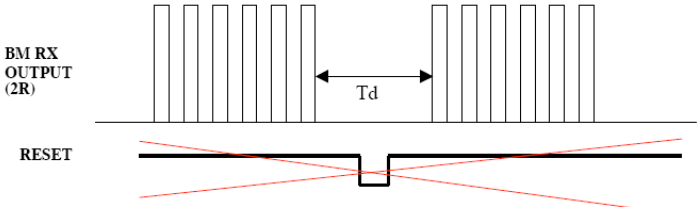


Figure 60 : Signal de Reset pour la réception mode burst [49]

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.

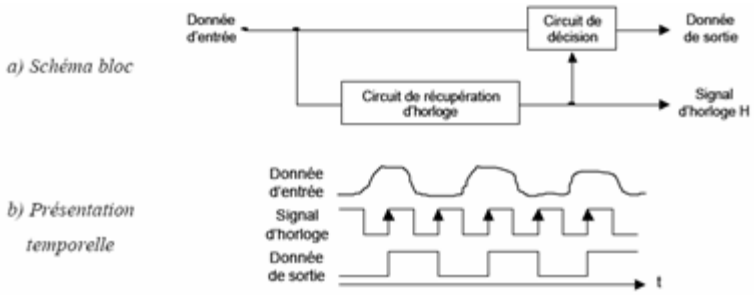


Figure 61 : Régénération des données reçues à l'aide d'une CDR [50]

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.

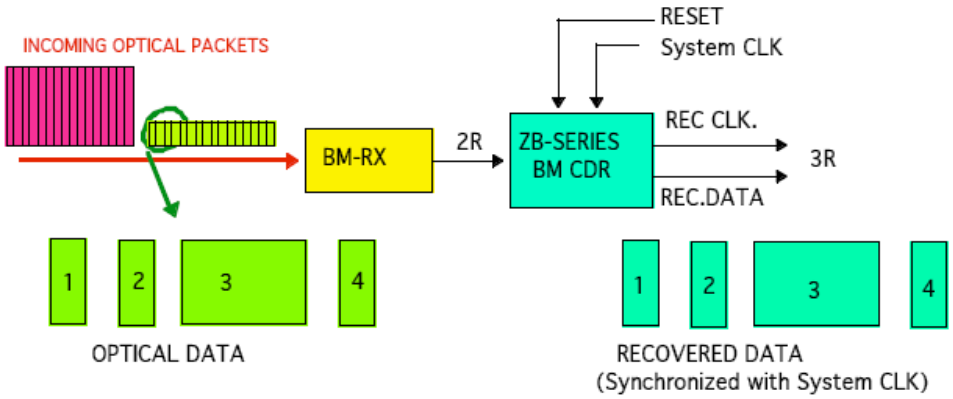


Figure 62 : Régénération 3R sur la voie montante

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.

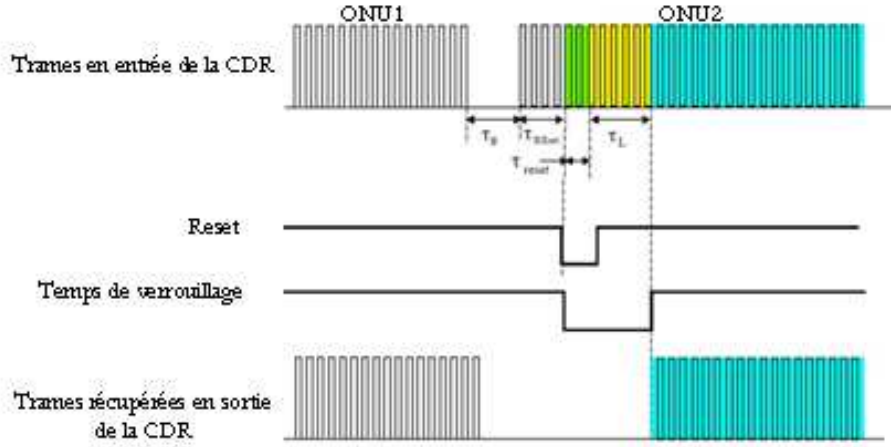


Figure 63 : Diagramme temporel des trames en entrée et en sortie de la CDR

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 : τ_g, le temps de garde de 25 ns entre deux paquets successifs, τ_{RXset}, le temps nécessaire à l'allumage du laser, τ_{reset}, l'impulsion temporelle de 5 temps bits nécessaire à la réinitialisation de la CDR entre deux paquets et τ_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.

(a) (b) (c)

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

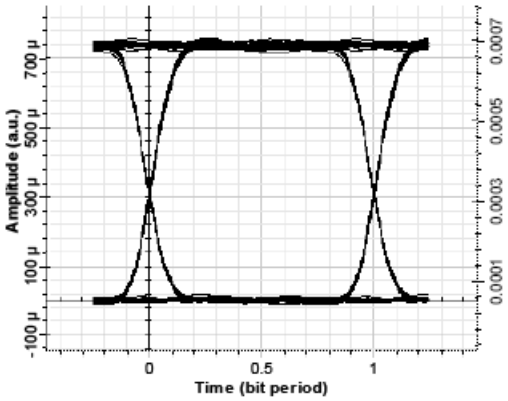


Figure 65 : Diagramme de l'œil d'un signal NRZ

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 au-dessus 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 2^9-1. 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 "pré-amplification". 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.

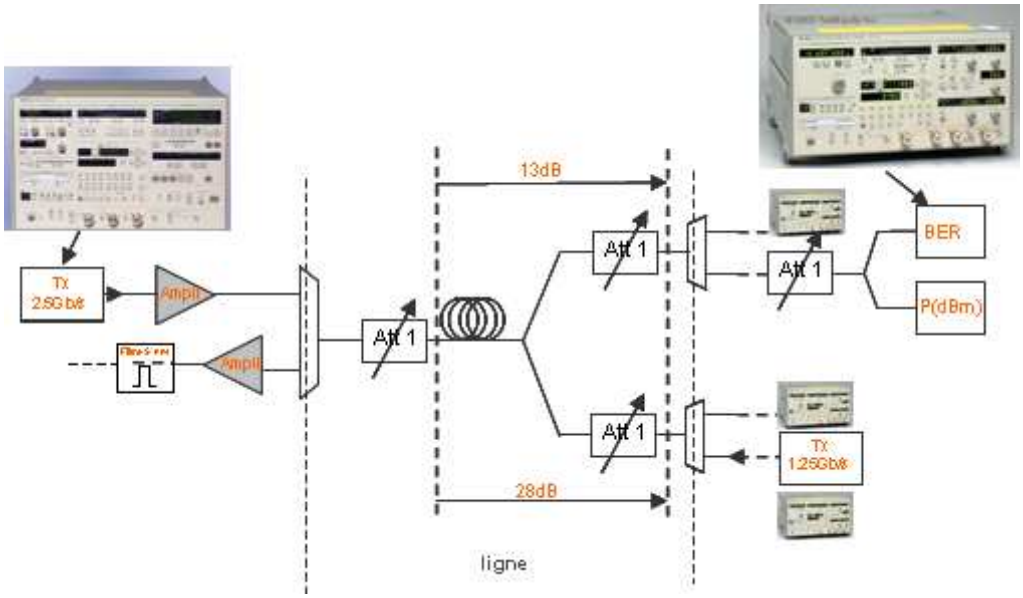


Figure 66 : Architecture du réseau avec amplificateur au central

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 28dB	SOA 1530		4dB à 1550nm
	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 injectée de -24dBm à -39 dBm selon la ligne, 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 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.

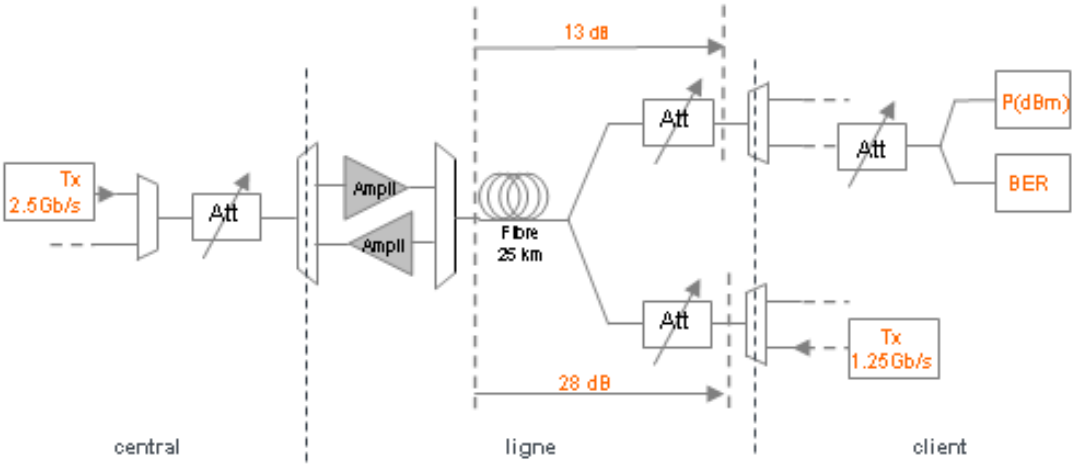


Figure 67 : Architecture du réseau avec amplificateur en ligne

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 ($\lambda1$ = 1530nm et $\lambda2$ = 1550 nm ; $\lambda1$ = 1570nm et $\lambda2$ = 1550 nm ; $\lambda1$ = 1550nm et $\lambda2$ = 1530 nm ; $\lambda1$ = 1550nm et $\lambda2$ = 1570 nm) :

- Configuration 1 : "13 / 13 "

Signal descendant à $\lambda1$ mesuré à 13dB avec un signal montant à $\lambda2$ passant par la ligne 13 dB.

- Configuration 2 : "28 / 28"

Signal descendant à $\lambda1$ mesuré à 28dB avec un signal montant à $\lambda2$ passant par la ligne 28 dB

- Configuration 3 : "28 / 13 "

Signal descendant à $\lambda1$ mesuré à 28dB avec un signal montant à $\lambda2$ passant par la ligne 13 dB.

- Configuration 4 : "13 / 28"

Signal descendant à $\lambda1$ mesuré à 13dB avec un signal montant à $\lambda2$ 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.

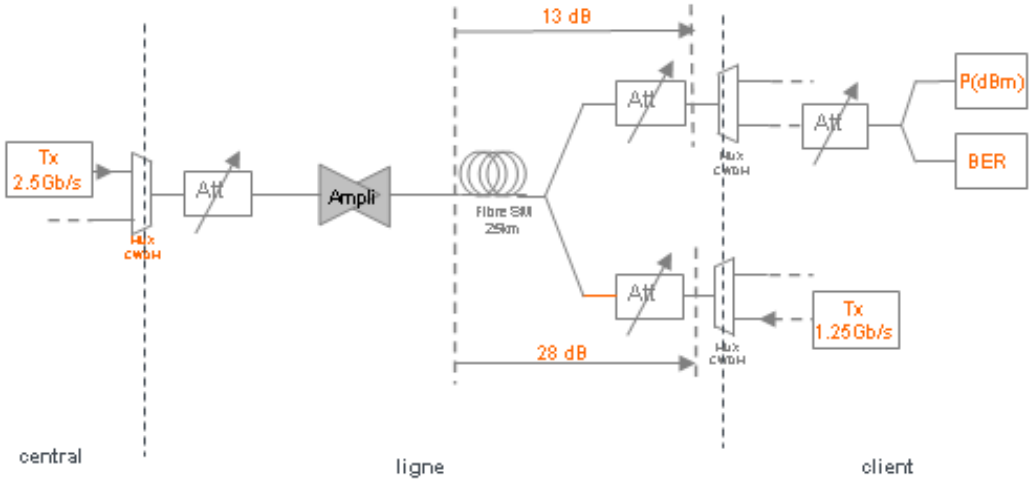


Figure 68 : Architecture du réseau avec amplificateur en bidirectionnel

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

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).

Config 3 28/13	↓1570nm ↑1550nm	↓1550nm ↑1570nm	↓1550nm ↑1530nm	↓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

* 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.

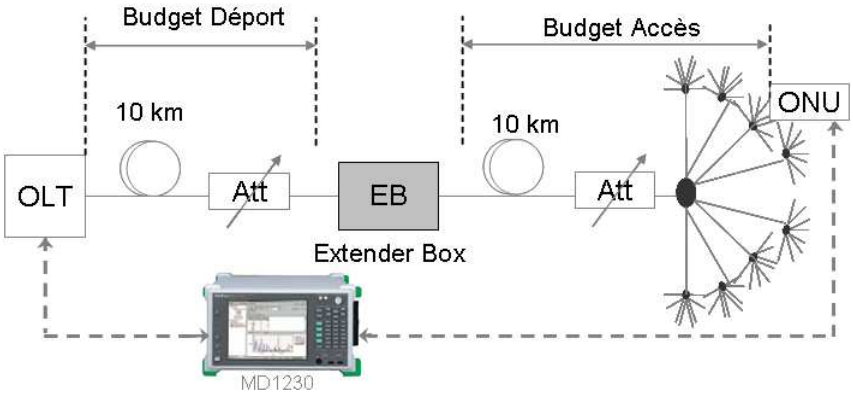


Figure 69 : Schéma de test d'une EB sur un GPON

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

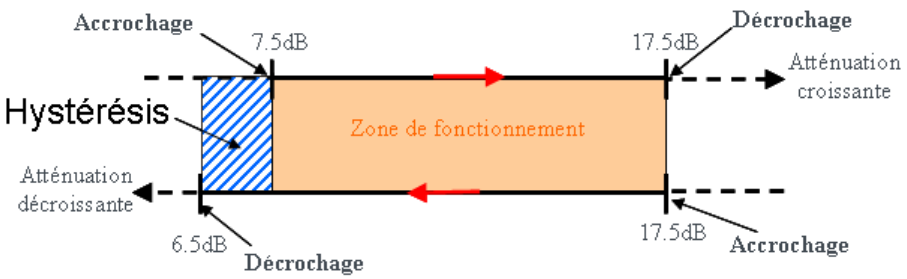


Figure 70 : Schématisation du phénomène d'hystérésis

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 semi-conducteur 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 =1490nm Descendant	
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.

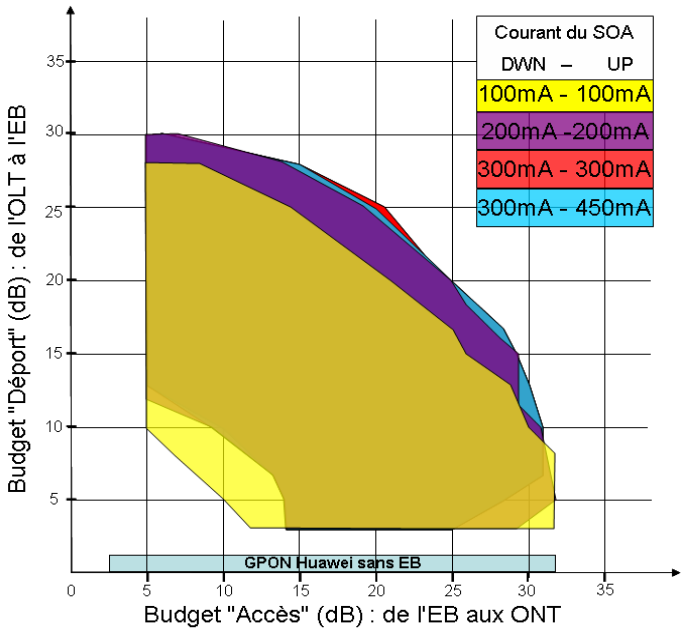


Figure 71 : Cartographie de budget du DSOA sur GPON Huawei en fonction du courant de polarisation

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.

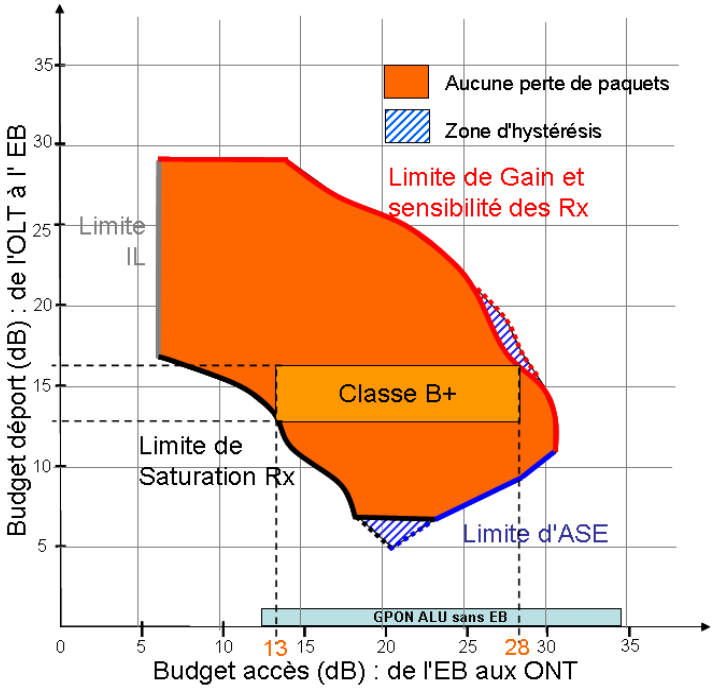


Figure 72 : Cartographie de budget du DSOA à 300mA bidirectionnel sur GPON ALU

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.

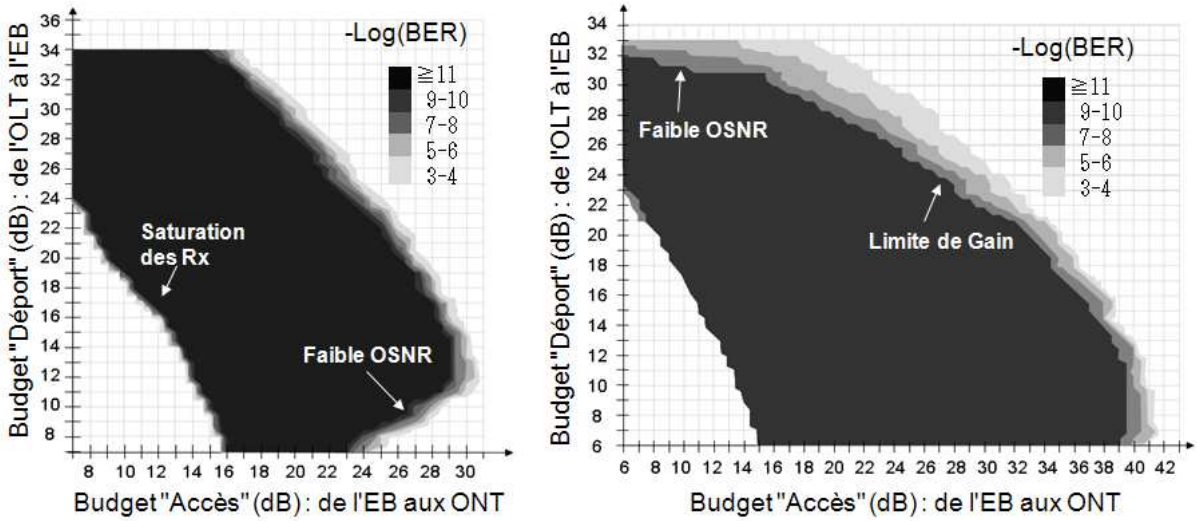
On remarque également sur le GPON ALU, l'apparition de zone d'hystérésis. Le GPON ALU est effet au départ moins robuste à une dégradation des signaux optiques en phase d'initialisation. Ce fonctionnement est limité quel que soit le GPON à un budget total maximum de 45dB. Cela s'explique d'une part par 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.



(a) (b)

Figure 73 : Résultats de BER avec un D-SOA sur un GPON ALU pour les signaux montants (a), 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.

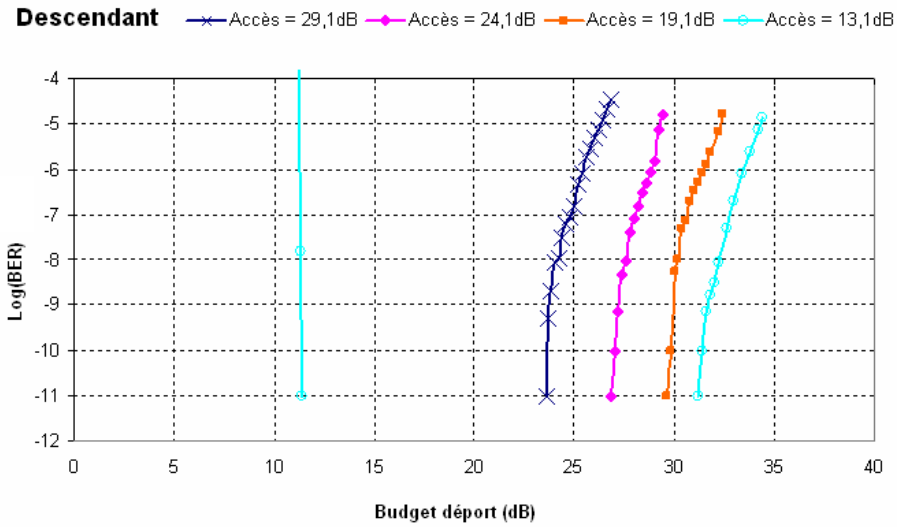


Figure 74 : Courbes de BER des signaux descendants à budget d'accès fixe avec un DSOA

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.

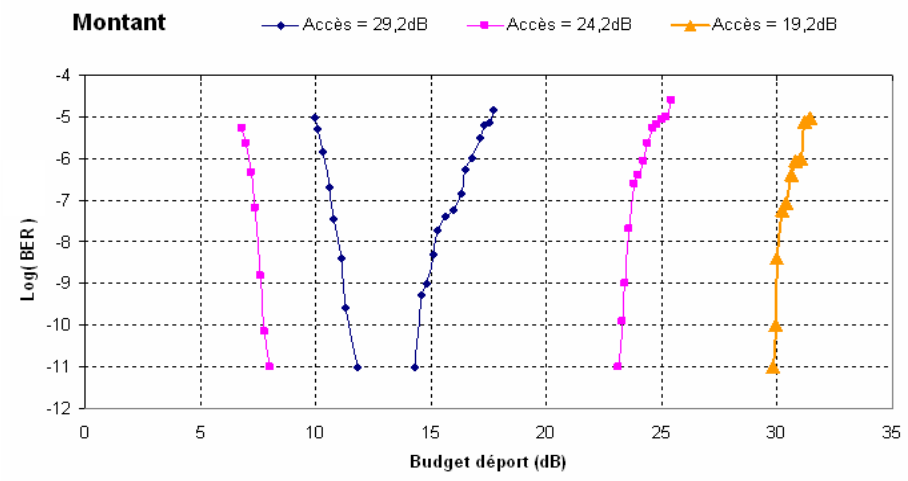


Figure 75 : Courbes de BER des signaux montants à budget d'accès fixe avec un DSOA

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.

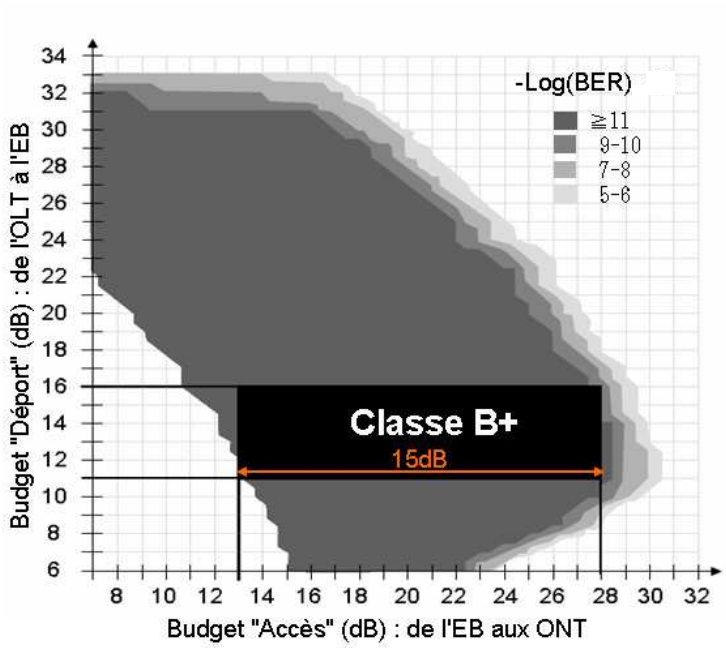


Figure 76 : Cartographie de BER d'un DSOA sur GPON en fonctionnement bidirectionnel

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.

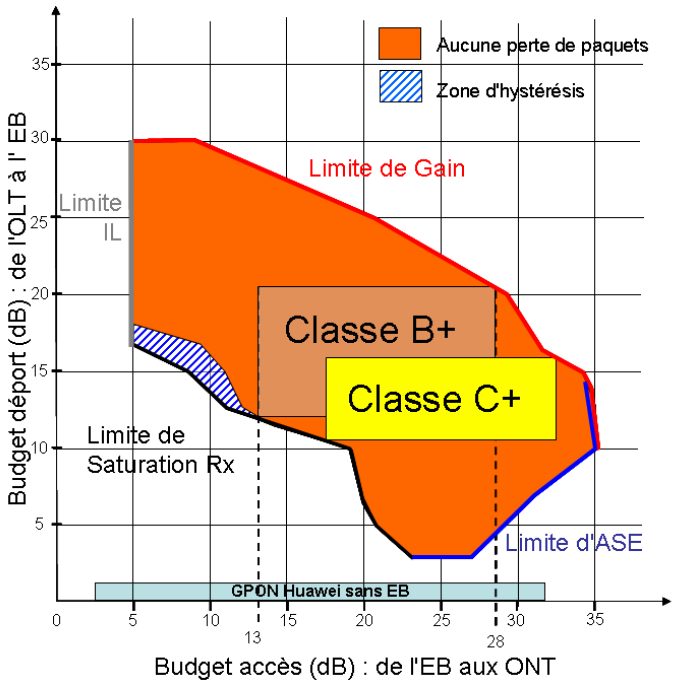


Figure 77 : Cartographie de budget avec PDFA & SOA sur GPON Huawei

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.

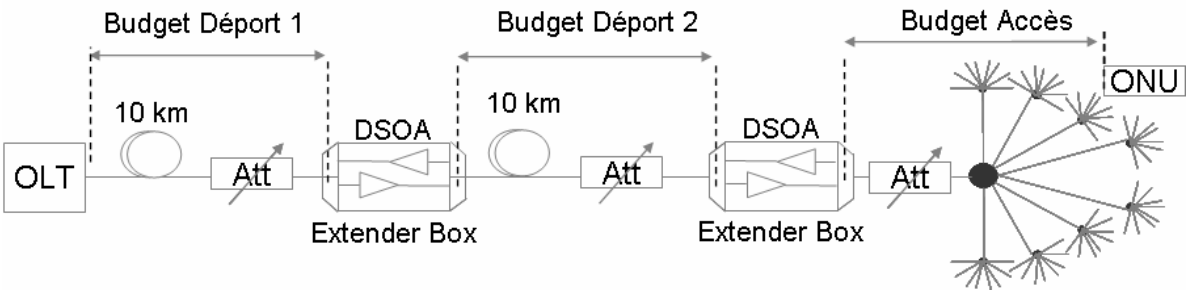


Figure 78 : Architecture de test avec deux DSOA cascadés en série

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.

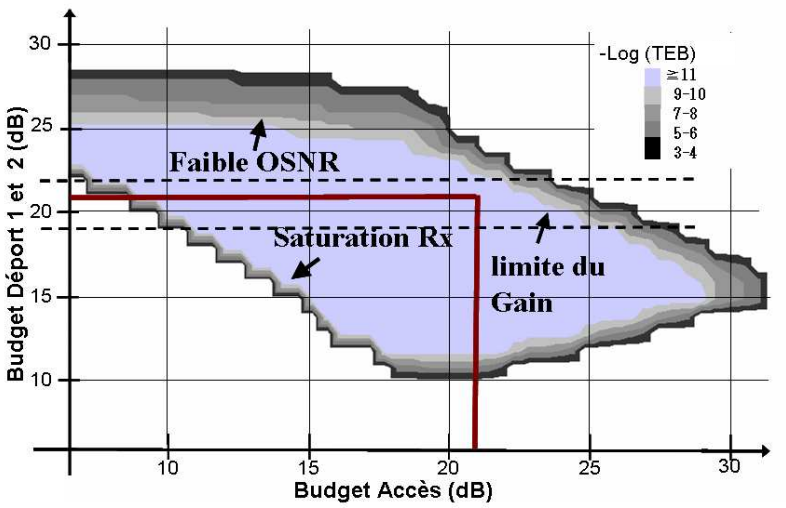


Figure 79 : Résultats de la mesure de BER des signaux descendants et montants

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.

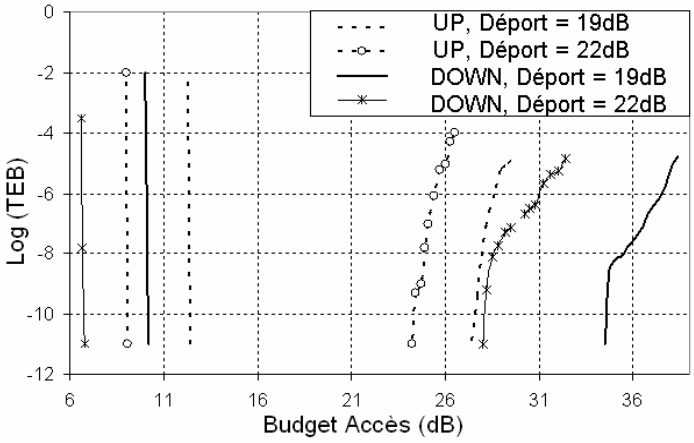


Figure 80 : Courbes de BER à budget déport fixés à 19 et 22 dB

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.

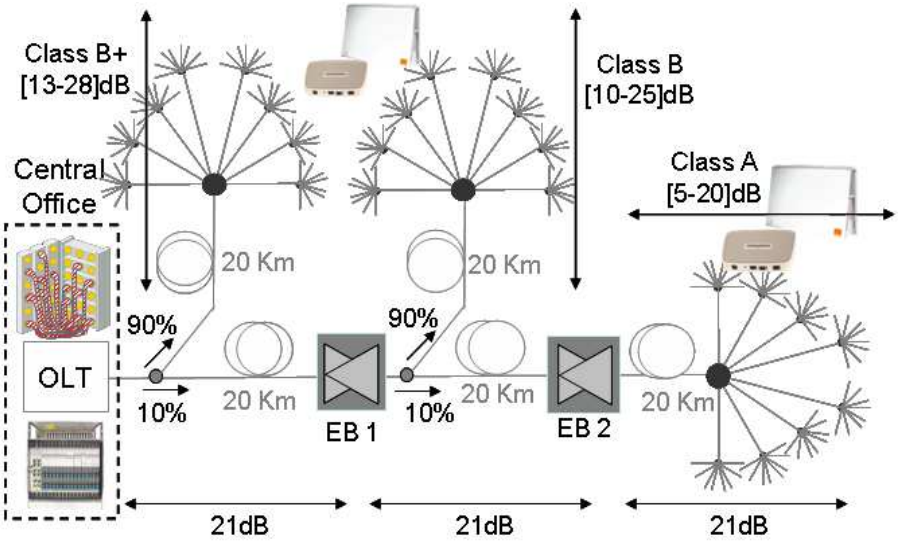


Figure 81 : Application typique pour un GPON rural

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

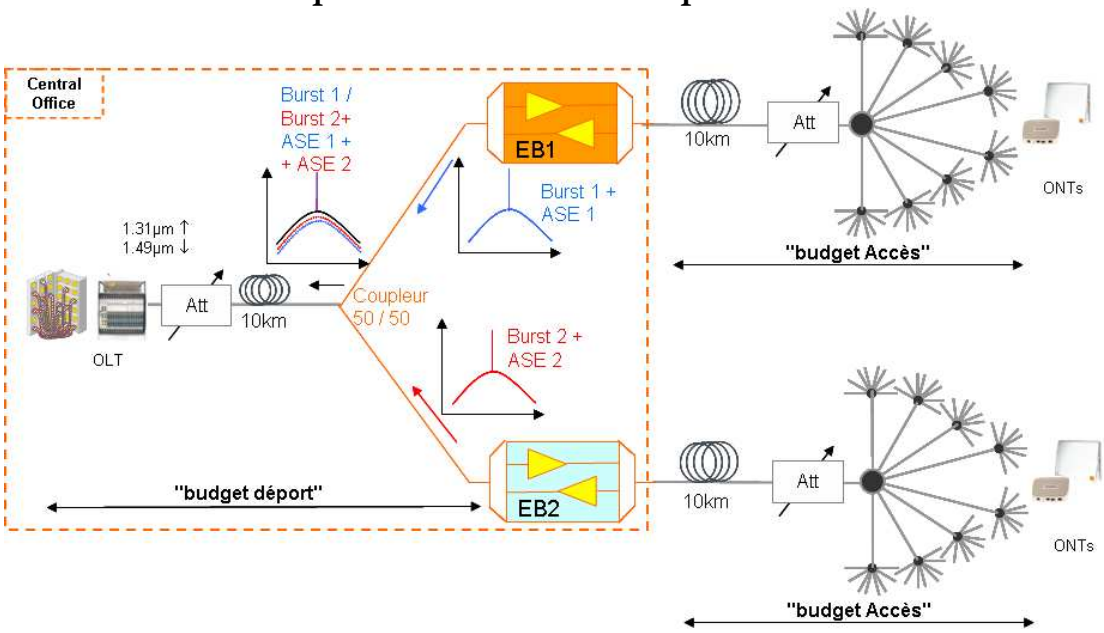


Figure 82 : Architecture de test avec 2 DSOA connecté en parallèle

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.

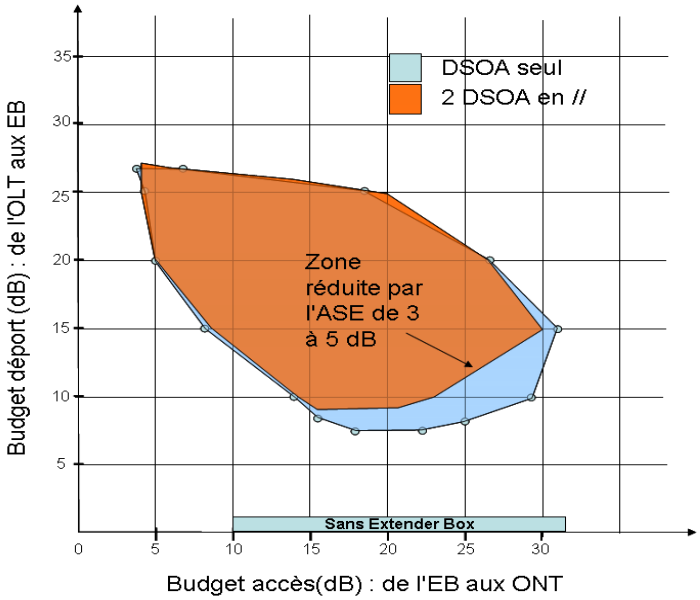


Figure 83 : Comparaison des zones de fonctionnement d'un DSOA seul ou 2 DSOA cascadés

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 + Ré-amplification) 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 opto-électrique 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.

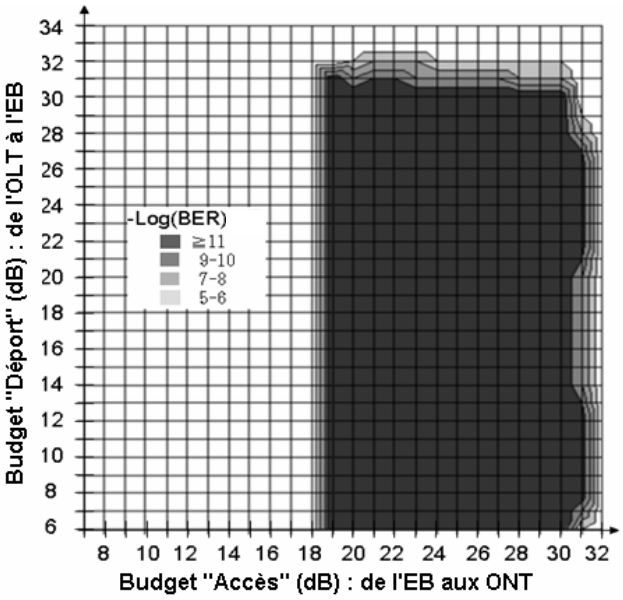


Figure 84 : Résultats de BER bidirectionnel avec un répéteur OEO 2R sur un GPON

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.

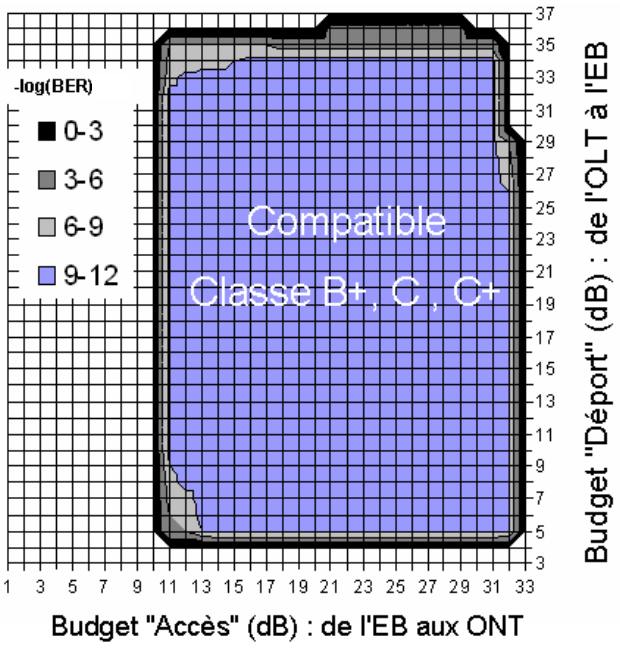


Figure 85 : Résultats de BER bidirectionnel avec un répéteur OEO 3R sur un GPON

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

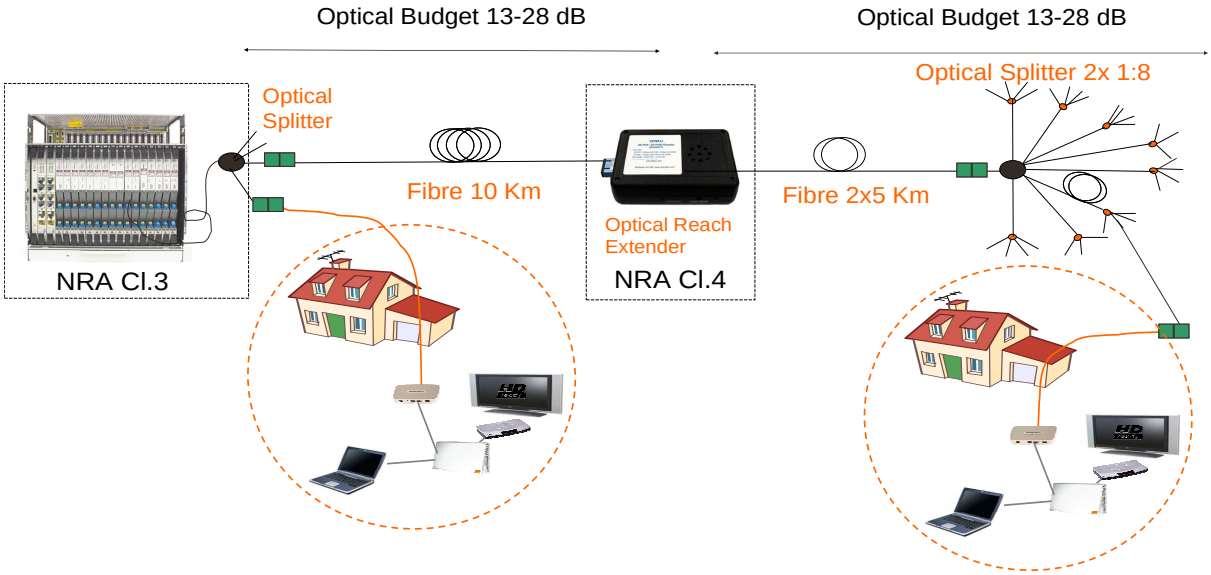


Figure 86 : Test des services Net et VoD sur un GPON étendu

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.

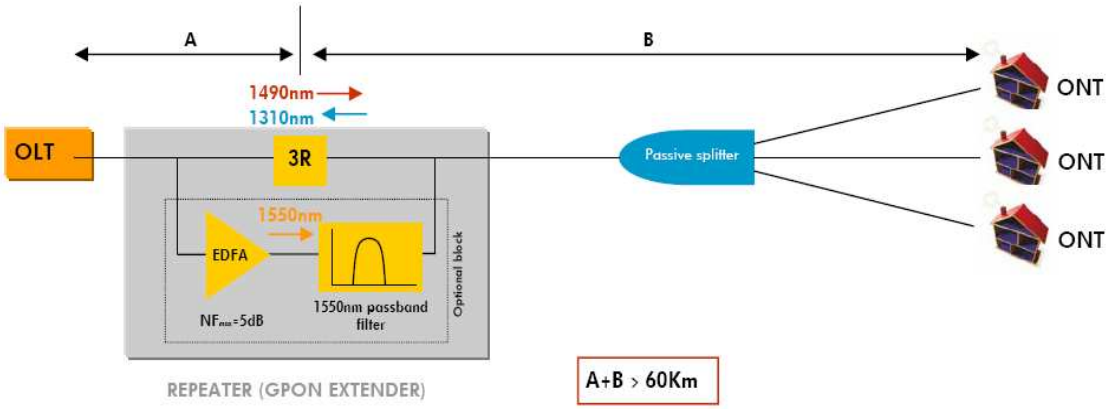


Figure 87 : EB avec option d'amplification CATV [55]

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.

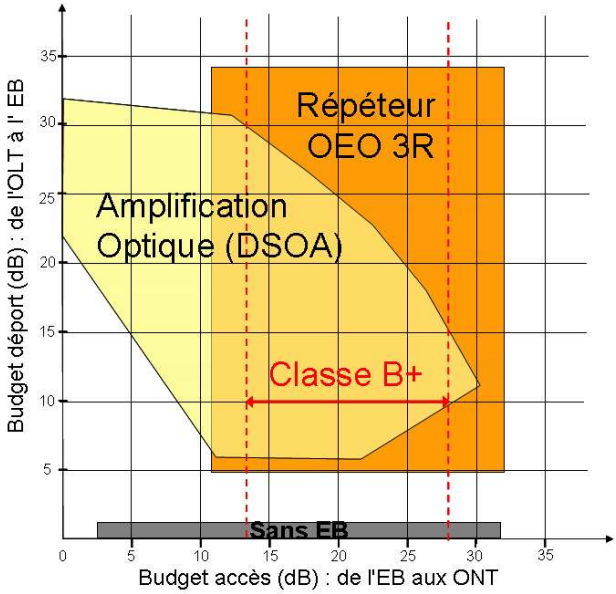


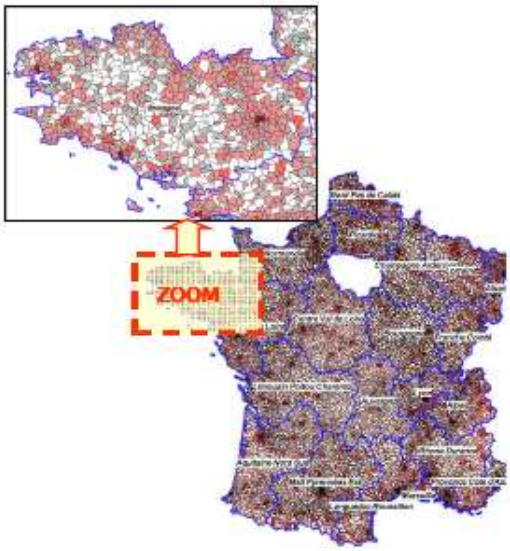
Figure 88 : Synthèse des performances optiques de chaque type d'EB

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.



Area category	Number of central offices
Rural area	546
Very low density urban areas	234
High density urban areas	30
Very high density urban area	10
Total	820

Number of potential homes connected	1.4 Million
Population impacted	3.11 Million

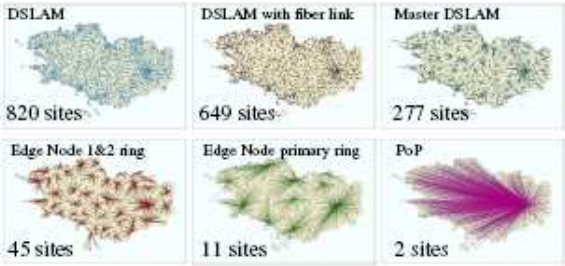


Figure 89 : Localisation des centraux et densité de DSLAM en région Bretagne

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.

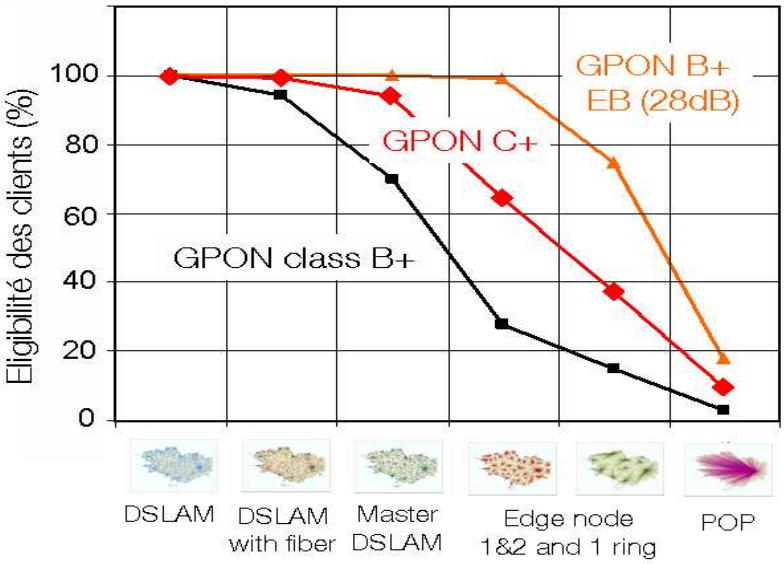


Figure 90 : Eligibilité en fonction de la localisation de l'OLT et du budget optique

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.

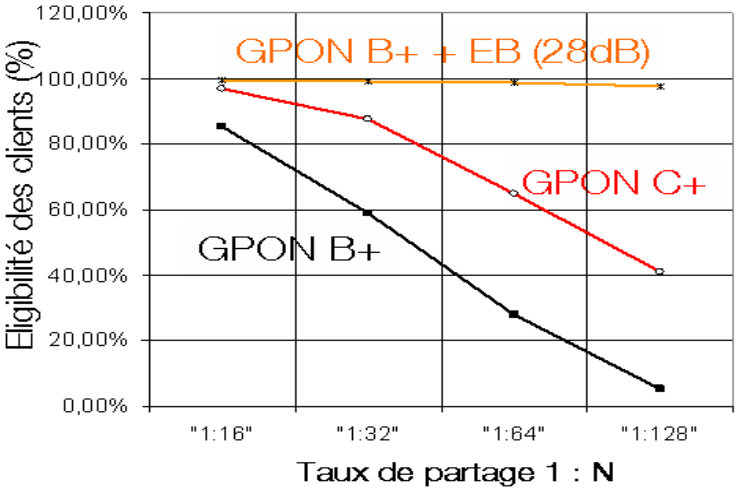


Figure 91 : Taux de couplage possible à partir d'un OLT en collecte 1&2 par classe de budget

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 FTTx, 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].

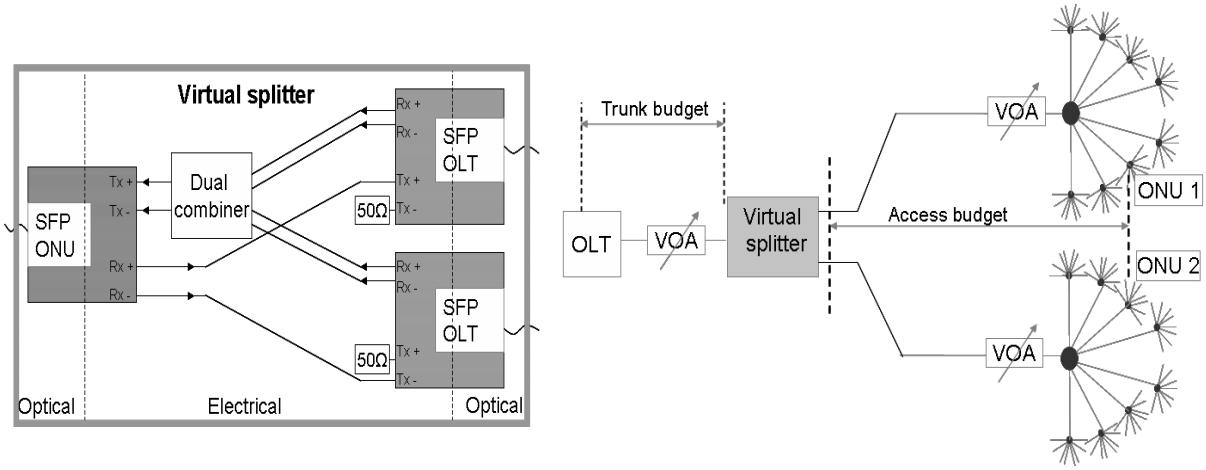


Figure 92 : Coupleur virtuel (a) et son implémentation (b) sur un GPON

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.

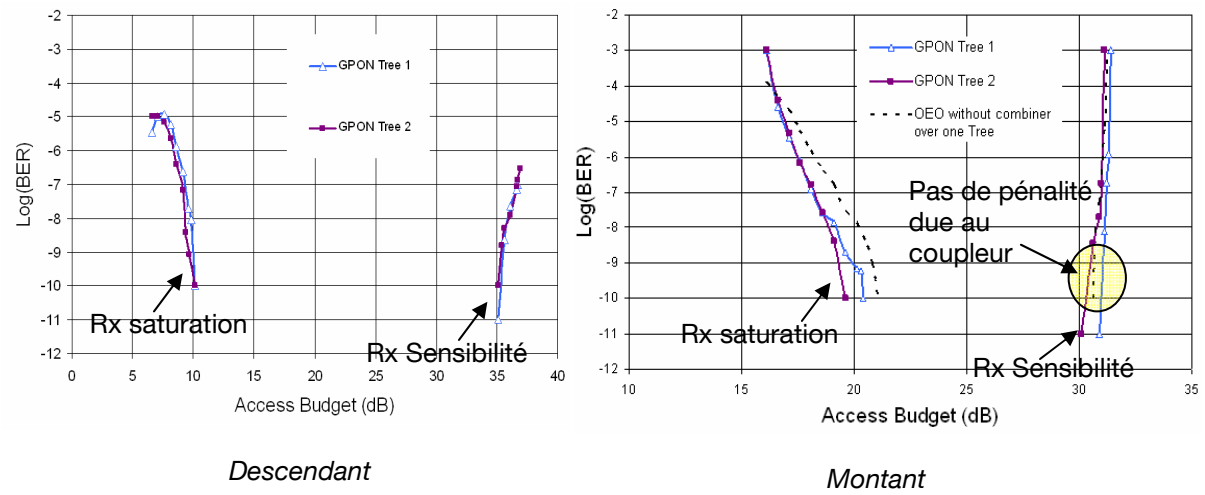


Figure 93 : Courbes de BER des signaux montants et descendants pour les arbres GPON 1 et 2

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.

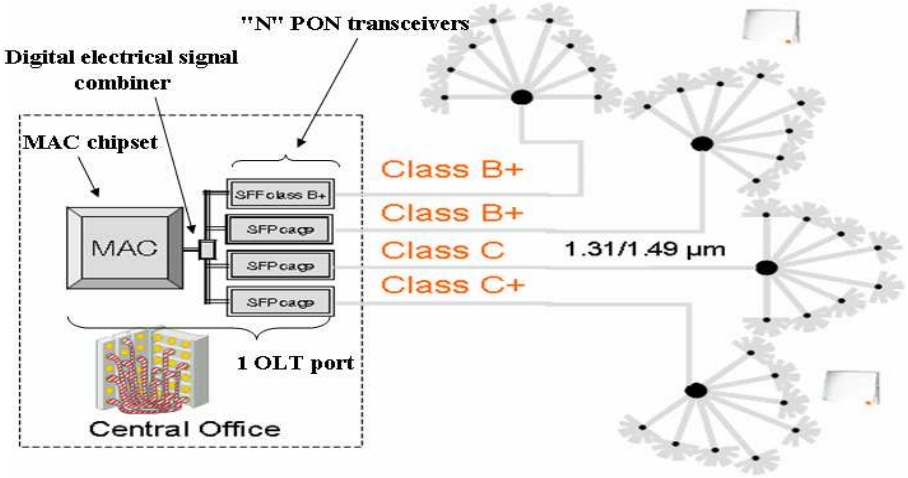


Figure 94 : Application pour le coupleur virtuel :
combineur intégré sur la couche MAC de la carte OLT

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.

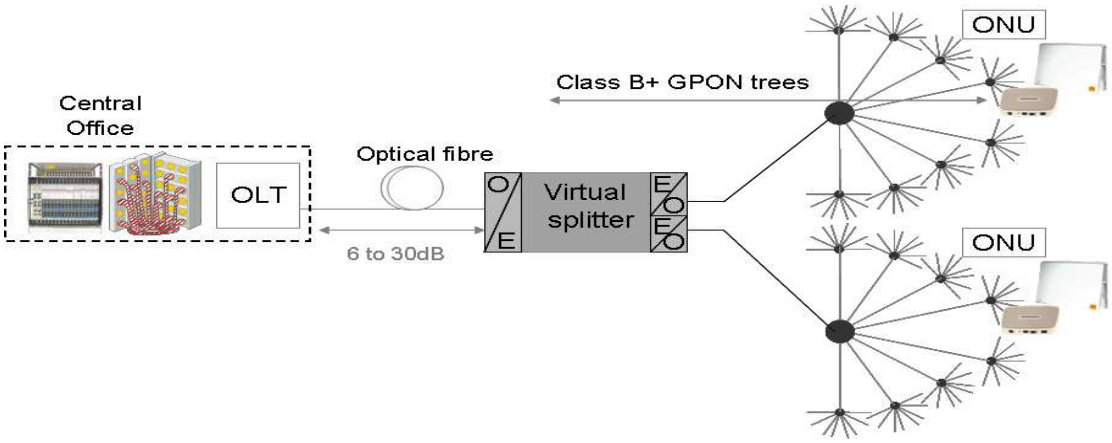


Figure 95 : Application du coupleur virtuel :
augmenter le nombre d'arbre GPON et le budget optique

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.

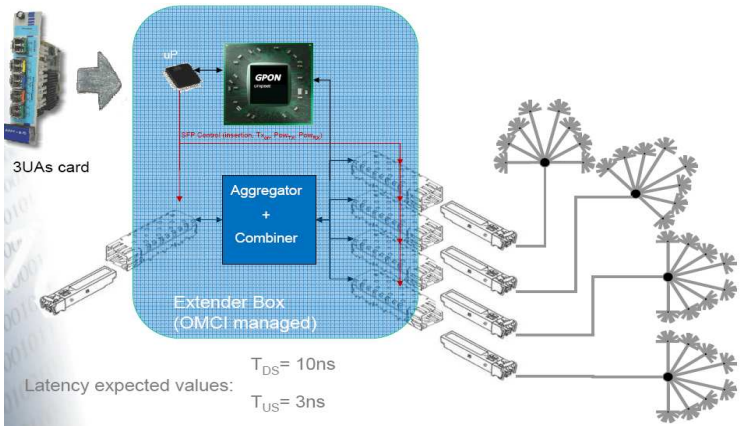


Figure 96 : Prototype Telnet d'Extender Box GPON 1 vers 4 avec management OMCI [59]

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.

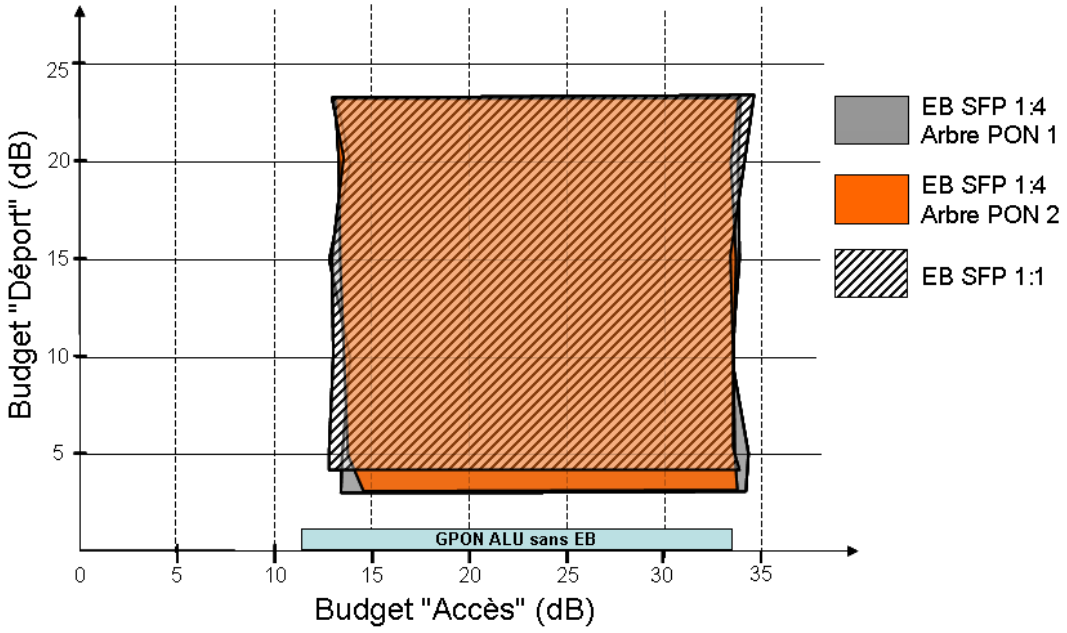


Figure 97 : Cartographie de budget d'une EB 1:4, prototype Telnet

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

Module	Coût
4 OLT port	4 x P
Total	**4 x P**

(a)

Scénario 2 :
64 clients desservis sur 4 arbres PON
avec 1 port OLT et 1 EB 1:4 Telnet

Module	Coût
Telnet Chassis	Ch
Telnet carte	C
4 OLT SFP	4 x OLT SFP
ONT SFP	ONT SFP
OLT port	P
Total	**< 2 x P**

(b)

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

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 [$N_n/(64 \times TR_n)$]

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 :

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

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.

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

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+

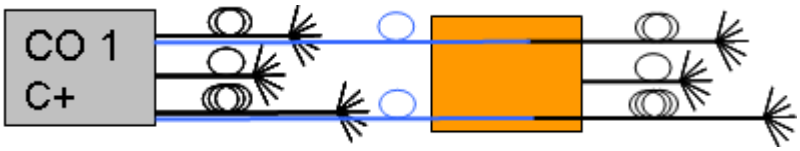


Figure 99 : Schématisation du scénario B

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)

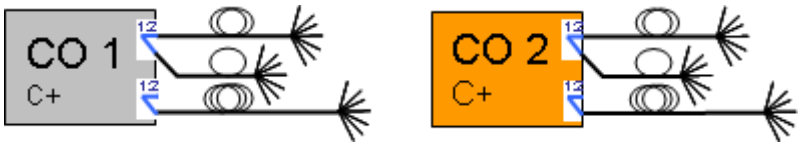


Figure 100 : Schématisation du scénario C

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

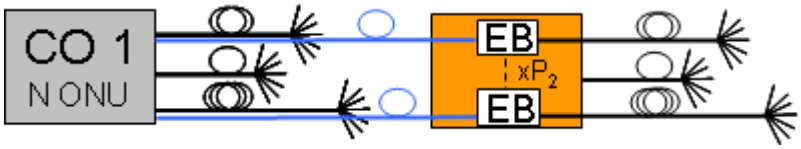


Figure 101 : Schématisation du scénario D

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

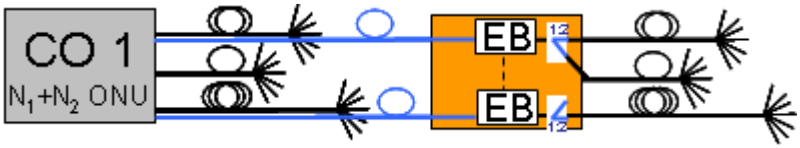


Figure 102 : Schématisation du scénario E

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 TR_1, plus des ports déportés des centraux N_1, N_2, etc avec un taux de remplissage doublé ($TR_{esclave} = 2 \times TR_n$).

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

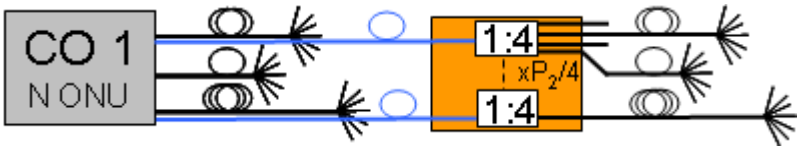


Figure 103 : Schématisation du scénario F

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 TR_1, plus des ports déportés des centraux N_1, N_2, etc avec un taux de remplissage quadruplé ($TR_{esclave} = 4 \times TR_n$).

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

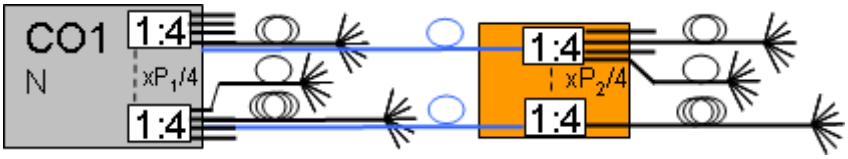


Figure 104 : Schématisation du scénario G

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

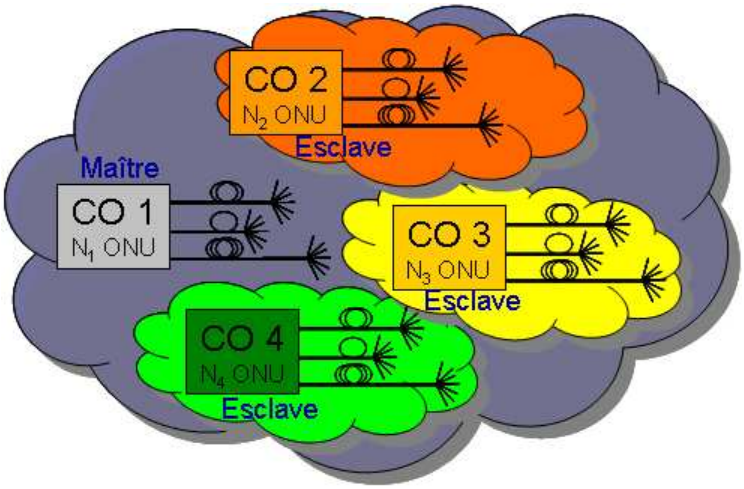


Figure 105 : Illustration d'un central maître amené à couvrir les zones d'éligibilité de 3 autres centraux esclaves.

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.

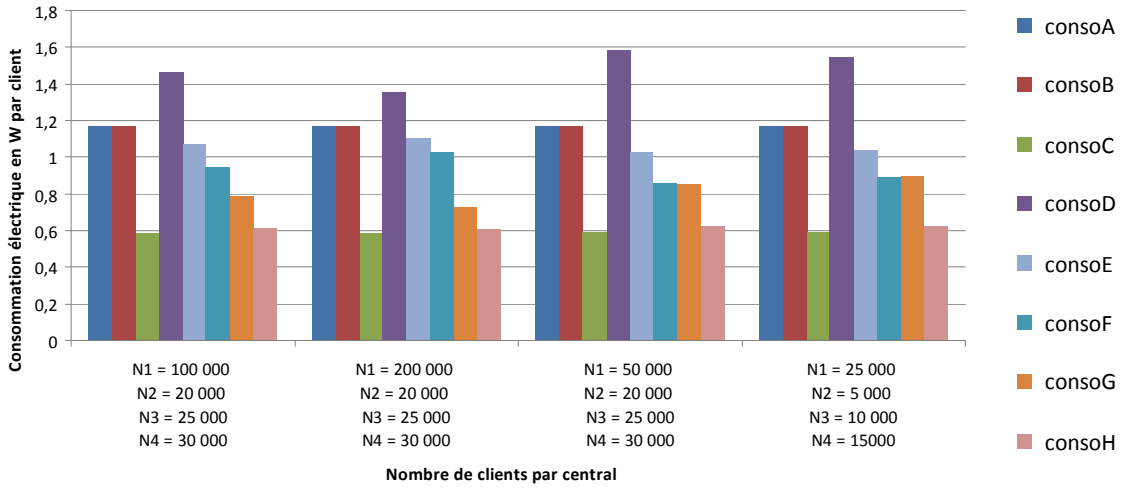


Figure 106 : Consommation électrique par client selon le scénario de déport et le nombre de clients connectés par central

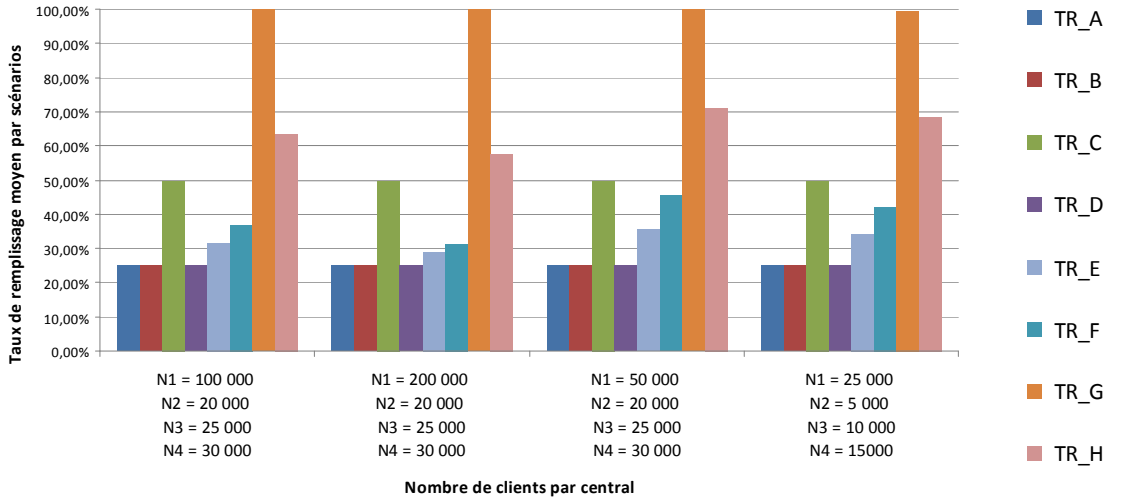


Figure 107: Taux de remplissage moyen de la zone selon le scénario de déport et le nombre de clients connectés par central

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 technico-économiques 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-

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

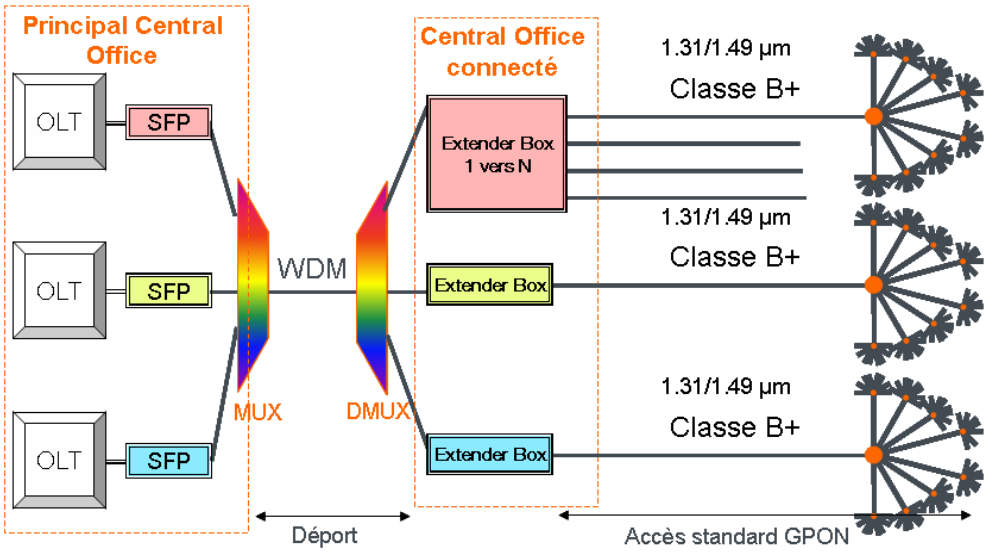


Figure 108 : Architecture de GPON étendu par une EB WDM

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.

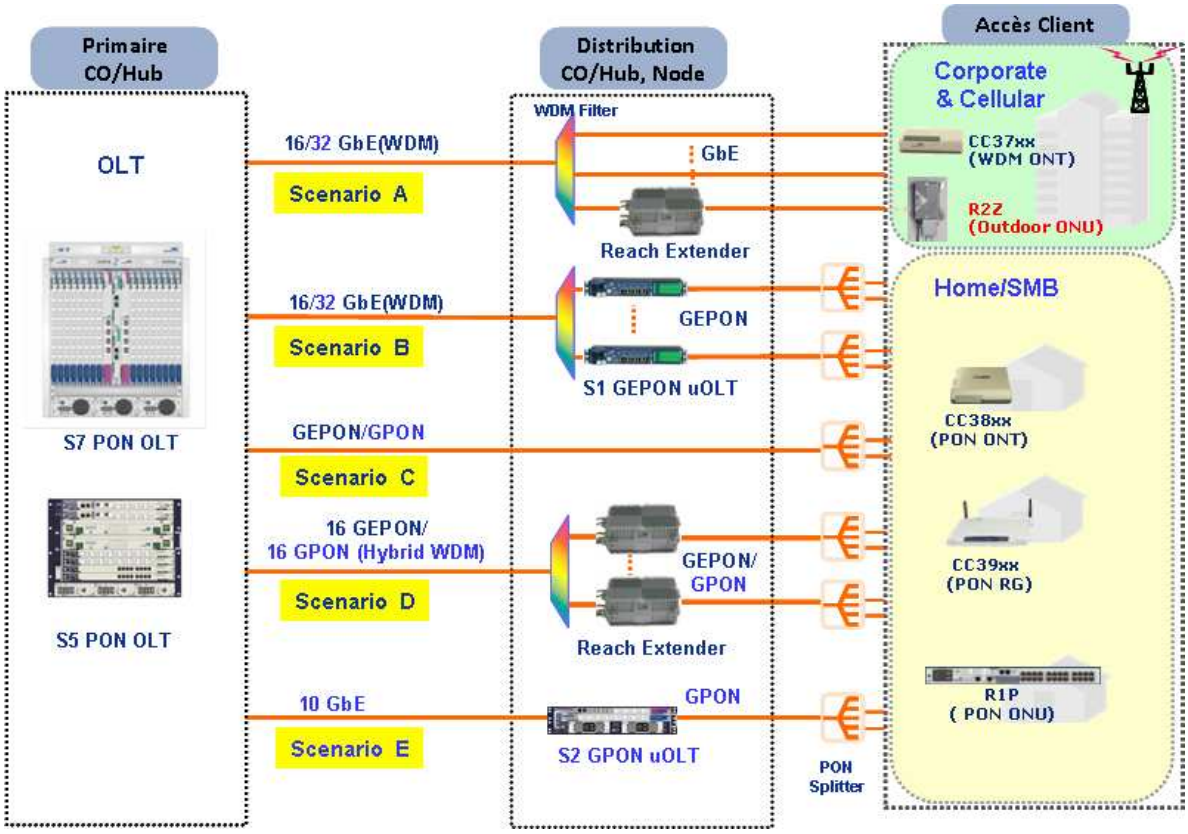


Figure 109 : Scénarios de mutualisation proposés par CORECESS

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.

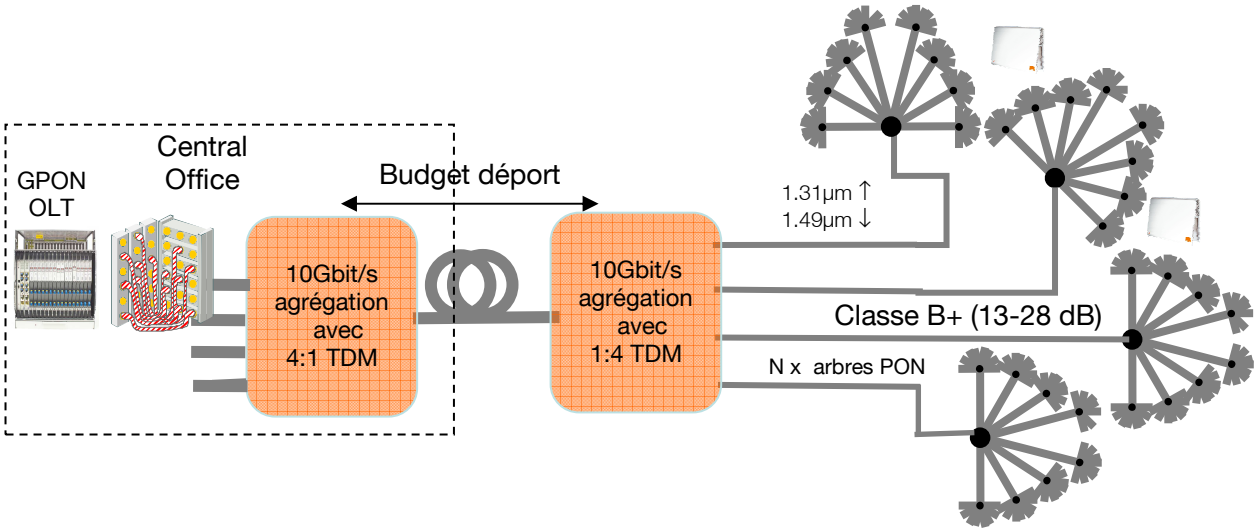


Figure 110 : Réseau d'accès étendu avec une agrégation à 10Gbit/s

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].

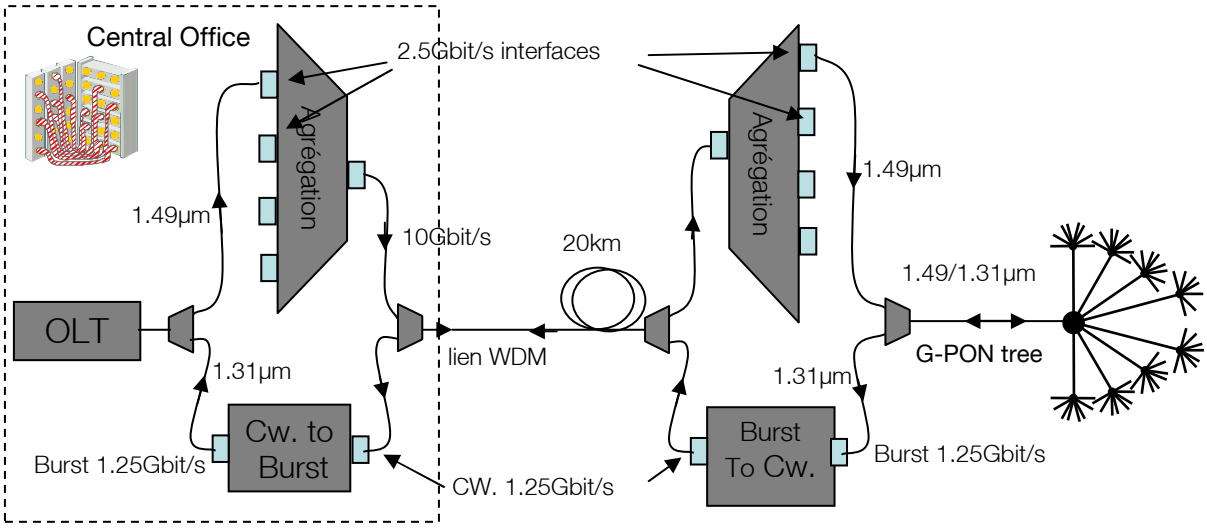


Figure 111 : Schéma expérimental de l'agrégation

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.

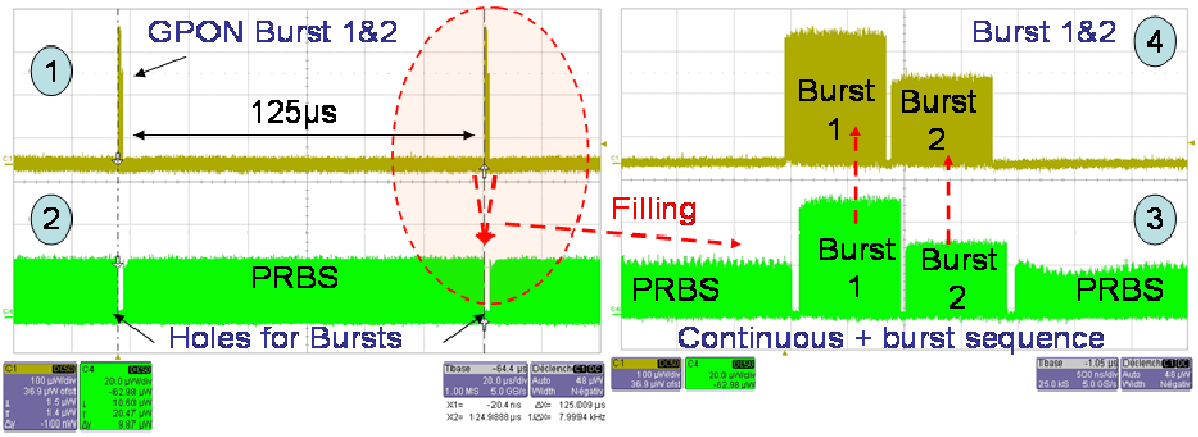


Figure 112: Conversion du mode burst en mode continu (CW) (1 à 3) et sa réciproque (3 à 4)

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.

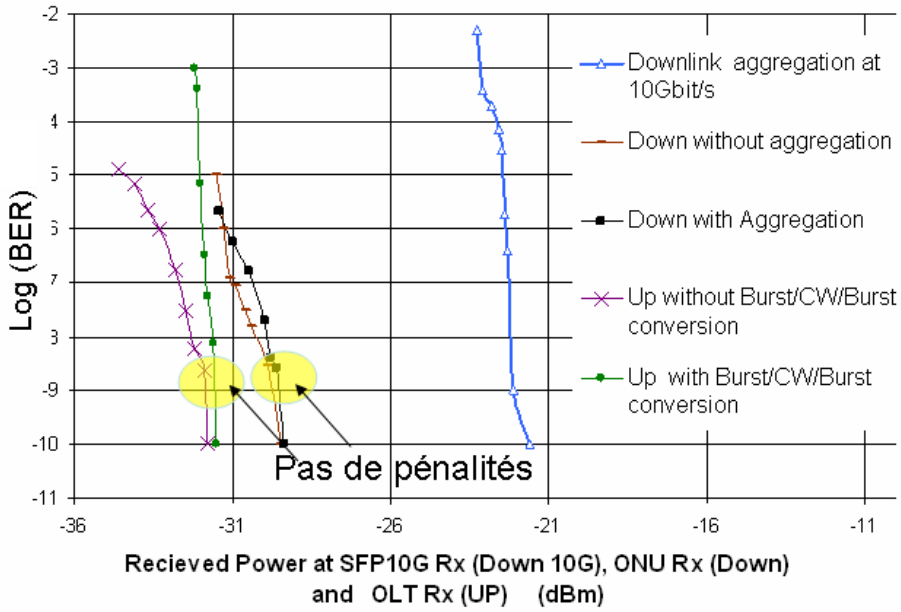


Figure 113 : Courbes de BER du signal descendant à 10Gbit/s et 2,5Gbit/s et du signal montant à 1,25Gbit/s

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).

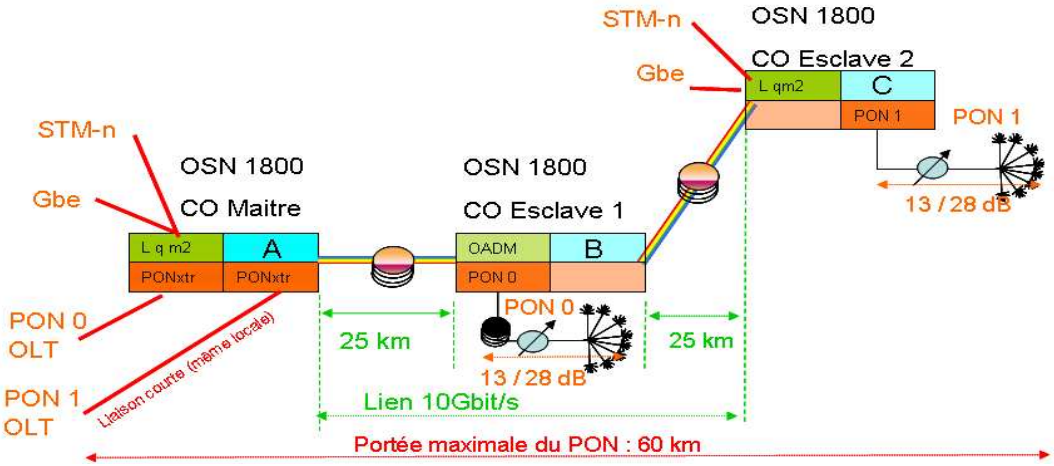


Figure 114 : Schématisation de l'architecture réalisée avec l'OSN 1800

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.

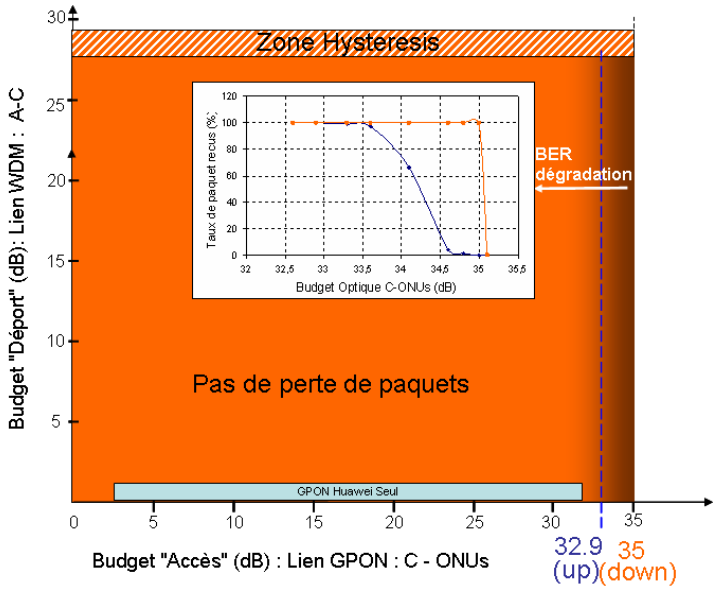


Figure 115 : Cartographie de perte de paquet selon les budgets possibles sur chaque lien OSN : de A à C et de C aux ONU

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.

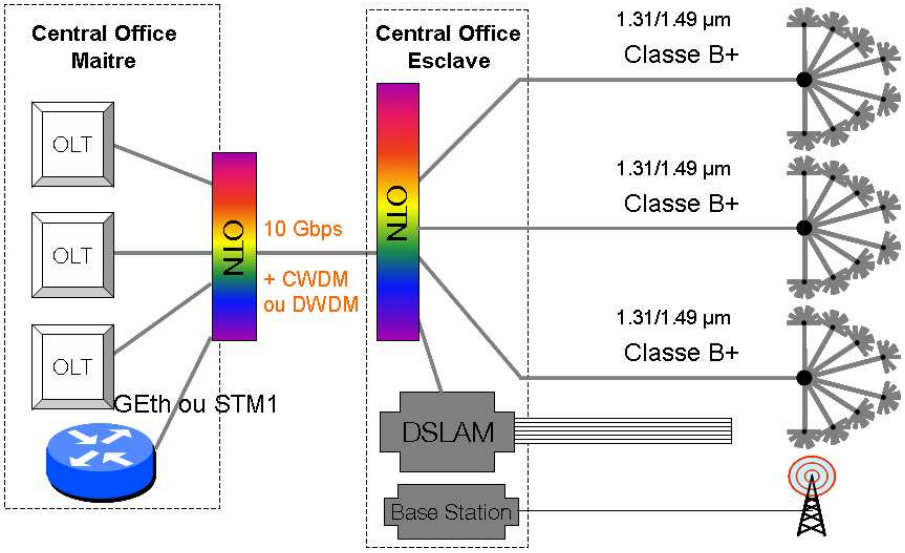


Figure 116 : Solution OTN proposée par Huawei : l'OSN 1800

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

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.

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

- : 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.

Chapitre 3

Extension de portée de systèmes NGPON

SOMMAIRE DU CHAPITRE 3

Introduction au Chapitre 3 ..... **150**

1. Extension de portée NGPON-1 : 10GPON **151**

1.1. Mise en œuvre d'une transmission à 10Gbit/s **151**
1.2. Amplification d'une transmission à 10Gbit/s **156**
1.3. Convergence GPON –NGPON 1 ..... **166**
2. Extension de portée NGPON-2 ..... **171**

2.1. Extension de portée d'un PON WDM **171**
2.2. PON hybride WDM-TDM **176**
2.3. Amplification d'une transmission OFDM **180**
3. Convergence fixe-mobile **191**

3.1. Extension de portée de liaisons Radio sur Fibre analogique **193**
3.2. Extension de portée d'une architecture RoF numérique - GPON **194**

Résumé du Chapitre 3 ..... **197**

Introduction au Chapitre 3

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

Ces nouvelles technologies sont développées pour offrir de nouvelles capacités au réseau d'accès optique, en termes de débit, taux de partage, portée, services. Ils devront par exemple répondre aux critères suivants : fort taux de couplage (≧64), débit agrégé jusqu'à 40Gbit/s, grande bande passante par client (1Gbit/s), débits symétriques pour une transmission bidirectionnelle sur lien mono-fibre, longue portée (>20km), passivité, simplicité à renouveler ces équipements, protection basique incluse, etc. Ces motivations sont décrites en détail au chapitre 1.
Cette nouvelle génération de réseau d'accès optique, décrite au chapitre 1, différencie une évolution court-terme des technologies PON à travers le NGPON1, et une génération plus long terme avec le NGPON2.

Les travaux de normalisation associés au NGPON1 ont été en partie définis en 2009 à travers la normalisation du XGPON1 (débit asymétrique d'un 10GPON : 10Gbit/s descendant, 1Gbit/s montant) au sein de l'ITU-T et au sein de l'IEEE, par l'intermédiaire du standard 802.x associé au 10GEPON. Une seconde partie de normalisation concernant le XGPON 2 (debit symétrique de 10Gbit/s) devrait être finalisée par l'ITU-T pour le mois de Juin 2010.
Le NGPON2 demeure pour l'instant à l'état des prémices de normalisation, mais quelques solutions technologiques apparaissent comme pouvant entrer dans ce cadre : le PON WDM et à multiplexage hybride WDM TDM, ou encore le PON à base de multiplexage OFDM.

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

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

1. Extension de portée NGPON-1 : 10GPON

Le déploiement massif de fibres de plus en plus proche des utilisateurs finaux tient son origine sur l'utilisation incessante de services multimédias de plus en plus gourmands en bande passante notamment via le développement d'Internet. Des besoins croissants, de débits toujours plus élevés sont mis en évidence. Dans ce contexte, des transmissions à 10Gbit/s pour les réseaux optiques passifs (10GPON) apparaissent au sein des organismes de normalisation (IEEE & ITU) dans le but de définir des standards d'une nouvelle génération de réseau d'accès NGPON1. Le 10GPON permettra d'atteindre des débits s'élevant à 10Gbit/s, en utilisant comme pour le GPON un multiplexage temporel (TDM) des signaux montants.
Toutefois, une augmentation du débit à 10Gbit/s implique un apprentissage technologique du marché des composants (lasers, photodiodes et CRD).
On propose alors dans une première partie d'analyser l'impact de la forme de la trame transmise à 10Gbit/s sur la qualité de réception d'une photodiode mode burst dotée d'une CDR à 10Gbit/s.
Dans une optique d'extension de portée du réseau d'accès, nous avons ensuite testé des architectures de 10GPON avec pour objectif ici d'y évaluer l'impact de l'insertion d'amplification optique sur une transmission à 10Gbit/s.

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

La transmission des données montantes (des utilisateurs vers le central) est basée comme pour le GPON sur un partage de la fibre à travers un multiplexage temporel.
Le mode de fonctionnement et l'architecture du 10GPON est donc très similaire à celle du GPON décrite aux chapitres précédents.

1.1.1. Eléments de transmission

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

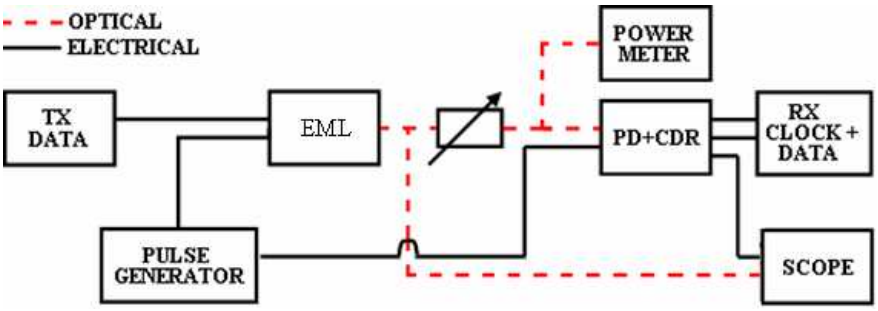


Figure 117 : Illustration d'une transmission monodirectionnelle à 10Gbit/s

Module d'émission

A 10Gbit/s, un Laser à Modulation Externe (EML) est nécessaire. Il combine une diode laser DFB et un Modulateur à Electro-Absorption (EAM) intégré de façon monolithique sur un support semi-conducteur à base d'InP.
La modulation de données (Tx Data) est effectuée par un générateur de trames PRBS à 10Gbit/s du type MP1800A de chez Anritsu.

Le rendement électro-optique de l'EML est également un facteur important. Selon la tension de modulation appliquée, le taux d'extinction doit être au minimum de 6dB selon la norme du 10GEPON (spécifié par l'IEEE, pas encore spécifié pour le 10GPON de l'ITU-T).
Cette norme a également spécifié la puissance optique de sortie pour le XG-PON 1 : Pour un signal descendant à 10Gbit/s et un signal montant à 2.5Gbit/s, les puissances de sorties des émetteurs doivent être comprises respectivement entre 2 et 6 dBm et 2 et 7dBm. Dans le cas d'un débit symétrique (XG-PON2), ces données sont encore à définir mais devraient être similaires.

Module de Réception

Une photodiode APD ou PIN peut être utilisée pour recevoir les données optiques transmises.
Elle doit cependant respecter la norme ITU-T G987.2 qui spécifie, pour le récepteur descendant à 10Gbit/s, une sensibilité de -28dBm et une saturation à -8dBm, et pour le récepteur montant, une sensibilité de -27.5dBm et une saturation à -7dBm à 2.5Gbit/s.
De plus, similairement au GPON, un circuit de récupération des signaux de données et d'horloge est indispensable pour traiter les données reçues par la photodiode. Un circuit d'adaptation électrique est souvent nécessaire : TIA ou LIA (Limiter amplifier).
L'évaluation des données ainsi reçues (Rx Data) est ensuite réalisée par un détecteur d'erreur à 10Gbit/s intégré au MP1800A d'Anritsu. La transmission sera considérée sans erreur pour un taux d'erreur binaire inférieur à $1{,}1.10^{-3}$, si on considère l'implémentation future d'un FEC spécifié par la norme.

Implémentation du mode Burst

Pour les signaux montants, la mise en place du mode burst à 10Gbit/s s'avère plus laborieuse que pour le GPON. En effet, le récepteur ne recueillant pas l'information en continu, il lui sera difficile de fournir instantanément une synchronisation de phase complète. En d'autres termes, les périodes d'inactivité sur la transmission peuvent entraîner une altération temporelle qui conduirait à une interprétation erronée des symboles et d'accroître ainsi le BER de la transmission.
Pour parer à cet obstacle, on peut envisager d'utiliser des composants prévus initialement pour une modulation continue ou encore d'intégrer à la MAC du récepteur, une fonction de remplissage de la trame mode burst afin que celle-ci soit vue par le bloc de réception comme une transmission continue.

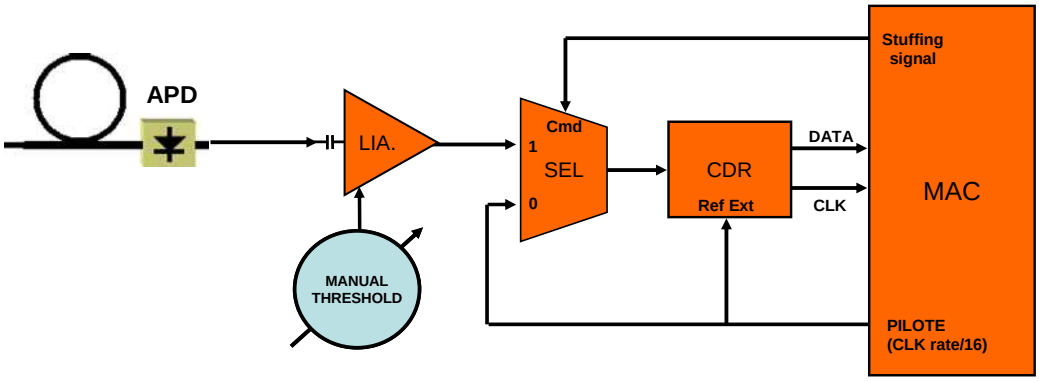


Figure 118 : Schéma descriptif du module de réception mode burst implémenté

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

pour la CDR d'après le signal provenant du LIA et une horloge de référence. Il assure ainsi un remplissage électrique au cours de la partie inutilisée du cycle des bursts. Ce remplissage est réalisé en créant un signal aléatoire "stuffing signal" à la fréquence de l'horloge de référence du système, préparant ainsi pour la CDR, le niveau de couplage AC et la synchronisation de phase pour le prochain préambule.
Le seuil de décision du LIA est ajusté manuellement afin d'optimiser les performances de la transmission selon le taux d'extinction des données transmises.
Ces modifications permettent d'utiliser cette CDR avec un signal quasi-continu dans une configuration mode burst.

Circuit de contrôle des burst

Dans le cas d'une émission en mode burst, un détecteur d'enveloppe intégré dans le générateur de trames permet de générer un signal d'enveloppe des paquets émis. Ce signal va permettre d'allumer le laser uniquement pendant l'émission des données du burst et de l'éteindre pendant l'absence de paquet afin d'annuler le niveau "0" du laser.
A l'OLT, ce signal d'enveloppe permet au récepteur de synchroniser le remplissage sur la partie non utilisée des burst.
Un générateur d'impulsions, permettant de dupliquer ce signal et de l'ajuster en longueur, délai et tension, est utilisé pour distribuer de façon optimale les signaux d'enveloppe à l'émetteur et au récepteur.
A terme, ces fonctions devront être intégrées séparément dans le module d'émission à l'ONT et de réception à l'OLT.

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

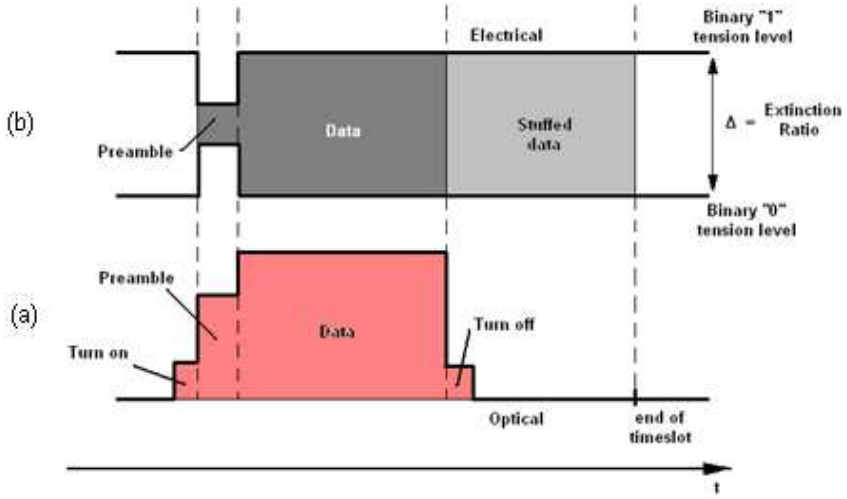


Figure 119 : Burst optique émis par l'EML (b) et reçu par la CDR après remplissage (a)

1.1.2. Evaluation de la transmission

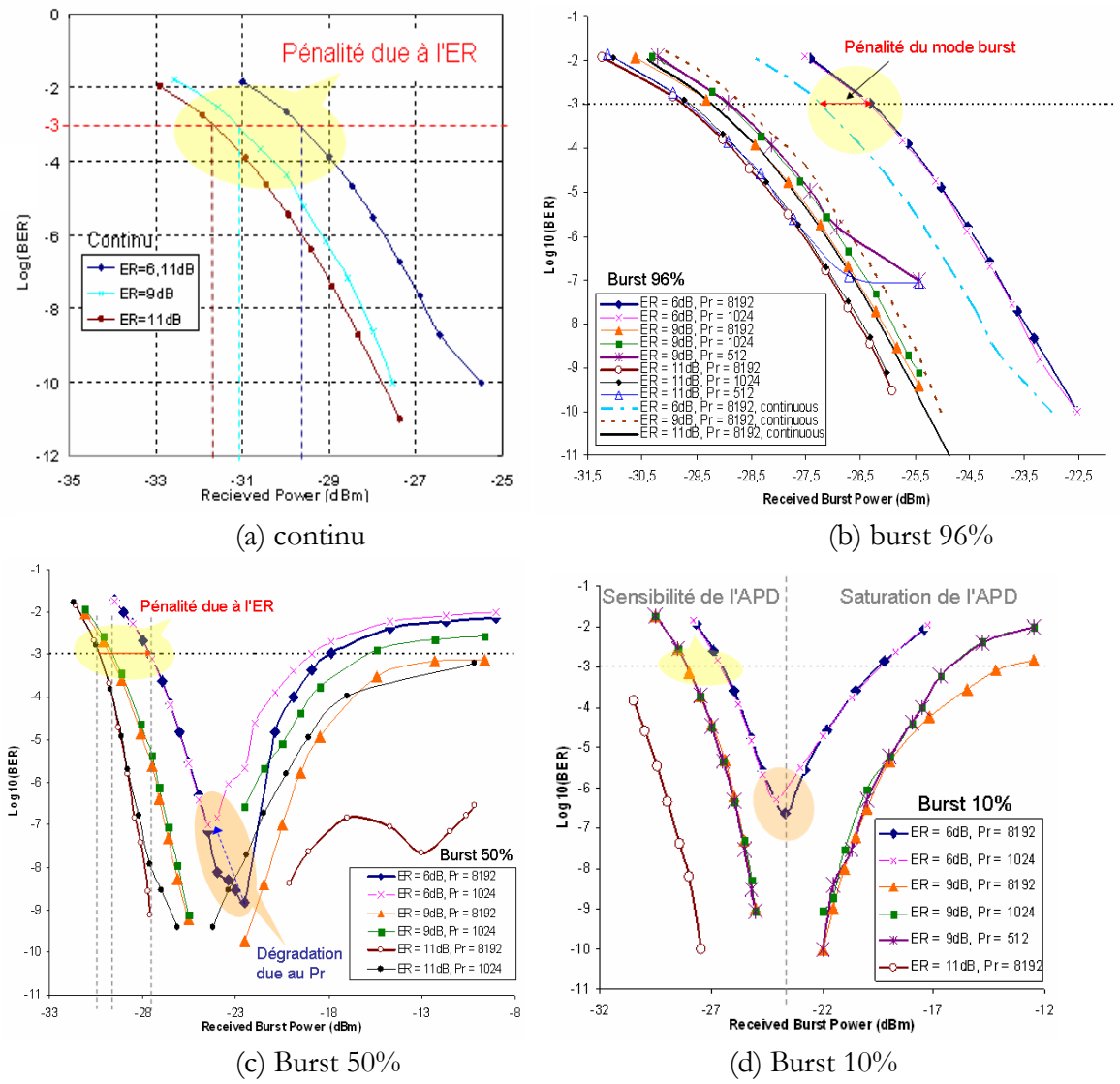
Suivant le schéma d'expérimentation présenté en Figure X (plus haut), nous avons évalué l'impact du taux d'extinction (ER), de la longueur du préambule (Pr) et de la longueur du burst sur la qualité de la transmission en back-to-back.
Un EML émet à une longueur d'onde centrale de 1550nm pour une puissance optique de +4dBm. Sa fréquence de coupure à -3dB est de 8GHz. Une modulation NRZ y est appliquée par

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

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

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

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



(a) continu (b) burst 96%

(c) Burst 50% (d) Burst 10%

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

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

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

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

Impact de la longueur du préambule

En observant chacune de ces courbes, on remarque que raccourcir la longueur de préambule va dégrader les performances de transmissions, dans le sens où la puissance de saturation devient plus faible, et la sensibilité du récepteur légèrement plus élevée, ce qui laissera moins de marge pour le budget optique entre un client proche et un client lointain.
On peut relier cette dégradation au couplage AC de l'APD au LIA qui provoque une dérive de la composante continue pendant la réception du préambule, ce qui par conséquent dégrade également le seuil de décision du LIA.

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

Impact de la longueur du paquet

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

Performances en budget optique

Le Tableau 25 synthétise les performances en budget optique selon la longueur du burst, la longueur du préambule et le taux d'extinction. Le budget optique est calculé suivant la puissance émise par l'EML qui varie selon la longueur du burst et le taux d'extinction, et la sensibilité du récepteur relevée pour un BER de 10^{-3} sur les courbes précédentes.
Cet affichage en fonction du budget optique permet de confirmer que la longueur du burst n'a pas d'impact sur le budget optique, contrairement à la longueur du préambule qui, quand elle diminue, augmente le budget optique minimum (saturation du récepteur). Le taux d'extinction affiche lui un effet important sur les budgets optiques minimum et maximum possibles d'où une forte variation de la gamme de budgets possibles. Seuls quelques cas sont compatibles avec la classe N1 du XGPON (14-29dB), les autres cas sont limités par la saturation du récepteur qui est facilement contrôlable en atténuant l'émission des utilisateurs les plus proches du central.
Finalement, on retiendra une performance de 30dB de budget optique pour un taux d'extinction de 6dB, une longueur de préambule de 1024 et un burst de 12.5µs qui est le pire cas de cette évaluation.

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

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

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

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

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

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

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

1.2.1. Choix des amplificateurs

Parmi les amplificateurs adaptés au réseau d'accès optique, cités au chapitre 2, le choix va s'effectuer selon leurs bandes spectrales, leurs gains, leurs facteurs de bruit (NF) et leurs puissances de saturation.
La bande spectrale affectée aux signaux descendants du 10GPON (1570-1580nm), contrairement au GPON, est cette fois adaptée à un EDFA qui offre les meilleures performances en termes de gain et de facteur de bruit. En réalité, notre transmission se trouve en marge de la bande d'amplification de l'EDFA mais nous allons montrer que l'amplification d'un signal 10GPON descendant est tout de même possible avec un EDFA.
Pour les signaux montants (1270nm-1280nm), un SOA (ou un PDFA si cette technique arrive à se développer) est la seule solution adaptée.
Nous avons donc testé les performances d'une architecture 10GPON étendue par un EDFA et un SOA pour une transmission descendante en mode continu et une transmission montante en mode burst.

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

Caractéristiques des amplificateurs utilisés	Mode continu à1550nm @ 300mA ; Pin=-30dBm		Mode burst à 1310nm @ 300mA ; Pin=-20dBm
	EDFA Manlight	SOA Covega	SOA Alphion
NF (dB)	5	7	6,5
Gain (dB)	42	12,5	18,5
Lambda centrale (nm)	1550	1550	1310
Largeur spectrale (nm)	40	80	60

Tableau 26 : Principales caractéristiques des amplificateurs utilisés

Pour amplifier une transmission descendante (1570-1580nm), en mode continu, nous avons utilisé un EDFA provenant du fabricant Manlight, et un SOA fabriqué par Covega. Ils présentent des caractéristiques très différentes qui devront nous permettre de mettre en évidence des performances différentes.
Pour une transmission montante (1270-1280nm), nous n'avons testé pour l'instant qu'un seul amplificateur : un SOA fabriqué par la société Alphion. A terme, il faudra envisager de tester d'autres amplificateurs disponibles dans cette bande d'amplification.

1.2.2. Amplification en mode continu

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

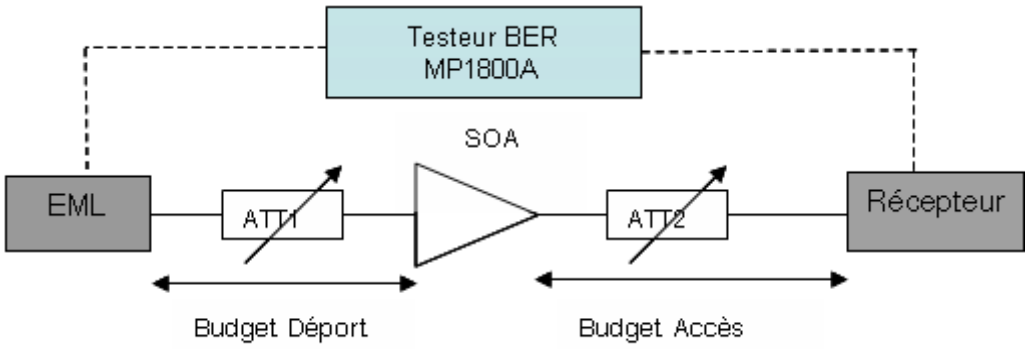


Figure 121 : Schéma d'expérimentation de l'amplification de signaux à 10Gbit/s

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

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

Pour valider une bonne transmission, un taux d'erreur inférieur à 10^{-3} est requis dans la pire configuration, soit pour un taux d'extinction de 6dB. Nous avons en effet pu remarquer au paragraphe 1.1.2 de ce chapitre que c'est le cas le plus pénalisant sur cette transmission. Dans ce cas, on obtient une sensibilité du récepteur de -28,6dBm. L'EML émettant à 5,6dBm, cela représente un budget optique de 34,2dB sans amplification.
Pour les mêmes raisons et similairement aux études menées sur le GPON (cf Chapitre 2), nous avons cherché à augmenter ce budget optique en y insérant de l'amplification optique à l'aide d'un EDFA ou d'un SOA.

1.2.2.1. Amplification à l'aide d'un EDFA

Contrairement au GPON, le signal descendant d'un 10GPON est défini par la norme G987.2 autour de 1577nm, qui est cette fois à la limite de la bande spectrale d'amplification d'un EDFA. Nous avons donc choisi de tester ce type de d'amplificateur qui permet d'offrir un gain maximum pour augmenter le budget optique du 10GPON.
Cependant, il est important de noter que l'EML utilisé pour notre dispositif de test émet à une longueur d'onde de 1550nm, qui est donc plus centrée sur le spectre de l'EDFA que celle spécifiée par la norme.

Tout d'abord, le fonctionnement de l'EDFA Manlight a été optimisé pour un courant de polarisation de la diode de pompe constant à 300mA. Au-delà de ce courant, aucune amélioration des paramètres n'a lieu : même facteur de bruit, sensiblement le même gain et le même budget optique obtenu. En deçà, ces performances sont réduites.
Ensuite, pour des budgets déport fixés à 15dB, 20dB, 25dB et 30dB, nous avons mesuré le BER de la transmission avec EDFA, en faisant varier la puissance reçue à la photodiode à l'aide de l'atténuateur présent sur le budget accès. Nous obtenons ainsi les courbes de BER présentées en Figure 122.

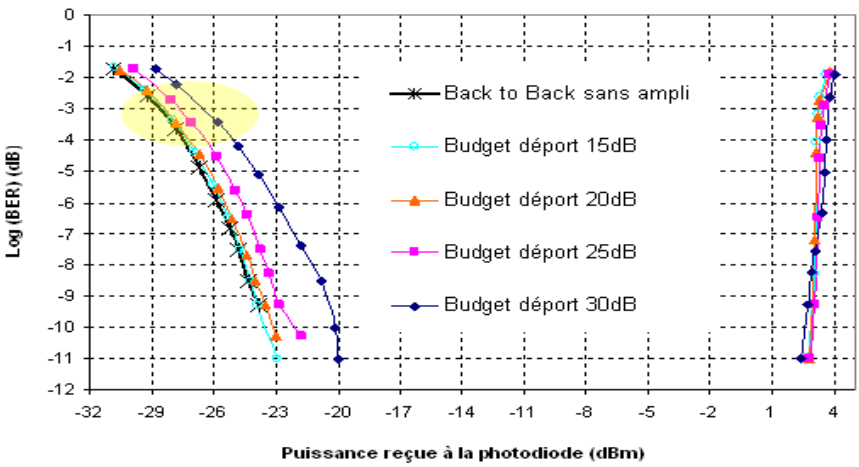


Figure 122 : Courbes de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec et sans EDFA

Ces courbes nous permettent d'observer la réponse du récepteur à une transmission continue d'un signal à 10Gbit/s à travers un amplificateur à fibre dopée Erbium. En comparaison à la courbe de back to back sans amplification, on remarque une pénalité sur la sensibilité de l'APD de plus en plus élevée à mesure que le signal entrant dans l'amplificateur est fortement atténué (budget déport élevé). En effet, le rapport signal à bruit étant affaibli en entrée de l'amplificateur, il est d'autant plus dégradé en sortie de l'EDFA.
De plus, le réglage du seuil de décision de la photodiode est réalisé manuellement et optimisé en back to back. Si on abaisse ce seuil, cela permettra de détecter, à une meilleure sensibilité, des signaux dont l'OSNR est plus faible. Il faudrait donc envisager l'implémentation d'un réglage automatique du seuil de décision de la photodiode sur ce type de récepteur.

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

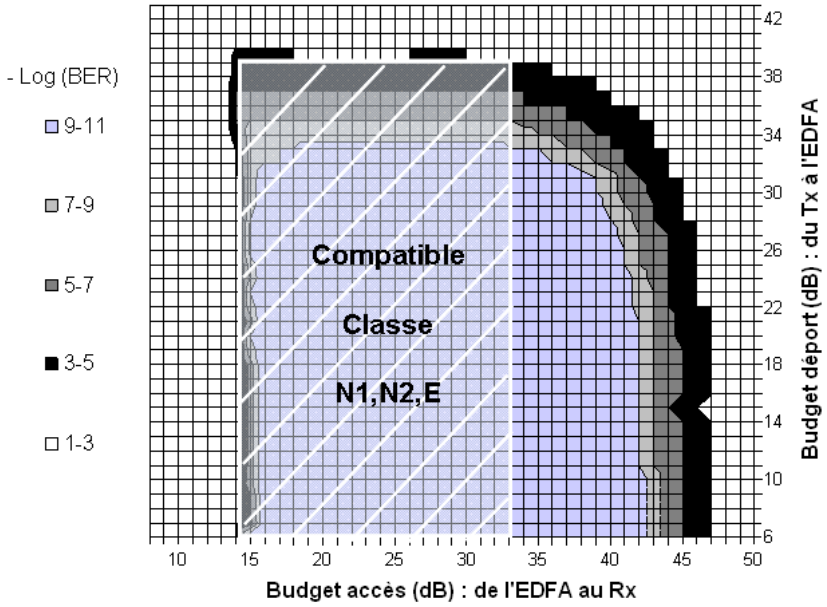


Figure 123 : Cartographie de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec EDFA

Cette cartographie montre que l'on peut établir une transmission à 10Gbit/s pour un budget accès suivant les classes N1 (14-29dB), N2 (16-31dB) et E (18-33dB) du 10GPON, avec un budget déport supplémentaire 39dB.
On remarquera aussi que le budget accès peut être étendu jusqu'à 45dB grâce à l'EDFA pour un budget de déport toujours conséquent : 27dB.
Ces performances sont liées au gain très élevé de l'EDFA (40dB) mais aussi à sa puissance de saturation qui permet d'obtenir un signal s'élevant à 18dBm en sortie de l'amplificateur.
Au total, sur cette architecture présentant la transmission du signal descendant à 1550nm, d'un 10GPON amplifié par un EDFA, un budget optique maximum de 72dB est possible en garantissant un BER inférieur à 10^{-3}.
Cette performance devrait cependant être réduite pour un signal à 1577nm qui se trouverait en marge de la bande d'amplification de l'EDFA testé. Ne disposant pas à cet instant d'EML à cette longueur d'onde, cette étude fait aujourd'hui partie des travaux à venir sur ce type de transmission. De plus, l'utilisation d'un EDFA bande L, décrit au chapitre 2 (page 91), peut également être envisagée pour amplifier une transmission à 10Gbit/s à 1577nm. Ce type d'évaluation sera mis en œuvre par la suite en se basant sur le même type de mesures que nous venons de réaliser.

1.2.2.2. Amplification à l'aide d'un SOA

Nous avons ensuite mis en place le SOA Covega sur l'architecture précédente. Nous avons tout d'abord testé cet amplificateur pour plusieurs courants de polarisation : 100mA, 200mA et 300mA, et nous avons observé qu'il présentait des performances optimales pour un courant de 300mA. Par exemple, la différence de performance entre 200mA et 300mA, se traduit par 3dB de gain supplémentaire et un NF plus faible de 0,5dB à 300mA, qui permettent de fournir un meilleur rapport signal à bruit sur une plus grande plage de variation de budget optique.
Ensuite, de la même façon que pour l'EDFA, nous avons établi les courbes de BER pour des budgets de déport fixés à 15dB, 20dB, 25dB et 30dB. Ces résultats sont présentés en Figure 124.

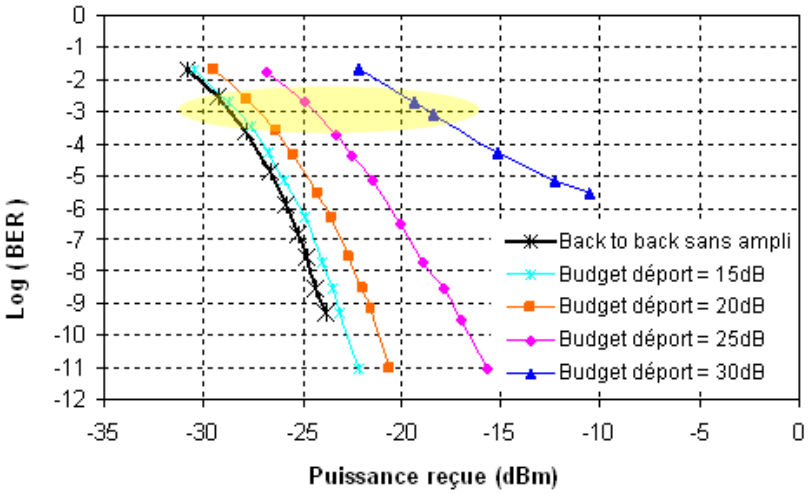


Figure 124 : Courbes de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec et sans SOA

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

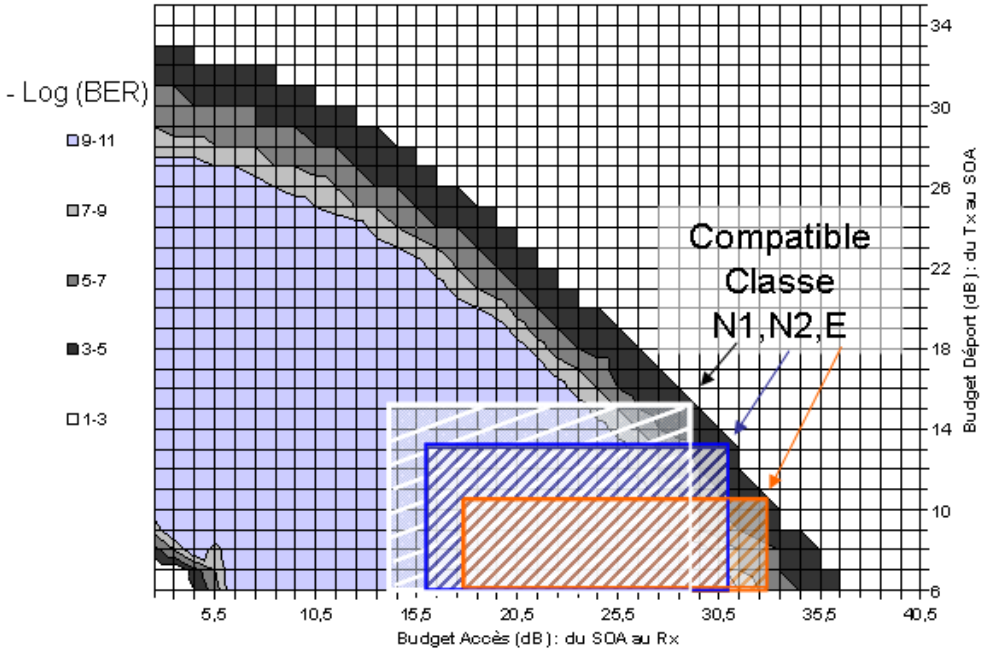


Figure 125 : Cartographie de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec SOA

En termes de budgets optique, cette cartographie de BER, affichée en Figure 125, montre que l'amplification par SOA permet d'atteindre des budgets d'accès compatibles avec les classes N1 (14-29dB), N2 (16-31dB) et E (18-33dB) avec un déport supplémentaire respectivement de 15dB, 13dB et 10,5dB.
Un budget optique total maximum de 44dB est possible, montrant ainsi un résultat similaire à celui du GPON (cf. Chapitre 2, 3.3.1.1).
Nous pensons tout de même pouvoir améliorer ces résultats en utilisant un SOA présentant de meilleures performances : un gain plus élevé pour un facteur de bruit similaire. Cela fera l'objet d'une prochaine étude avec un SOA dont le gain s'élève à 20dB.

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

1.2.2.3. Implémentation d'un filtrage optique

Nous avons déjà démontré l'impact de la dégradation de l'OSNR provenant d'un amplificateur inséré sur une transmission GPON ou 10GPON. Dans le but de limiter cette dégradation du budget optique lié au bruit d'ASE, nous avons cherché à déterminer l'apport d'un filtrage optique de ce bruit inhérent aux amplificateurs.
Pour cela, nous avons inséré 3 types de filtres optiques sur l'architecture précédente avec SOA, placés juste en sortie de ce dernier. Dans le cas où le filtrage montrerait un intérêt certain, il pourrait être intégré en sortie de ce module d'amplification.
Des filtres centrés autour de 1550nm, de type CWDM de largeur 11nm, passe bande de largeur 5nm, et DWDM de largeur 0,8nm (AWG) ont été mis en place sur l'architecture de test. Nous avons ensuite repris nos mesures de BER afin d'afficher les courbes de BER en présence de chaque type de filtre. Ces résultats sont affichés en Figure 126, pour les deux cas extrêmes de budgets de déport 15dB et 30dB qui affichent respectivement le meilleur ONSR et le pire ONSR relevés sans filtrage en sortie du SOA.

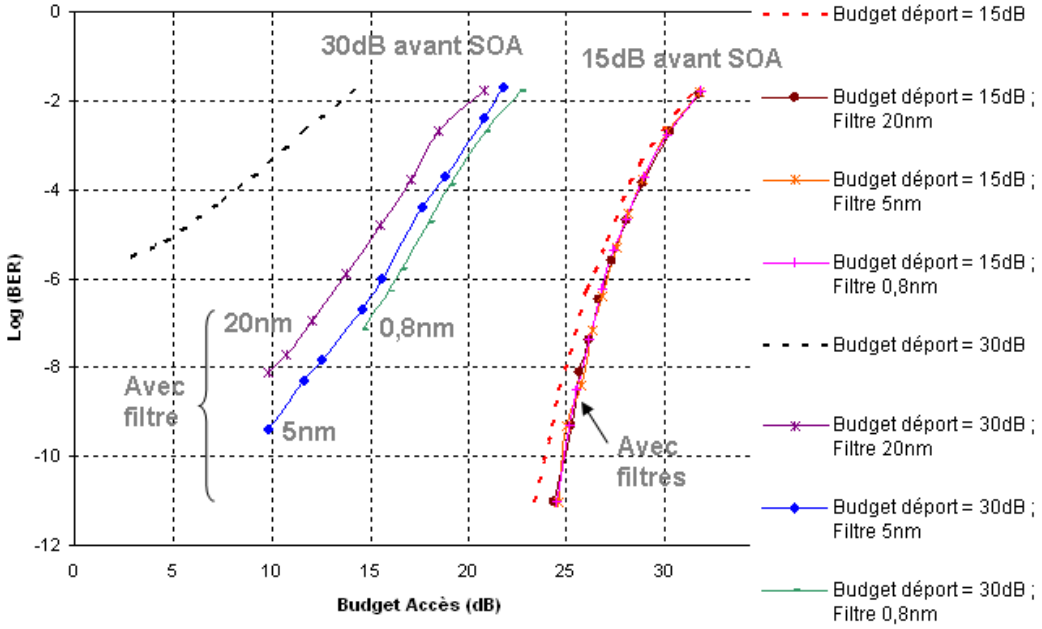


Figure 126 : Courbes de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec SOA + filtres

Sur cette figure, on peut remarquer un gain significatif de budget accès apporté par le filtrage optique dans le cas d'une faible puissance en entrée du SOA (30dB d'atténuation avant l'amplificateur). Dans ce cas, le SOA est peu saturé et produit beaucoup d'émission spontanée ce qui implique une forte contribution d'ASE et un mauvais ONSR en sortie de l'amplificateur. Pour un BER de 10^{-3}, on peut alors atteindre un budget optique en accès de 17,5dB soit un gain de 7dB, apporté par un filtrage CWDM. Avec un filtrage plus fin, de 5nm ou 0,8nm, on obtient respectivement encore 2 à 2,5dB supplémentaires, soit un budget d'accès de l'ordre de 20dB.
Ce gain s'avère beaucoup moins important pour une plus forte puissance injectée dans le SOA, soit pour 15dB d'atténuation avant le SOA. On observe un gain d'à peine 0,5dB sur le budget accès, quel que soit le type de filtre utilisé.
Si on imagine maintenant ces résultats représentés sur la cartographie de budget, on aurait un zone de fonctionnement moins biseautée pour un fort budget de déport donc une zone plus rectangulaire qui faciliterait ainsi l'application des règles d'ingénierie, avec un budget maximum pouvant atteindre 50dB.
L'apport d'un filtrage très fin, comparé au coût supplémentaire qu'il engendre, fait du filtre de largeur 5nm ou du filtre DWDM, de piètres candidats pour nos applications de réseau d'accès. De plus, un filtrage aussi fin imposerait l'implémentation d'un contrôle de température des émetteurs afin de garantir une grande stabilité en longueur d'onde des lasers. Par ailleurs, le standard G987.2 établi une plage de variation possible de la longueur d'onde descendante émise de 1570nm à 1580nm. Pour respecter cette contrainte, l'implémentation d'un filtre d'une largeur inférieure à 10nm sera impossible.
On peut conclure qu'un filtrage optique de type CWDM peut s'avérer utile dans le cas d'une amplification par SOA d'un signal continu descendant d'un 10GPON.

1.2.3. Amplification en mode burst dans le cadre du XGPON2

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

Nous avons commencé par démontrer la faisabilité d'une transmission montante en mode burst à 10Gbit/s et nous venons de conclure sur l'amplification de son signal descendant à ce même débit.
Afin de valider les expériences d'extension de portée dans le cadre du XGPON 2, nous devons également démontrer la possibilité d'obtenir des résultats similaires sur une transmission bidirectionnelle à 10Gbit/s donc aussi bien pour l'amplification des signaux descendants que montants, avec cette fois la difficulté de l'implémentation du mode burst à 10Gbit/s.
Nous avons pour objectif de réaliser le même type de tests que pour une transmission continue : détermination des courbes de BER et de la cartographie de budget optique pour établir la performance de l'amplification optique sur une transmission à 10Gbit/s en mode burst.

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

Cette fois, nous n'avons pas utilisé le module de réception possédant la fonction de remplissage des burst, présenté précédemment (section 1.1.1, chapitre 3), mais des composants discrets prévus essentiellement pour une transmission continue.
Les sources optiques utilisées dans les deux ONU de l'étude, dont l'émission doit être à 1310nm, sont des lasers à modulation directe (DML). Celle-ci est réalisée à l'aide d'un contrôleur de courant. Pour un courant de polarisation de 200mA, les DML émettent une puissance optique de 12dBm. Pour le calcul du budget optique, nous y avons soustrait 5dB afin d'être conforme à la norme G987.2 (7dBm).
La réception est réalisée à l'aide d'une photodiode APD suivie d'un TIA dont le seuil de détectivité (BER de 10^{-3}) est mesuré à -32dBm et la puissance de saturation établie à -2dBm. Un module de récupération d'horloge est composé d'un DC Block et d'un amplificateur électrique permettant d'adapter le niveau électrique du signal nécessaire à la CDR. Celle-ci fonctionne normalement en continu, à un débit de 10,7Gbit/s.

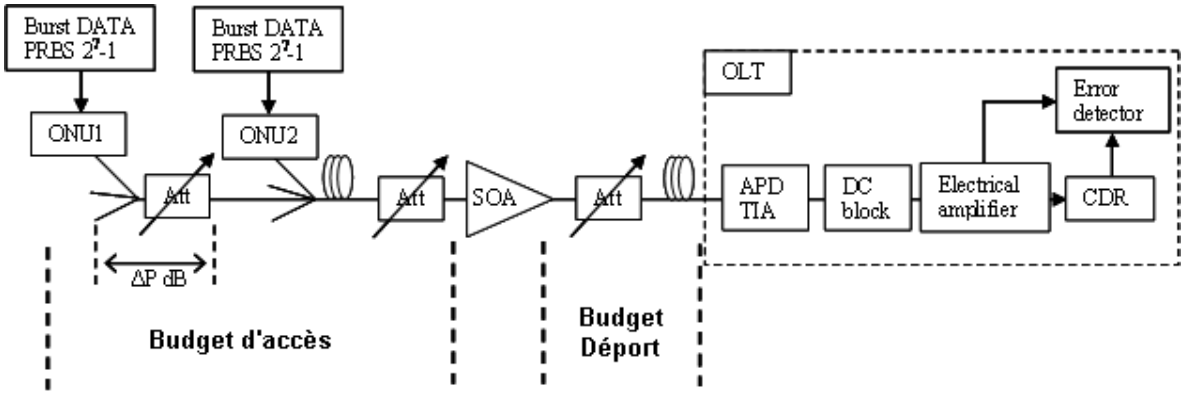


Figure 127 : PON amplifié à l'aide d'un SOA à 10.7Gbit/s

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

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

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

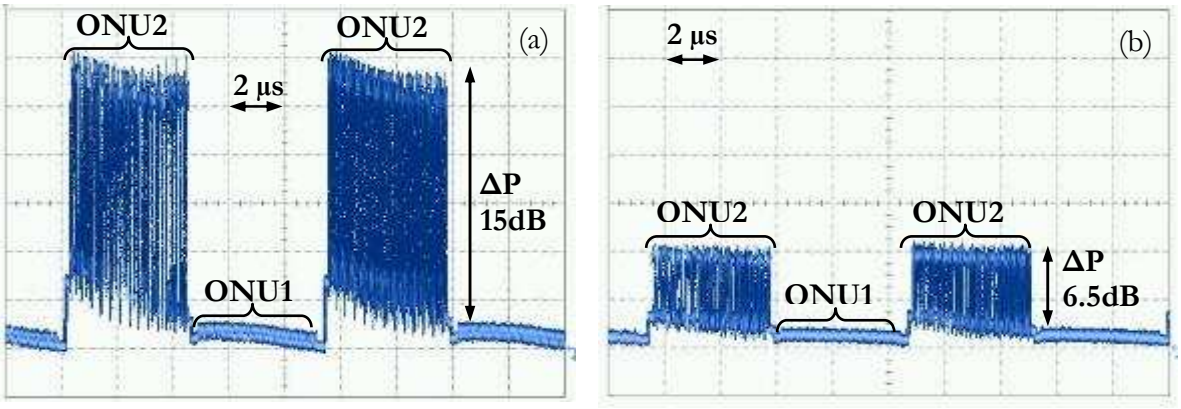


Figure 128 : Trames montantes avant (a) et après le SOA(b)

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

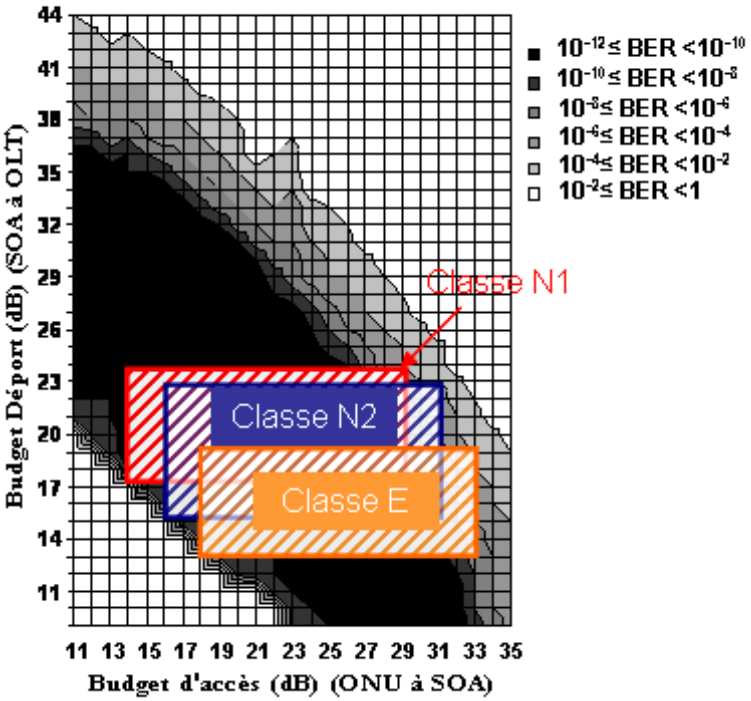


Figure 129 : Evolutions du budget déport en fonction du budget d'accès

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

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

On observe ainsi une zone de fonctionnement similaire à celles obtenues à l'aide d'un DSOA sur GPON en transmission bidirectionnelle, ou encore d'un SOA sur la transmission descendante d'un 10GPON. Les zones hachurées représentent les zones compatibles avec un budget d'accès de classe N1, N2, et E auxquelles on associe un budget de déport atteignant respectivement 24dB, 23dB et 19dB.
Un budget total maximum de 54dB est obtenu dans cette zone de travail et pour une transmission sans erreurs (BER<10^{-3}).
Afin de visualiser l'évolution du BER en fonction de la puissance reçue par la photodiode, nous avons décidé de tracer quatre courbes de BER pour quatre budgets d'accès fixés à : 17, 27, 29 et 31dB.

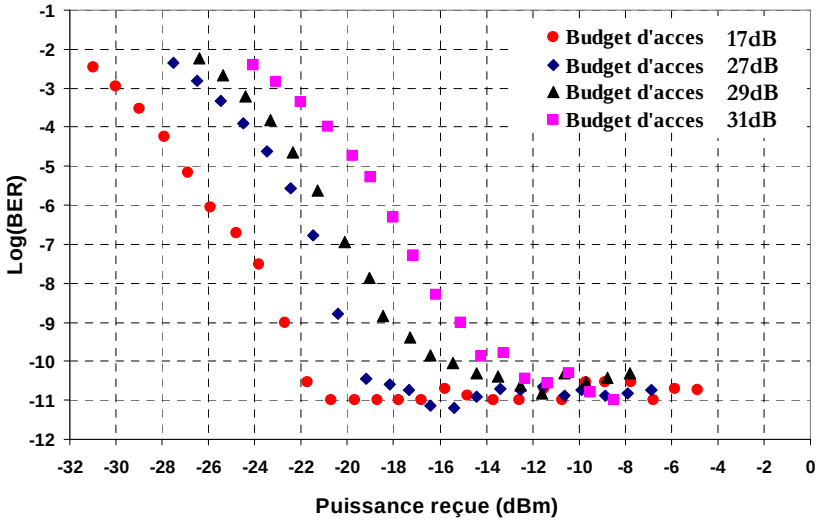


Figure 130 : Courbes de BER en fonction de la puissance reçue à l'OLT

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

A partir de la Figure 130, on constate que plus le budget d'accès est grand, plus le signal transmis se détériore. En effet, en augmentant le budget d'accès, la puissance d'entrée dans le SOA diminue et par conséquent la contribution de l'ASE en sortie de l'amplificateur est plus élevée. Cela se reflète sur le graphique par le décalage à droite des courbes et donc par la perte en sensibilité à la réception. Si pour un budget d'accès égal à 17dB, un BER de 10^{-3} est obtenu pour une puissance reçue mesurée égale à -30dBm, pour un budget de 31dB et pour le même BER, la puissance reçue baisse de 8dB pour n'atteindre que -22dBm.
Un plancher d'erreurs à un BER de 10^{-10} apparaît sur toutes les courbes tracées quel que soit le budget d'accès fixé. La source de ce plancher est la présence importante du bruit de l'ASE dans le signal reçu par la photodiode qu'aucun filtre optique n'élimine avant la réception.

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

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

1.3. Convergence GPON –NGPON 1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

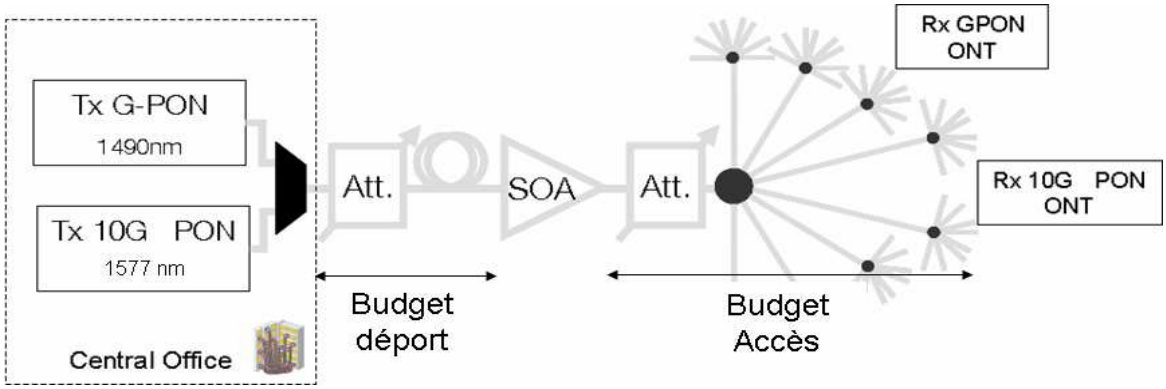


Figure 131 : Architecture de coexistence GPON-10GPON

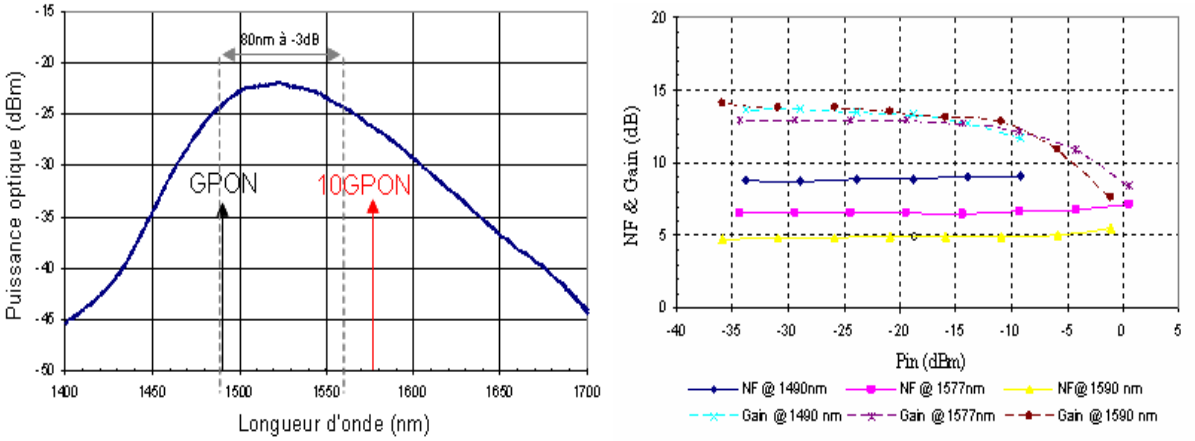
La mutualisation de ces deux technologies se fait au niveau du central par l'intermédiaire d'un multiplexeur à deux entrées, l'une large de 20nm centrée à 1490nm et l'autre sur une bande de 1528 à 1565nm. Le même type de multiplexage assure la fonction de démultiplexage en réception aux ONT. Cette réception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

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

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

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

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

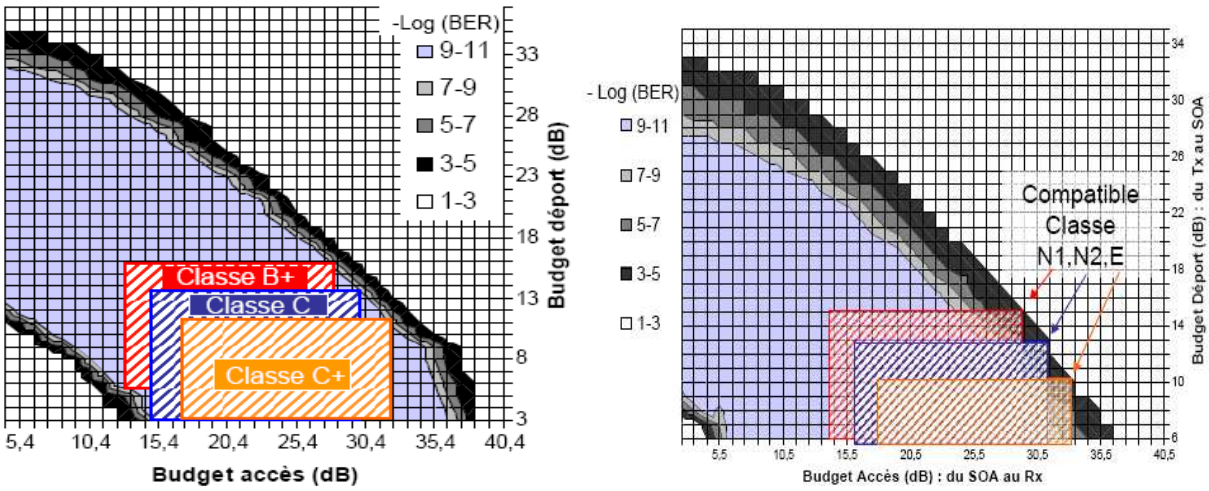


(a) (b)

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

Le spectre relevé offre une large bande d'amplification : 83nm mesuré à -3dB du pic de gain situé à 1520nm. C'est donc un amplificateur adéquat pour amplifier la longueur d'onde descendante du GPON à 1490nm. D'après ce spectre, le SOA apportera moins de gain sur la longueur d'onde descendante du 10GPON à 1577nm car elle se situe à 6dB en dessous du pic de gain.
Pourtant, nous avons caractérisé cet amplificateur en facteur de bruit et Gain pour ces longueurs d'onde : à 1490nm il affiche un NF de 8.8dB pour un gain de 14dB ; à 1577nm, il affiche un NF plus faible (7dB) pour un gain également réduit (12.5dB) notamment car la contribution de l'ASE y est plus faible. Le SOA n'amplifie donc pas de la même façon un signal provenant d'un GPON ou d'un 10GPON.

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



(a) (b)

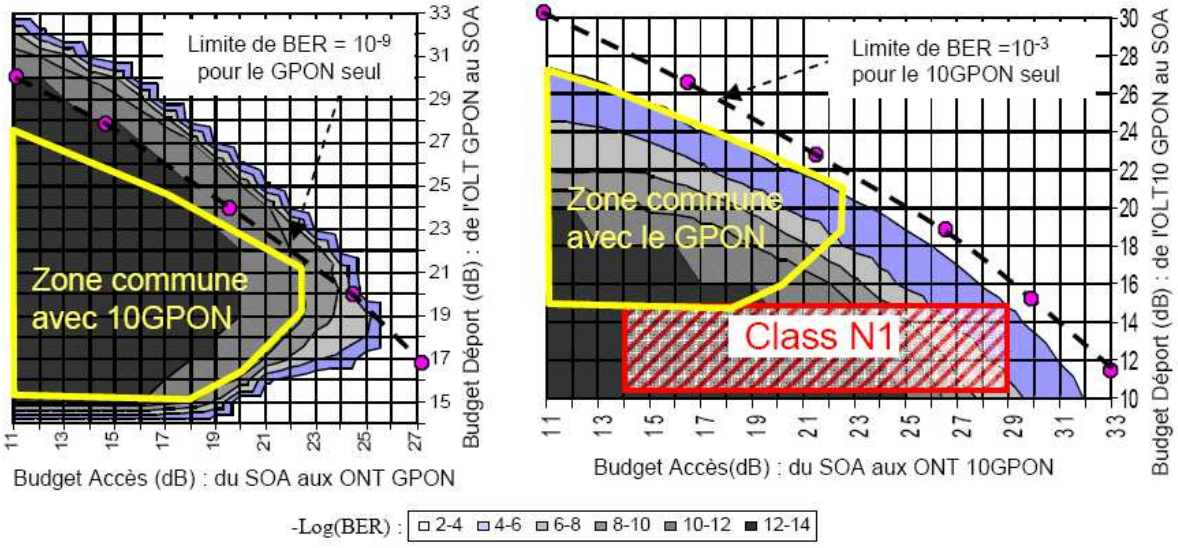
Figure 133 : Cartographies de BER associées aux transmissions GPON seule (a) et 10GPON seule (b) avec le même SOA.

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

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

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

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



(a) **(b)**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Extension de portée NGPON-2

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

- une architecture
  - calquée sur le modèle existant dans le but d'offrir une possibilité de **convergence des topologies et des technologies**
  - complètement ouverte à toute proposition : aucune contrainte de réutilisation de l'infrastructure déjà déployée (zone "verte")

- des techniques de multiplexage différentes :
  - temporel à travers les **PON TDM**
  - en longueur d'onde avec les **PON WDM**
  - en fréquence à travers des techniques de SCM ou OFDM (multiplexage de sous porteuses)
  - par code avec l'OCDMA

- des techniques de modulation variées :
  - modulation d'amplitude de type NRZ
  - modulations vectorielles de type xPSK, QAM
  - modulations du type OFDM, COOFDM, **AMO-OFDM** qui sont en réalité une modulation de phase, associée à un multiplexage fréquentiel. (Par abus de langage, on parle souvent de "modulation OFDM".)

On réalise alors l'ampleur des solutions possibles entrantes dans le cadre du NGPON2 d'autant plus que sa normalisation ne spécifie pour l'instant aucun paramètre lié à ces techniques.
Dans le but d'évaluer l'extension de portée du NGPON2, nous avons choisi d'investiguer les possibilités de l'amplification optique dans le cadre de certaines de ces techniques, à savoir le réseau PON WDM, le multiplexage hybride WDM-TDM et finalement une technique de modulation OFDM.
Enfin, nous allons jauger les capacités de convergence d'architectures étendues de différentes technologies.

2.1. Extension de portée d'un PON WDM

Bien que déployé par certains opérateurs, le PON WDM basé sur un multiplexage en longueur d'onde n'a pas été normalisé. Pourtant, les projets pilotes réalisés proposent le plus souvent un multiplexage de 16 canaux espacés de 1.6nm ou 32 canaux espacés de 0.8nm, modulés à 1.25Gbit/s par longueur d'onde. Chaque longueur d'onde est allouée à un abonné différent. Les performances des émetteurs et des récepteurs permettent une portée de 20km pour un budget optique souvent inférieur à 10dB. (cf Tableau 14, page 71).
De plus, le multiplexage CWDM, proposant des longueurs d'ondes espacées de 20nm, a fait ses preuves depuis le début des années 2000 en montrant un intérêt économique par rapport aux solutions DWDM [70].
On peut d'ailleurs se questionner sur l'augmentation de la portée de tels systèmes. Des solutions bas coût à base d'amplification optique permettraient-elles d'amplifier 32 longueurs d'ondes espacées de 0,8nm ?

Nous allons tenter d'y répondre en évaluant les performances d'un SOA répondant simultanément à l'amplification de plusieurs longueurs d'ondes montantes et descendantes. L'utilisation de ce type d'amplificateur a déjà été démontrée dans le cadre de réseaux WDM métropolitain en anneau [71].

Ensuite, nous nous intéresserons à la mise en œuvre d'un SOA large bande, réalisée dans le but d'amplifier plusieurs canaux CWDM.

2.1.1. Performances d'un SOA avec deux canaux CWDM

Nous avons démontré lors de l'étude sur la convergence du GPON et du 10GPON, qu'il était possible d'amplifier à l'aide d'un seul SOA les deux longueurs d'onde descendantes de ces technologies. Mais, nous avons mis en évidence des pénalités observées sur le budget optique réalisable.
Dans le cadre d'extension de portée du WDM, il s'agit cette fois d'amplifier simultanément plusieurs canaux DWDM ou CWDM et possiblement pour une transmission bidirectionnelle.

L'étude présentée en section 3.2.3 du chapitre 2 (page 104), a synthétisé les résultats d'extension de budget optique obtenus à l'aide d'un SOA amplifiant simultanément deux canaux CWDM co- et contra-propagatifs. Il s'agissait alors d'une transmission bidirectionnelle continue, descendante à 2,5Gbit/s et 1,25Gbit/s. Les longueurs d'onde utilisées dans cette étude ne sont pas adaptées au GPON mais l'on peut exploiter ces résultats afin d'avoir une première approche concernant l'amplification de canaux WDM.

L'architecture de test illustrée en Figure 135 présente l'expérimentation précédente avec une vision WDM.

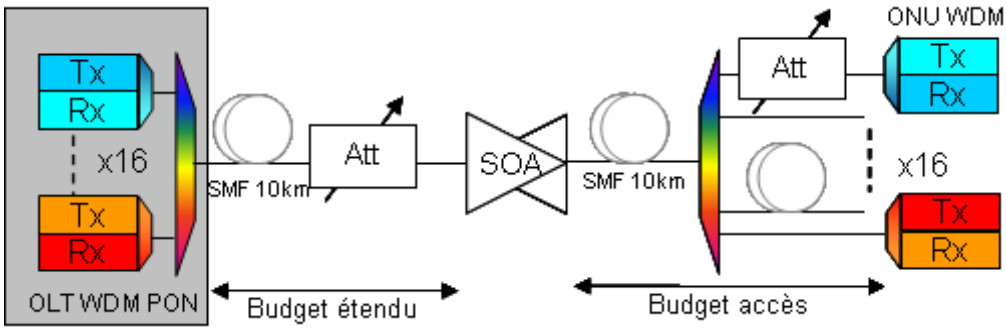


Figure 135 : Exemple d'architecture PON WDM, amplifiée par un seul SOA

Nous n'avons pas implémenté les 16 longueurs d'onde DWDM, destinées à être transmises autour d'une porteuse CWDM centrale montante et descendante. Seule, une porteuse CWDM a été émise dans chaque sens de transmission. Ainsi, nous avons cherché à évaluer le budget optique réalisable sur une transmission continue descendante à 2.5Gbit/s à la longueur d'onde λ_1 et montante à 1.25Gbit/s et λ_2, amplifiées simultanément par un seul SOA.

Les lasers utilisés à l'OLT et à l'ONU sont du type DFB émettant à 1530nm, 1550nm ou 1570nm, une puissance de sortie de 2.5dBm. Ils sont intégrés dans un module SFF avec un récepteur du type APD. La caractérisation de ces émetteurs-récepteurs en back to back est présentée en Figure 136 pour des débits de modulation de 1.25Gbit/s et 2.5Gbit/s.

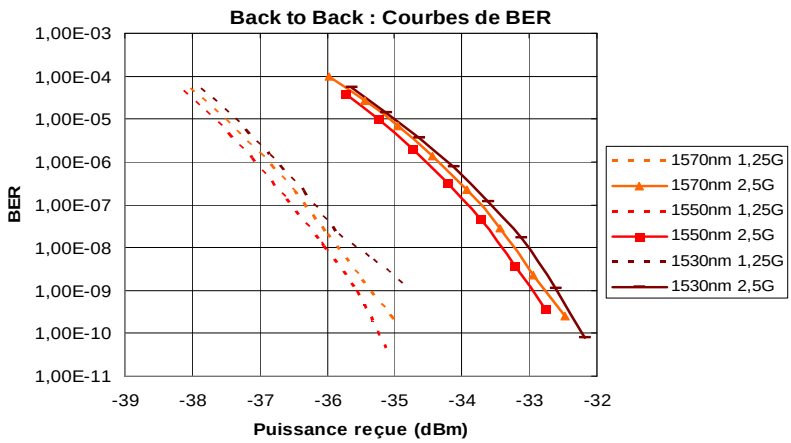
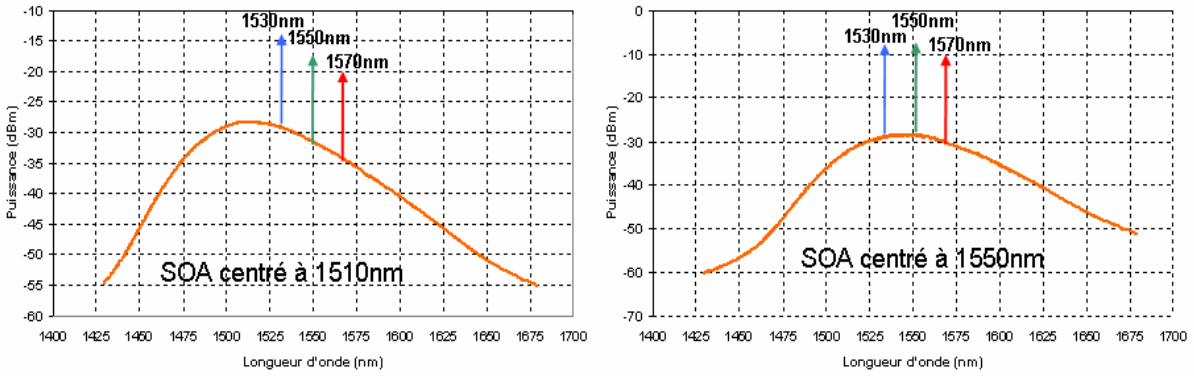


Figure 136 : Caractérisation des émetteurs-récepteurs en back to back

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

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



* Résolution de l'OSA: 0.1nm

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

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

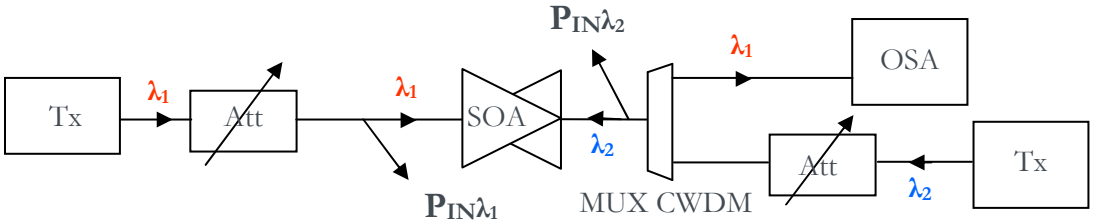


Figure 138 : Schématique de la mesure de NF et Gain d'un SOA amplifiant simultanément une transmission bidirectionnelle

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

Pour visualiser l'influence de chaque canal, nous avons fait varier la puissance de l'onde injectée dans le SOA pour chaque sens de transmission.
Les courbes de NF et gain résultantes de cette mesure sont présentées en Figure 139, pour le SOA dont le pic de gain est à 1510nm, polarisé à un courant de 250mA, et pour une longueur d'onde descendante λ_1 à 1570nm seule ("unidir") puis en présence d'un signal montant dont la puissance injectée varie.

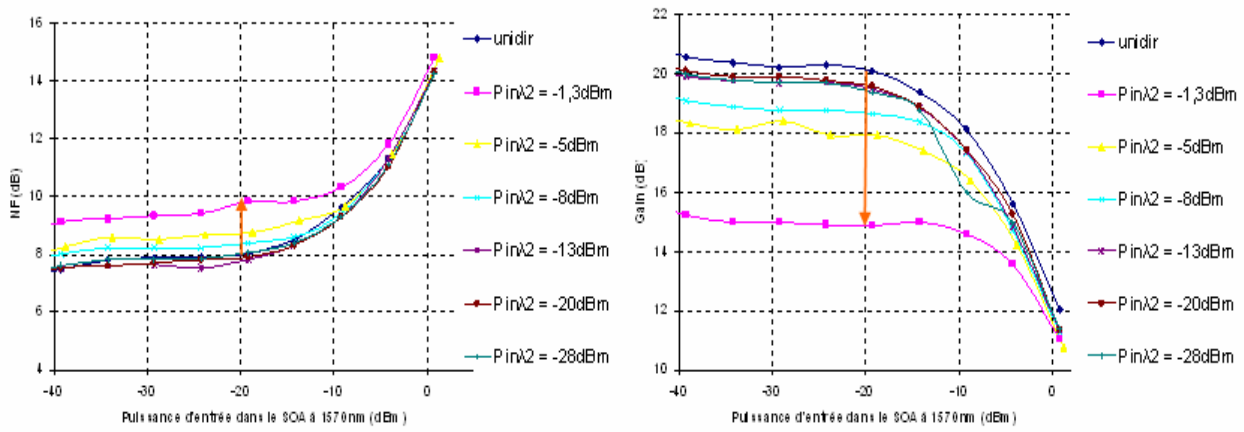


Figure 139 : Courbes de NF et Gain du SOA (pic à 1510nm) pour λ_1 = 1570nm et λ_2 = 1550nm

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

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

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

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

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

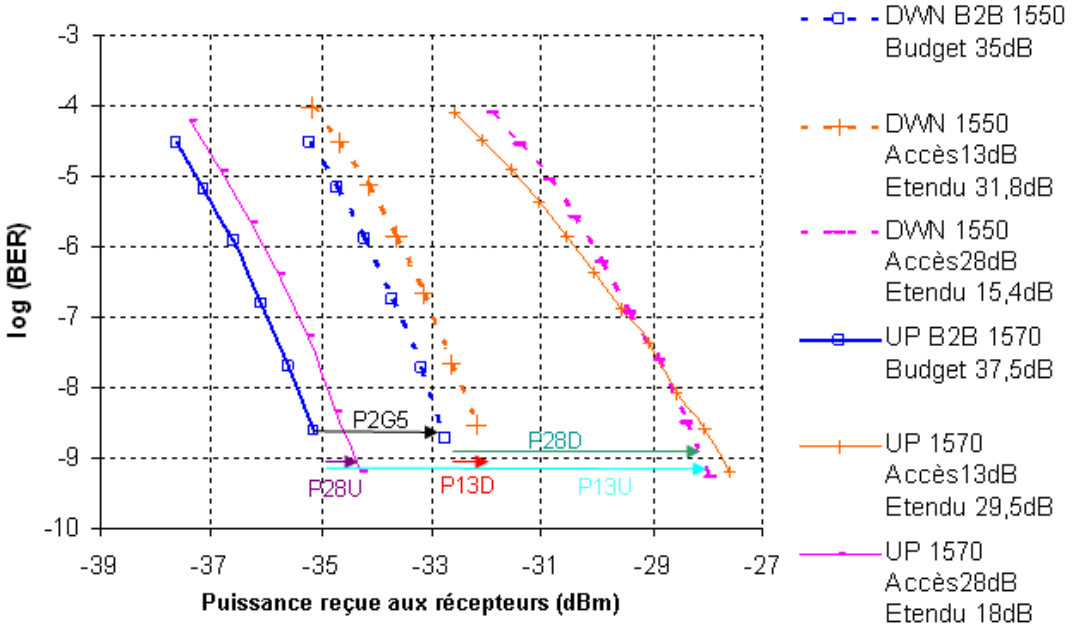


Figure 140 : Courbes de BER d'un SOA en bidirectionnel pour un signal descendant à 2,5Gbit.s & 1550nm et un signal montant à 1,5Gbit/s &1570nm.

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

- **P2G5** correspond à la pénalité de 2dB, conséquente à la différence de débit et de longueurs d'onde des transmissions montantes et descendantes que l'on remarque de manière plus évidente sur la Figure 136.
- **P13D = 0,7dB** : Cela dénomme la pénalité relevée sur la transmission descendante atténuée de 13dB après le SOA qui a permis d'obtenir un budget étendu de 31,8dB. Le signal descendant est atténué de 31,8dB avant le SOA ($Pin\lambda_{down}$ = -34,3dBm) et de 13dB après le SOA. Le signal montant à λ_{up}(1570nm) est atténué de 13dB avant le SOA, ce qui correspond à une puissance injectée $Pin\lambda_{up}$ de -15.5dBm.
- **P13U = 7dB** : C'est la pénalité relative à la transmission montante atténuée de 13dB avant le SOA qui a permis d'obtenir un budget étendu de 29,5dB. Le signal descendant subit ces atténuations en sens opposé. Pour le SOA, cela correspond à un point de fonctionnement où $Pin\lambda_{down}$ = -32dBm et $Pin\lambda_{up}$ = -15,5dBm.
- **P28D = 4,4dB** : Cette fois le BER est mesuré sur la transmission descendante, atténuée de 28dB après le SOA et qui a permis d'obtenir un budget étendu de 15,4dB. Cela correspond à des puissances injectées dans le SOA où $Pin\lambda_{down}$ = -17,9dBm et $Pin\lambda_{up}$ = -30,5dBm.
- **P28U = 0,5dB** : Cette pénalité est associée à la transmission montante atténuée de 28dB avant le SOA où on a pu obtenir un budget étendu de 18dB. Dans cette configuration, au niveau du SOA, on a $Pin\lambda_{down}$ =-20,5dBm et $Pin\lambda_{up}$ = -30,5dBm.

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

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

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

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

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

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

2.2. PON hybride WDM-TDM

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

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

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

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

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

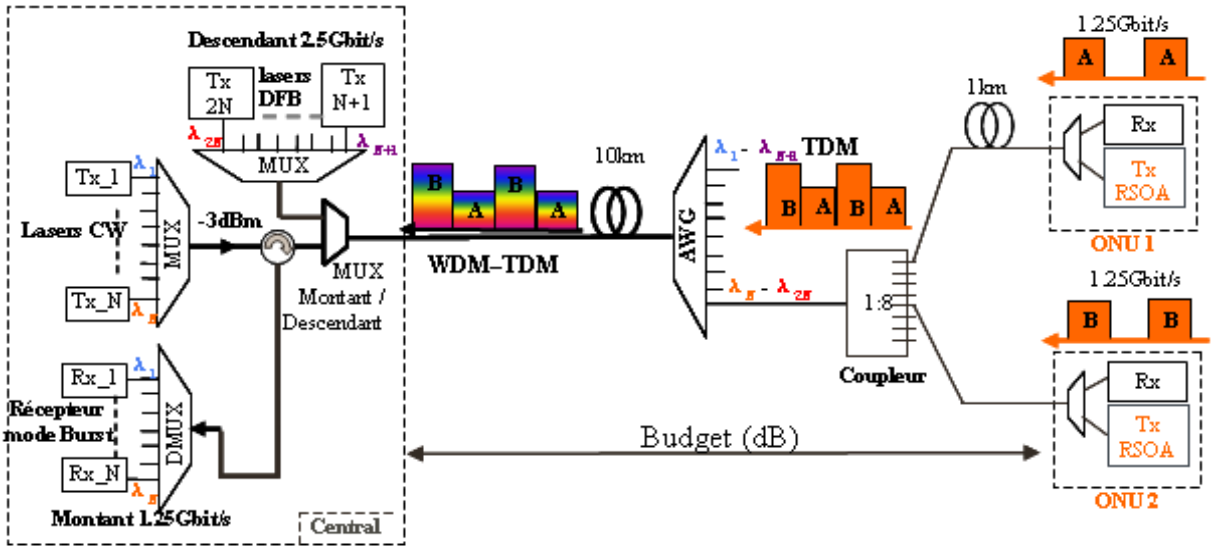


Figure 141 : Architecture d'un réseau hybride PON WDM-TDM

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

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

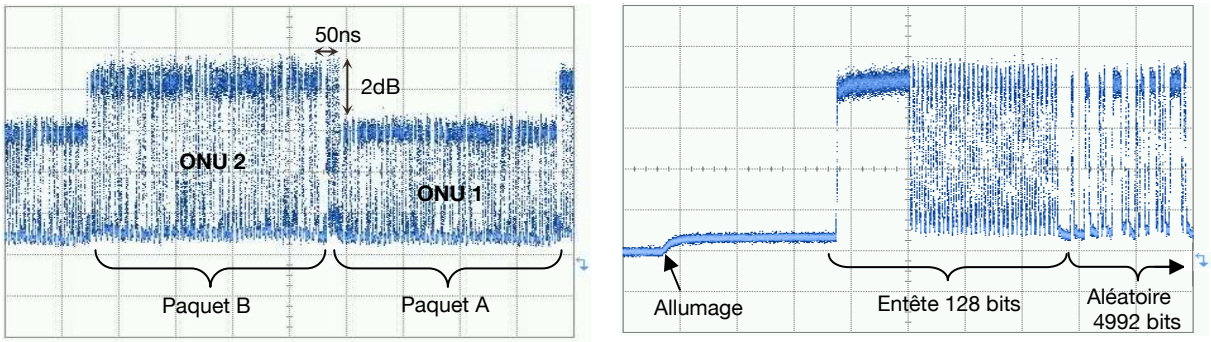
Lors de notre expérimentation, nous n'avons testé qu'un seul arbre PON WDM-TDM à 1550nm en présence de deux ONU. Pour détailler techniquement l'architecture, voici les caractéristiques de chaque élément du réseau. Au central se trouvent la source laser continue (CW) qui va servir de porteuses pour la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

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

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

Résultats expérimentaux obtenus

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



(a) (b)

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

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

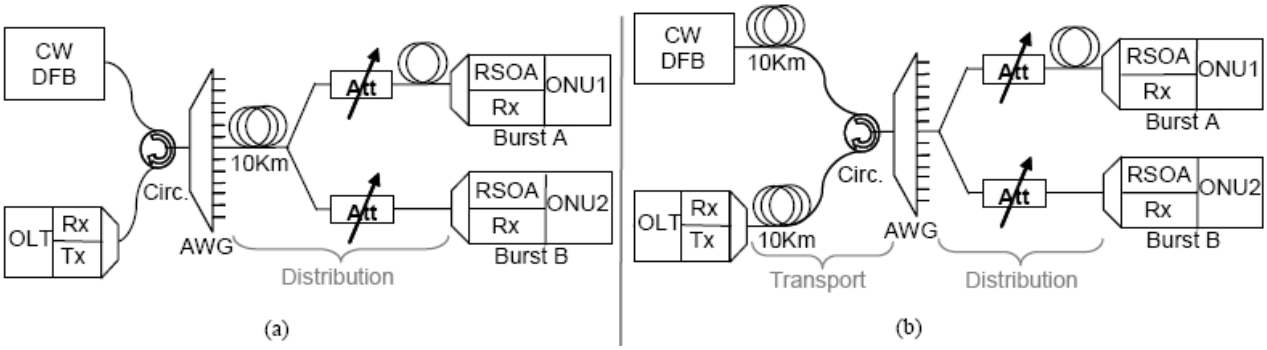


Figure 143 : Architecture avec 10 km de fibre en distribution (a) et double fibre en transport (b)

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

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

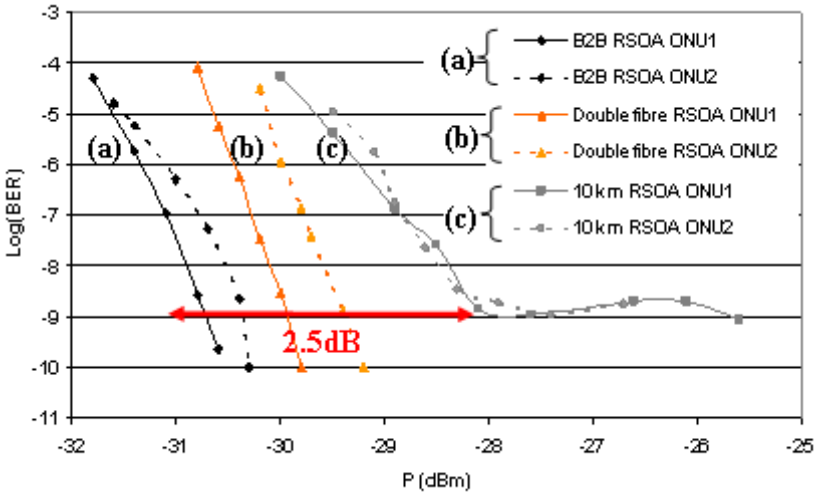


Figure 144 : Courbes de BER d'un ONU

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

Nous avons démontré que l'on peut réaliser une transmission sans erreur, sur une distance de 40km et pour 32×8 ONU soient 256 clients, avec des ONU achromatiques fondés sur des RSOA.
Depuis cette étude réalisée en 2007, des équipes de recherche ont amélioré ces résultats à l'aide d'amplification Raman, réalisant ainsi une transmission à 2,5Gbit/s sur 60km de fibre pour un potentiel de 1024 abonnés sur un PON hybride [85].
Un réseau hybride WDM-TDM basé sur des RSOA s'avère donc être un choix envisageable pour la nouvelle génération de réseau d'accès optique [86].

Dans le cadre du projet européen SARDANA [28], plusieurs études ont intégré ce type d'architecture pour la conception d'un réseau passif à base d'anneau et distribué en arbre PON [87, 88, 89].
Des études concernant l'amplification active [90] ou passive [91,92] en ligne pour ce type d'architecture ont également été expérimentées. Un amplificateur à fibre dopée à pompe déportée (Remotely Pumped Optical Amplifier) peut être intégré sur une architecture PON, tout en conservant le caractère passif du réseau puisque la partie active de l'amplificateur, à savoir la pompe, se trouve déportée au central. Ce signal de pompe est atténué entre le central et la position de l'amplificateur. Cette distance est liée au budget optique maximum de déport possible. Elle impose l'émission de fortes puissances optiques (>20dBm) à l'OLT. Ce type d'amplificateur est disponible dans une bande d'amplification autour de 1550nm et n'est pas utilisable dans les architectures GPON actuelles. Il sera néanmoins tout à fait adéquat pour une migration vers un PON à multiplexage hybride WDM-TDM. Les performances relevées à l'heure actuelle, montrent un budget total de 50dB, réparti entre un budget déport allant de 0 à 18dB et un budget d'accès de 17 à 32 dB [93].

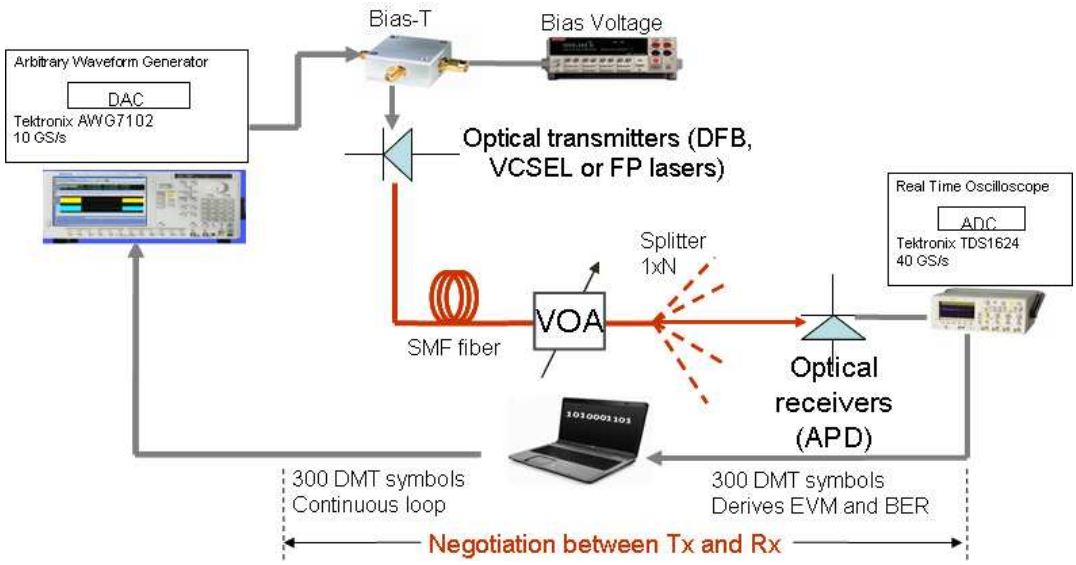
Enfin, ce type d'architecture WDM-TDM fait également partie d'études similaires avec des formats de modulation du type OFDM [94, 95].

2.3. Amplification d'une transmission OFDM

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

2.3.1. Performances des lasers DFB et photodiode APD

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



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

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

Ainsi créé, ce signal OFDM va moduler électriquement les lasers utilisés. Ensuite, comme l'indique la Figure 145, le signal OFDM optique est transmis vers le récepteur. Un atténuateur variable et une fibre monomode dont la longueur variera par la suite sont insérés sur l'architecture afin d'estimer le budget optique possible sur la transmission.
Ce signal est ensuite reçu par une photodiode APD ou PIN avant d'être converti par un convertisseur A/D (Analog to Digital) afin de démoduler le signal OFDM reçu. Aucune compensation de dispersion chromatique n'est mise en œuvre dans cette configuration.

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

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

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

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

Performances optiques de la transmission

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

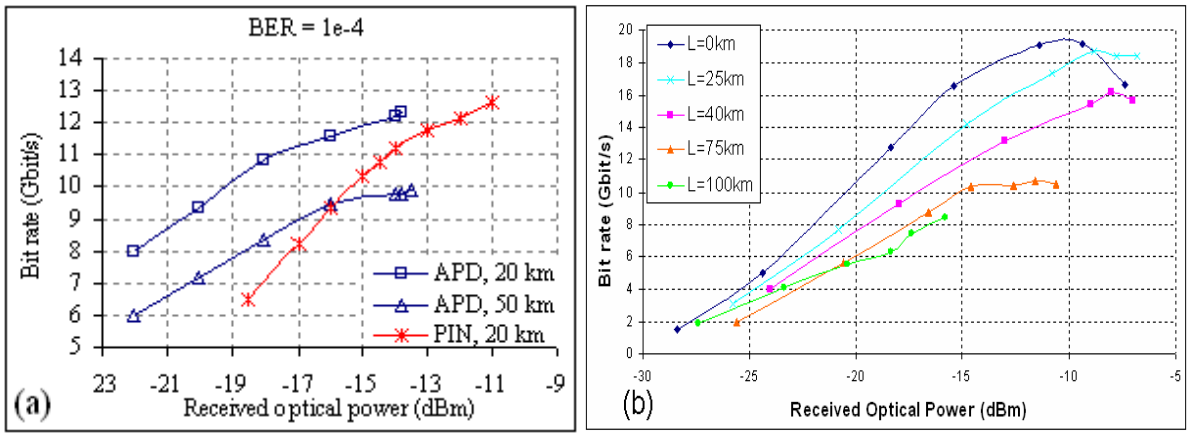


Figure 146 : Evolution du débit OFDM à BER fixe (1.10^{-4}) pour les couples DFB1+APD2.5 [97] (a) et DFB6.9 et APD8 (b)

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

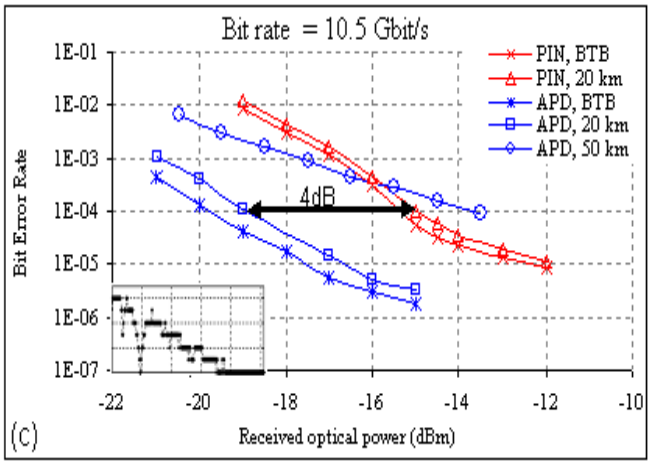


Figure 147 : Evolution du BER à débit fixe (10.5Gbit/s) pour le couple DFB1+APD2.5 en Back to Back ou en présence de 20km, et 50km de fibre [97]

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

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

2.3.2. Insertion de l'amplification optique

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

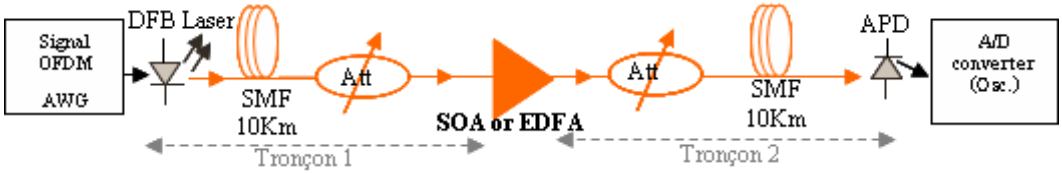
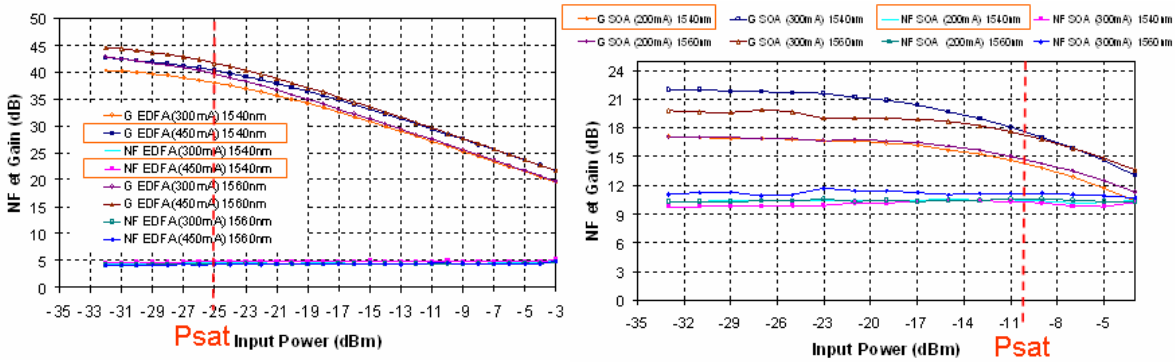


Figure 148 : Schéma d'expérimentation de l'amplification d'une transmission OFDM

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

Caractéristiques des amplificateurs SOA et EDFA

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



(a) (b)

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

Nous avons optimisé les performances de l'EDFA pour un courant de pompe de 450mA. Sa bande spectrale optique est large de 35nm, centrée à 1548nm. Pour la longueur d'onde qui nous intéresse, i.e. 1540nm, la puissance de saturation en entrée est de -25dBm, son NF de 4dB et son gain est de 40dB à une puissance d'entrée de -30dBm.
Nous avons optimisé les performances du SOA à un courant de polarisation de 200mA. Il a une bande spectrale optique large de 50nm, centrée à 1560nm. D'après la Figure 149, à 1540nm, sa puissance de saturation en entrée est de -10dBm, son facteur de bruit de 10dB associé à un gain de 17dB pour une puissance d'entrée de -30dBm.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ensuite on remarquera que contrairement à l'EDFA qui atteint un débit maximum pour (environ) la même puissance reçue à l'APD, avec un SOA, le débit maximum est atteint pour une puissance reçue croissante avec la puissance injectée dans le SOA. Il y a donc une pénalité due à l'insertion du SOA, que l'on pourrait associer au fait que le SOA apporte un bruit important qui vient dégrader le rapport signal à bruit du signal OFDM optique et donc le débit possible.
Ensuite, quand les amplificateurs sont en régime non saturé (PinEDFAsat < -25dBm ; PinSOAsat < -10dBm), on n'observe aucune pénalité sur la puissance reçue mais une perte du débit maximum, quel que soit l'amplificateur.

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

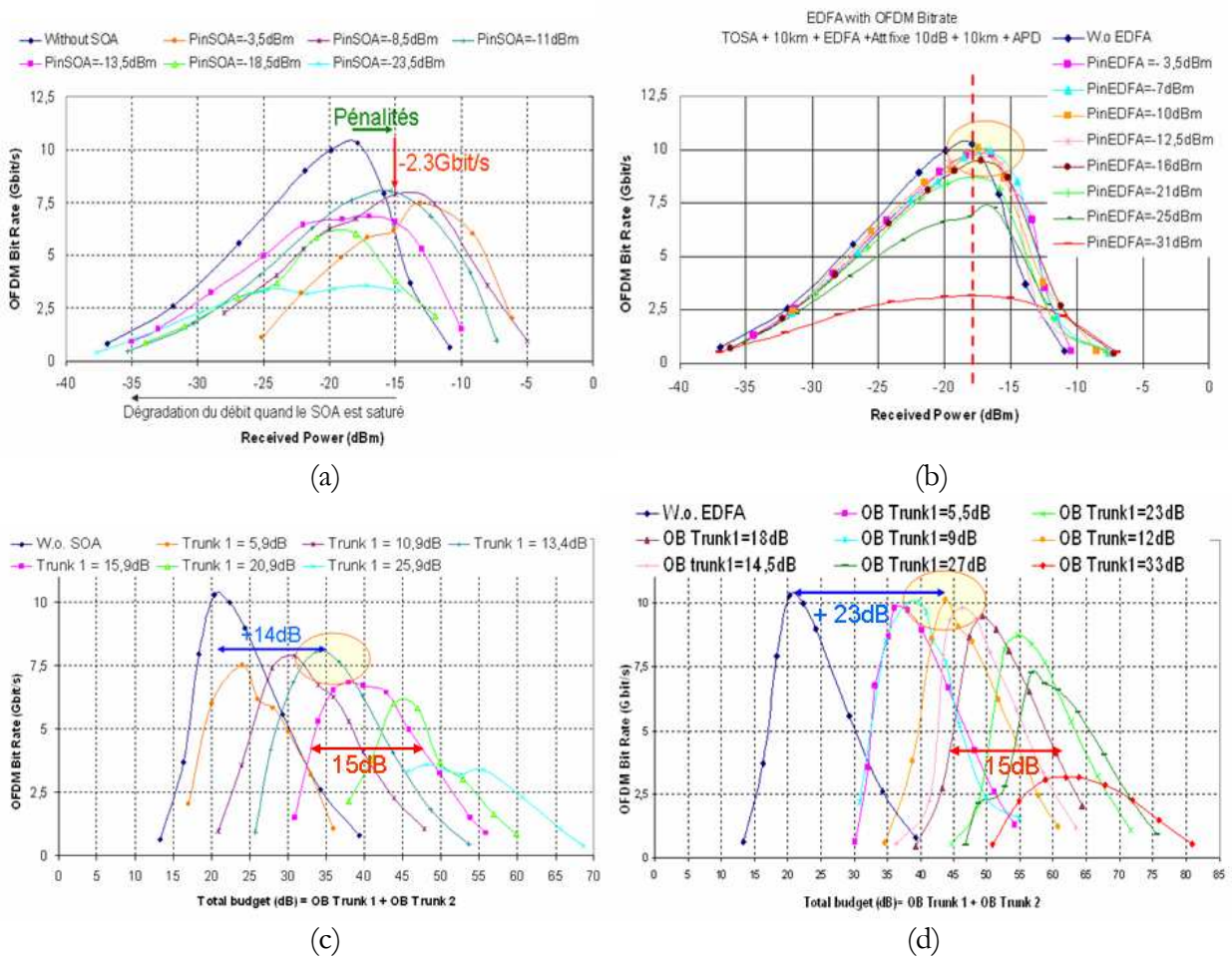


Figure 150 : Débits OFDM atteints à un BER de 10^{-4}
- en fonction de la puissance reçue à l'APD avec un SOA (a) et un EDFA (b)
- en fonction du budget optique total avec un SOA (c) et un EDFA (d)

N.B 1 : Les puissances reçues à l'APD sont mesurées sur le pic laser à l'OSA et ne prennent donc pas en compte la part de puissance d'ASE que la photodiode reçoit sur toute sa bande de réception.
N.B 2 : Nous avons inséré un atténuateur fixe de 10dB pour protéger la photodiode d'un éblouissement fatal qui pourrait survenir avec le fort gain de l'EDFA. Cet atténuateur est pris en compte dans le calcul du budget optique.

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

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

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

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

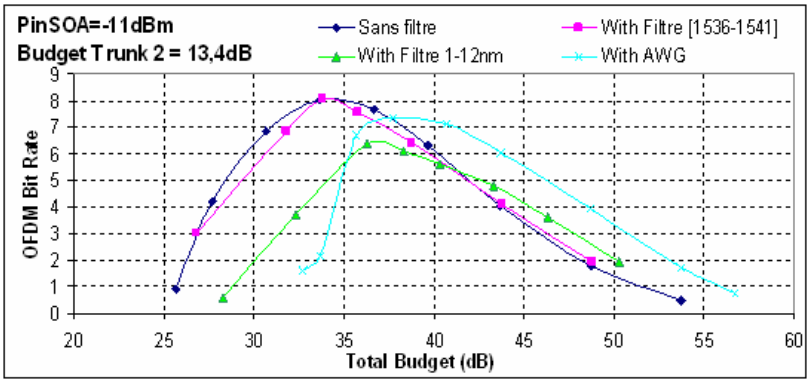


Figure 151 : Débit ODFM en fonction du budget optique total à un BER=10^{-4}, selon plusieurs types de filtre : 5nm, Gaussien ou AWG.

On remarque sur cette courbe que l'insertion des filtres n'apporte aucune amélioration du débit. Au contraire, un filtre trop fin réduit le débit maximum obtenu sans filtre. Le débit maximum est pourtant toujours atteint pour une même puissance reçue à la photodiode, donc pas pour le même budget optique, à la différence que les pertes de chaque filtre sont intégrées dans le calcul du budget total affiché sur ces courbes.
Le filtre le plus large (5nm) ne pénalise pas le débit de la transmission mais n'améliore pas non plus le budget optique total. On ne peut donc pas relier le bruit d'ASE aux pénalités de débit et de budget signalées sur la transmission OFDM avec SOA.

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

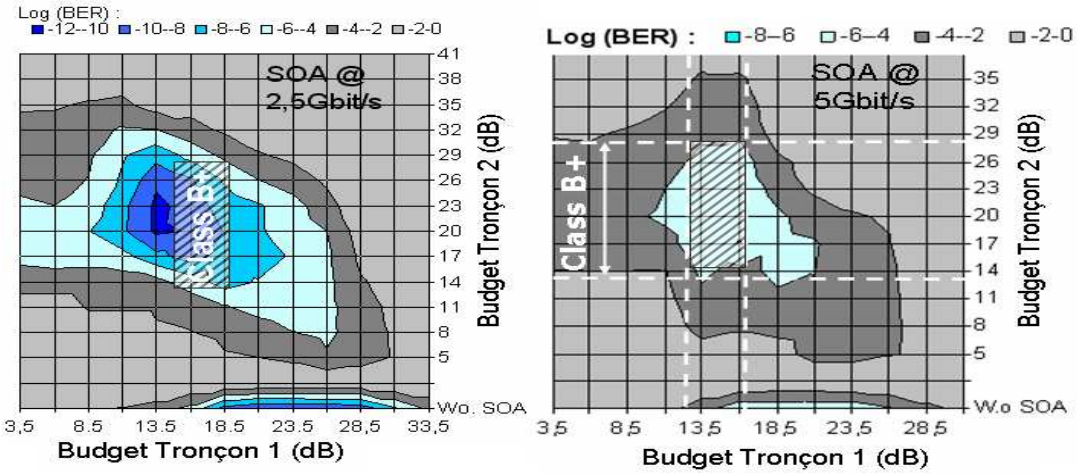
Pour l'instant, sans filtre, en termes de budget optique, on obtient donc au mieux un gain sur le budget optique total de 14dB à 8Gbit/s avec un SOA et de 23dB à 10Gbit/s avec l'EDFA. Par exemple, avec l'EDFA, cela permet de réaliser une transmission à 10Gbit/s sur 43dB de budget optique avec des composants de 2,5GHz de bande passante RF, donc des composants moins coûteux que ceux d'une transmission à 10Gbit/s en NRZ.
Cependant, pour calquer l'architecture GPON, on souhaiterait disposer d'une variation de 15dB de puissance entre un client proche et un client éloigné. Dans ce cas, du fait de la forme en cloche des courbes, le débit serait limité à 4Gbit/s pour assurer une bonne transmission avec ou sans amplificateur.
Finalement, on a remarqué au paragraphe précédent que l'influence de la dispersion chromatique est importante. On se doit donc de traiter ce point plus en détail.

2.3.3.3. Evaluation du budget possible à débit fixe

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

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

Avec un SOA



(a) (b)

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

La figure précédente présente les résultats obtenus avec un SOA à 2.5Gbit/s et 5Gbit/s. On définit la zone de fonctionnement pour un BER < 1.10^{-4} correspondant aux zones claires des cartographies.
Quel que soit le débit, on remarquera tout d'abord qu'un budget de classe B+ n'est pas possible sur le tronçon 1, ce qui implique que ce tronçon 1 ne pourra pas être considéré comme une architecture d'accès mais que son budget peut être assimilé à du budget de déport. Dans cette configuration, le SOA ne peut alors amplifier que le sens descendant d'un PON OFDMA.
Par contre ces résultats montrent qu'il est possible d'obtenir un budget de classe B+ sur le tronçon 2 : à 2.5Gbit/s pour un budget tronçon 1 de 15.7dB à 18.7dB
à 5Gbit/s pour un budget tronçon 1 de 12dB à 16dB.

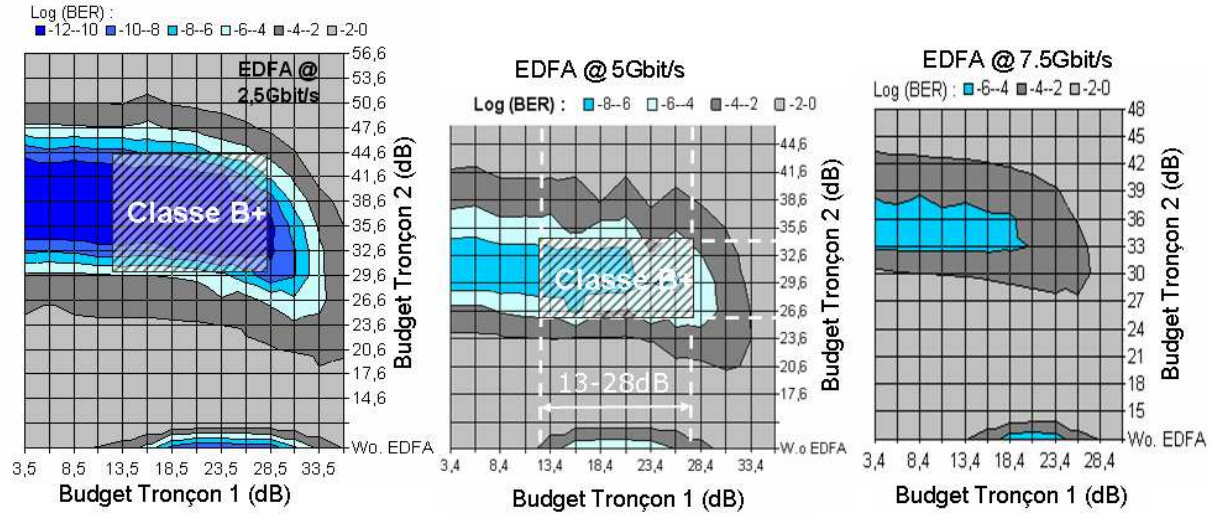
Dans cette configuration, le SOA ne peut amplifier uniquement que le sens descendant d'un PON OFDMA.

Avec un EDFA

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

On remarquera tout d'abord que comme pour le SOA, la transmission à 7.5Gbit/s n'est pas compatible avec une classe B+. L'EDFA apporte un fort gain sur le budget du tronçon 1, mais ne suffit pas à atteindre les 28dB nécessaires à cette compatibilité.
A l'inverse du SOA, cette fois avec l'EDFA, le budget optique du tronçon 2 n'est pas compatible avec la classe B+. Par contre, sur le tronçon 1, on peut envisager une architecture d'accès de classe B+ pour un déport sur le tronçon 2 de 30 à 44dB à 2,5Gbit.s et de 26 à 34dB à 5Gbit/s.

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



(a) (b) (c)

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

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

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

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

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

En variant la puissance d'entrée dans le SOA ou l'EDFA ainsi que la puissance reçue à la photodiode, nous avons mesuré les débits maximum possibles ainsi que le budget optique total sans fibre. Comme le montrent les Figure 154 (a) et (b), en amplifiant respectivement avec un SOA et un EDFA, pour un BER fixé à $1{,}2.10^{-4}$, nous avons obtenu des courbes caractéristiques du comportement des amplificateurs.

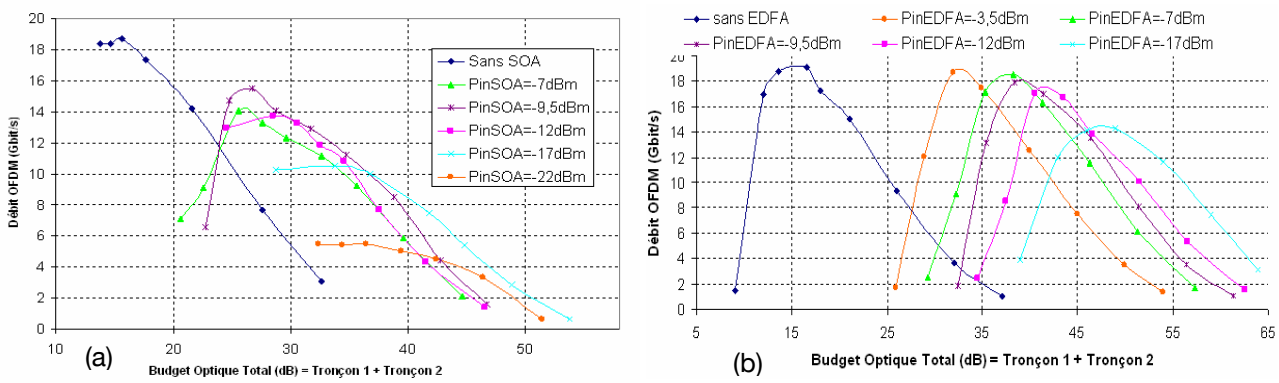


Figure 154 : Evaluation en débit et budget optique pour un BER = 1,2.10^{-4} avec un SOA (a) et un EDFA (b)

En amplifiant avec un SOA (Figure 154 (a)), nous observons une dégradation minimum du débit maximum à 16Gbit/s pour un budget optique de 27dB. De plus, le débit maximum décroît quand le budget optique croît (la puissance en entrée dans l'amplificateur décroît). Le débit décroît également à faible budget optique à cause de la saturation de la photodiode et de l'amplificateur.
Comme le montre la Figure 154 (b), l'EDFA grâce à un meilleur gain et facteur de bruit, présente de meilleurs résultats : un débit maximum de 19Gbit/s est obtenu pour un budget total de 37dB. Nous avons donc un comportement similaire des deux amplificateurs quel que soit le débit de la transmission OFDM.

2.3.4.2. Evaluation du budget possible à débits fixes

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

2.3.4.3. Tolérance à la dispersion chromatique

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

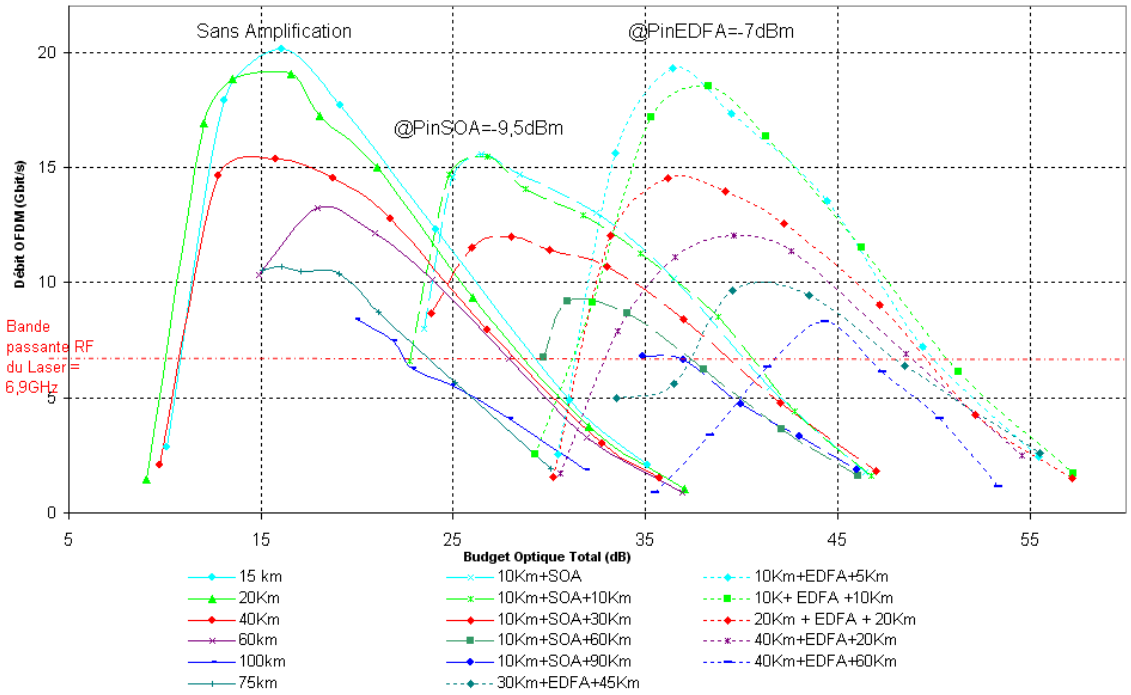


Figure 155 : Evaluation des effets de la dispersion chromatique sur le débit OFDM et le budget optique total sans amplification, avec un SOA et un EDFA.

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

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

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

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

Tableau 28 : Synthèse des résultats obtenus avec amplification

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

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

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

3. Convergence fixe-mobile

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

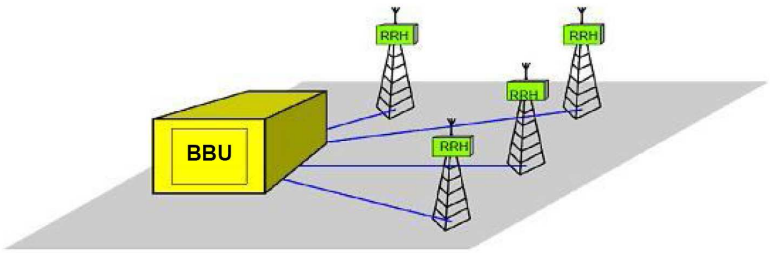
Afin de faciliter le déploiement des systèmes de nouvelle génération intégrés dans le NGPON, nous avons étudié la possibilité de convergence d'une solution existante et de la génération NGPON1, à savoir la coexistence d'un GPON et 10GPON sur une même infrastructure fibre, étendue à l'aide d'un seul SOA large bande placé en ligne (cf section 1.3, page 166).
Enfin, nous proposons également d'évaluer la possibilité de convergence d'architectures fixes et mobiles dont la portée est étendue à l'aide d'amplification optique ou régénération optoélectronique.

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

La RoF (pour Radio-over-Fiber) est une technologie qui permet de transporter des signaux radio sur un lien en fibre optique. Par rapport aux câbles cuivres traditionnels et aux transmissions RF, elle offre des avantages tels qu'une large bande de fréquence et une faible atténuation linéique, permettant de propager des signaux très haut-débits sur des très longues distances. La Radio sur Fibre est un choix évident pour les futures communications mobiles.
Les stations de base distribuées reposent sur le principe du déport des signaux radios mobiles sur une fibre optique. Cependant, l'insertion d'une liaison RoF dans un système de répartition de signaux radiofréquences doit nécessairement respecter les critères de qualité de transmission imposés par les normes des technologies utilisées (GSM, UMTS…) qui ont été établis à priori pour des transports uniquement RF (Radio Frequency).

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

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



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

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

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

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

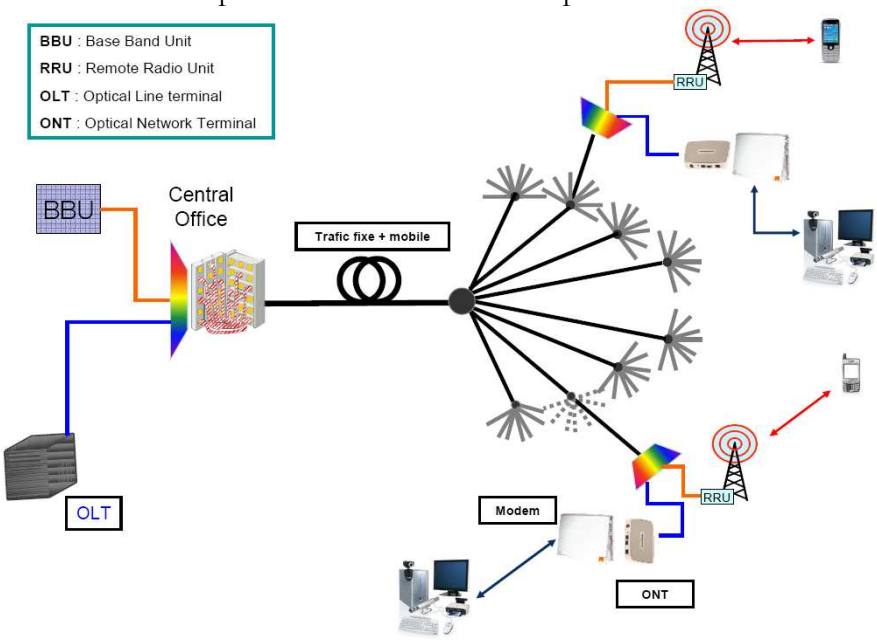


Figure 157: Architecture de convergence des réseaux d'accès fixe et mobile

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

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

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

3.1. Extension de portée de liaisons Radio sur Fibre analogique

L'extension du budget optique peut être nécessaire pour la RoF analogique compte-tenu du plus faible budget optique qu'elle permet. Du fait de la complexité de mise en œuvre d'un système radio sur fibre analogique, cette étude fait notamment partie des travaux de doctorat menés par Florian Frank. Il a ainsi reporté la possibilité de transporter, de manière transparente et simultanée, trois porteuses radio UMTS multiplexées en fréquence (FDD : Frequency Division Multiplexing) sur une architecture PON étendue à l'aide d'un SOA qui a permis d'obtenir un budget optique total s'élevant à 47dB [102].
Cependant, il a également mis en évidence la difficulté de conserver un ACLR (Adjacent and Alternate Channel Leakage Ratio) conforme au standard du 3GPP [103], facteur qui permet de traduire le rapport de fuite depuis le canal de référence vers les canaux adjacents. Le budget optique total d'une transmission RoF analogique (préamplificateur EDFA+PIN au module de réception) est ainsi pénalisé de 2,5dB en comparant l'implémentation d'une seule porteuse ou le cas du transport de plusieurs porteuses multiplexées. De plus, l'insertion de 20km de fibre monomode dégrade de 3,5dB le budget optique de la transmission.
Enfin, en prenant en compte simultanément l'Adjacent CLR et l'Alternate CLR (mesurés respectivement à +/-5MHz et à +/- 10MHz de la fréquence centrale de la porteuse), le budget optique se trouve à nouveau réduit de 3dB. Ces pénalités liées à l'ACLR ont tout de même pu être compensées grâce à l'insertion d'une fibre à compensation de dispersion chromatique (DCF) et d'amplification optique supplémentaire.
Il est tout de même possible d'obtenir un budget optique de 30,5dB sur une transmission RoF analogique respectant les spécifications du standard UMTS [104]. Au module d'émission, il est alors nécessaire d'insérer un EDFA positionné en booster en sortie de la DCF. En réception, le signal reçu par une photodiode PIN est également pré-amplifier par un EDFA.
On remarquera donc la difficulté et la complexité mais aussi la possibilité de la mise en œuvre de systèmes basés sur la RoF analogique pouvant s'intégrer sur une architecture de type PON.

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

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

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

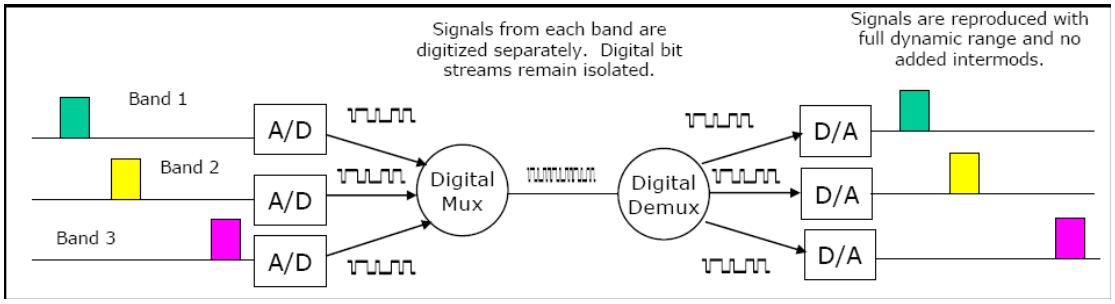


Figure 158 : Schéma de fonctionnement de la RoF numérique [7].

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

L'architecture précédente a été testée avec pour équipement d'accès FTTx, un GPON Huawei présenté au chapitre 1, et un système d'accès mobile dénommé FlexWave qui est proposé par le constructeur ADC et offre un débit de 3.072 Gb/s [105]. La mutualisation de la fibre est basée sur l'insertion d'un multiplexage en longueur d'onde afin d'assigner une porteuse optique différente à chaque technologie. Le GPON a ainsi conservé ses mêmes longueurs d'onde standardisées (1490nm descendante et 1310nm montante), et pour le système Digital RoF, nous avons choisi la bande CATV (1550nm à 1560nm) qui est pour l'instant disponible en France pour acheminer le trafic mobile. Dans l'expérience réalisée, seul un RRU est contrôlé par le BBU, et nécessite une paire de longueur d'onde.
Le critère de qualité d'une transmission numérique est l'EVM (Error Vector Magnitude) qui représente les distorsions d'amplitude et de phase sur le diagramme de constellation des états caractéristiques d'une modulation numérique. En UMTS, la norme impose un EVM inferieur à 17,5% [106-107]. Dans le cas de la RoF numérique, l'atténuation optique comme la longueur de fibre n'ont aucun effet sur l'EVM tant que la valeur d'atténuation maximale correspondant à la sensibilité des récepteurs n'est pas atteinte.
La transmission GPON est elle à nouveau qualifiée par son taux d'erreur binaire (BER). Dans ces conditions, nous avons relevé une performance de 30dB de budget optique permettant d'avoir une transmission bidirectionnelle sans erreur des trafics fixes et mobiles. Cette expérience a permis de confirmer la possibilité de mutualiser le trafic mobile et fixe sans dégrader la qualité des deux systèmes initiaux.

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

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

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

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

Tableau 29 : Caractéristiques du SOA (InPhenix)

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

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

La flexibilité amenée par les SFP intégrés dans les dispositifs de régénération 2R permet à ces technologies d'être utilisables dans la bande CATV et à moindre coût.
En introduisant un dispositif de régénération optoélectronique de ce type sur la liaison, on a pu augmenter le budget optique pour atteindre 60dB.

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

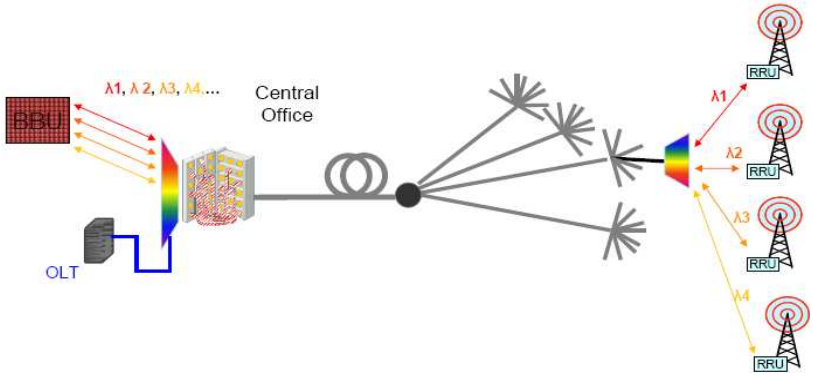


Figure 159 : Utilisation de plusieurs longueurs d'onde pour contrôler plusieurs RRU

Dans le cas de plusieurs longueurs d'onde et d'un déploiement purement UMTS, un multiplexeur est nécessaire à l'émission. Ce multiplexeur doit être capable de supporter en théorie 16 longueurs d'onde (8 à l'émission et 8 à la réception), dans la bande 1550-1560 nm. Le premier problème qui se pose est la génération de 16 longueurs dans la bande 1550-1560 nm ce qui est non-conforme à la normalisation des canaux DWDM.
Dans le cas d'une configuration point-à-multipoints, on peut contrôler plusieurs RRU avec un seul BBU via différentes longueurs d'ondes, des solutions d'extension du budget optique comme

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

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

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

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

Résumé du Chapitre 3

Ce chapitre a permis de décrire nos études menées sur l'extension de portée des systèmes PON de nouvelle génération : NGPON.
Bien que cet aspect ne figure pas dans les standards associés au NGPON, nous avons particulièrement étudié des solutions d'extension de budget optique à base d'amplification optique.

Extension de portée du NGPON 1

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

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

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

10GPON. La transmission descendante du GPON est fortement pénalisée et l'architecture convergente GPON-10GPON n'est donc plus compatible en accès avec aucune des classes citées précédemment. En termes de performances de budget optique, nous avons tout de même pu relever sur cette architecture, un budget total de 40dB, commun au fonctionnement du GPON et au 10GPON, et réparti en 20dB de budget déport et 20dB de budget accès. Nous pensons pouvoir améliorer ces résultats à l'aide d'un SOA offrant de meilleures performances en termes de NF et gain et en déterminant précisément la cause des pénalités liés à l'amplification simultanées des deux systèmes.

Extension de portée du NGPON 2

Le NGPON-2 se concentre sur une évolution long terme du réseau d'accès optique et a été défini au chapitre 1. Parmi les technologies citées, nous nous sommes particulièrement intéressés aux systèmes WDM, WDM-TDM, OFDM pour terminer par des études de convergence fixe mobile. Aucune de ces technologies n'a fait l'objet de standardisation pour l'instant mais plusieurs publications scientifiques montrent un intérêt certain pour une évolution vers ce type de systèmes.

Un PON WDM présente l'avantage d'assigner une longueur d'onde par client en mutualisant l'infrastructure fibre à l'aide de multiplexeurs. Cependant, son développement est freiné car cette technologie est l'une des plus couteuses. L'extension de portée d'un système PON WDM a été tout de même été traitée en insérant un SOA amplifiant tout d'abord deux canaux CWDM pour une transmission bidirectionnelle. Cela a permis d'introduire un comportement non linéaire d'un SOA amplifiant deux longueurs d'ondes espacées de 20nm. Nous avons en effet observé des pénalités liées à l'amplification simultanée de ces deux canaux. L'implémentation d'un SOA sur architecture WDM ne serait donc pas envisageable si on y considère des canaux DWDM, espacés de 0,8nm, comme c'est le cas pour les projets pilotes de PON WDM.

Un multiplexage en longueur d'onde peut également être mis en œuvre en association avec un multiplexage temporel. On parle alors d'un PON hybride WDM-TDM. L'insertion d'amplification optique y est considérée de manière passive par l'intermédiaire d'un amplificateur placé en ligne mais à pompage déporté : ROPA, ou par l'intermédiaire d'amplificateurs réflectifs RSOA faisant office de sources achromatiques chez le client. Cette dernière technologie a été implémentée et testée, décrivant ainsi l'architecture d'un PON WDM-TDM. Ces tests ont permis de mettre en évidence des effets de rétrodiffusion de Rayleigh qui ont menés à quelques modifications de l'architecture initiale. Nous avons tout de même démontré que l'on pouvait réaliser une transmission sans erreur, sur une distance de 40km et pour 256 ONU.
Depuis cette étude réalisée en 2007, de nombreuses publications ont fait preuve de meilleures performances et nous pensons que ce type de technologie a un potentiel certain pour faire partie de nos futures générations de réseau d'accès. Par ailleurs, le projet européen SARDANA qui intègre en partie ce type d'étude devrait mener à un essai terrain d'ici la fin d'année 2010.
Ce type d'architecture est d'ailleurs également représenté en utilisant cette fois des formats de modulation avancés du type OFDM.

Le multiplexage en fréquence FDM fait également partie des enjeux acteurs du NGPON 2. Déjà couramment utilisée pour les systèmes de communication à base de radio fréquences, cette technique a pour avantage de pouvoir utiliser des composants de la première génération de réseau d'accès optique, et d'atteindre des débits supérieur au 10Gbit/s, grâce aux techniques de modulation de phase permettant de réaliser un multiplexage fréquentiel. L'AMO-OFDM a été développé en particulier afin d'optimiser les performances d'une transmission OFDM, en fonction de la réponse fréquentielle des composants présents sur ce lien.

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

Convergence GPON-NGPON

Enfin le NGPON2 intègrera également un thématique liée à la convergence des topologies (point à point, point à multipoint, WDM, TDM) et des technologies (réseaux d'accès fixe DSL ou FTTx ou encore mobile). Nous avions déjà présenté au chapitre 2 une solution développée par Huawei sous le nom d'OSN1800, permettant de mutualiser les trafics DSL, Gigabit Ethernet, et GPON et qui permettra de réaliser des architectures convergentes des technologies de première génération. Néanmoins, cette convergence devra également concerner les futures générations de réseaux d'accès NGPON 1 et 2.

L'étude réalisée sur la coexistence des systèmes GPON-10GPON entre dans ce cadre et permettra de faciliter la migration du GPON vers le NGPON1.

Nous avons également évalué la possibilité de mutualiser l'infrastructure fibre pour un trafic GPON et mobile. En effet, afin de bénéficier d'atténuation linéique plus faible qu'une transmission radiofréquence en espace libre, le trafic mobile peut également être transporté sur un support fibre grâce aux techniques de Radio sur Fibre (RoF). Nous avons également différencié la radio sur fibre numérique et la radio sur fibre analogique moins couteuse mais plus complexe en ingénierie de déploiement que la première technique. Enfin, dans le cadre de nos études d'extension de portée du réseau d'accès, nous avons évalué la possibilité d'augmenter le budget optique d'une transmission RoF analogique ou numérique sur PON.
Une transmission RoF analogique, conforme à toutes les spécifications de la norme 3GPP, est possible pour un budget optique de 30dB, obtenu au prix de l'insertion d'une fibre à compensation de dispersion chromatique et d'un EDFA en booster placés à la station de base RoF et un second EDFA pré-amplifiant la réception d'une photodiode PIN du coté de l'antenne RoF. On conserve alors une architecture passive compatible avec une technologie GPON ce qui permet d'envisager une mutualisation des trafics fixes et mobiles du type RoF analogique.
En considérant cette fois une transmission RoF numérique, nous avons montré la possibilité d'étendre le budget optique d'un tel système en y implémentant un SOA ou un répéteur OEO 2R. On préféra alors une solution à base d'amplification optique qui permettrait d'amplifier la transmission RoF et GPON simultanément si le plan d'allocation en longueurs d'ondes de la RoF numérique le permet. Dans ce cas, on peut envisager une architecture convergente GPON-RoF numérique, si les fonctions de numérisation associées à la RoF ne représentent pas un coût majeur de l'infrastructure comme c'est le cas actuellement.

Conclusion générale

Ces travaux de recherche ont eu pour objectif d'évaluer l'extension de portée du réseau d'accès optique.
Nous avons présenté au Chapitre 1 le réseau d'accès optique et son évolution en dressant un panorama du marché du réseau d'accès fibre et des technologies déployées. Choisie par Orange pour son déploiement de la fibre jusqu'à la maison, la technologie GPON a été particulièrement développée. Elle propose un réseau d'accès optique asymétrique 2,5Gbit/s-1,25Gbit/s basé sur un multiplexage temporel. Ainsi, une bande passante de 100Mbit/s est offerte à un nombre maximum de 64 abonnés pour une portée de 20km. Cette technologie est déployée en France depuis 2006 et connaît un déploiement grandissant.
Sur une vision plus long terme, l'arrivée de services innovants et de plus en plus consommateurs en bande passante va générer un besoin de migration vers des nouvelles générations de réseau d'accès optique. Celles-ci sont définies sous le terme de NGPON que l'on peut diviser en deux étapes :

- La première, NGPON1, concerne la montée en débit jusqu'à 10Gbit/s en favorisant une mutualisation des équipements de première génération déjà déployés. Dans ce cadre, le 10GPON et 10GEPON, symétriques ou asymétriques, ont été standardisés par les organismes de normalisation ITU-T et IEEE en 2009 et 2010 (à l'instant en finalisation).
- La seconde, NGPON2, concerne les réseaux pouvant succéder au NGPON1 ou directement au GPON. Des débits supérieurs à 10Gbit/s y sont préconisés mais aucune contrainte sur l'architecture du réseau n'est fixée pour l'instant. Actuellement aux prémices du processus de normalisation, plusieurs technologies sont étudiées dans ce cadre : PON WDM, WDM-TDM, OFDMA.

Ces étapes et leurs technologies ont été détaillées au Chapitre 1. En marge de la planification de normalisation du NGPON, on retrouve également des notions d'extension de portée des réseaux PON. Cela se traduit par la nécessité de budget optique supplémentaire dans le but d'optimiser l'architecture déployée selon la démographie de la zone à couvrir par le PON. S'exprime alors une augmentation du taux de remplissage et du taux de partage des équipements déployés au central, mais aussi un besoin de concentration des centraux optiques et de flexibilité sur l'infrastructure. Ces intérêts sont reconnus par plusieurs opérateurs, mais seul l'ITU-T a pris en compte l'augmentation du budget optique du GPON à travers le standard G984.6, finalisé en 2008. Celui-ci préconise l'utilisation d'Extender Box à base d'amplification optique ou de régénération Optique-Electrique-Optique.

En utilisant ces techniques, le Chapitre 2 a présenté les travaux menés sur l'extension de portée de systèmes GPON. Différentes solutions d'Extender Box GPON ont été exposées et testées selon des critères de qualité de taux d'erreur binaire ou taux de perte de paquet.

Parmi les solutions à base d'amplification optique, l'amplificateur optique à semi-conducteur SOA s'est révélé être un bon candidat. Il permet d'étendre le budget optique du GPON jusqu'à 44dB et présente des avantages en termes de cout, transparence en débit, et compatibilité avec un multiplexage en longueur d'onde. Néanmoins, nous avons montré que le bruit d'émission spontanée amplifié qu'il génère peut être néfaste pour des configurations où plusieurs Extender Box sont cascadées sur une même infrastructure GPON.

Les études menées sur les solutions d'Extender Box à base d'OEO ont privilégié les technologies 3R qui permettent de doubler le budget optique d'un GPON, tout en conservant des règles d'ingénieries simples. Dérivé de ce type d'Extender Box, une fonction de duplication de ports

PON a été mise en œuvre sous le nom de coupleur virtuel ou Extender Box 1 vers 4 dans le but d'augmenter, à moindre coût, le taux de remplissage des cartes PON déployées. De plus, une étude sur la réduction des dépenses énergétiques des centraux GPON a démontré l'intérêt de l'installation de tels équipements sur les réseaux.

Concernant la centralisation des OLT GPON à l'aide d'Extender Box (1 vers 1), une première étude technico-économique a montré une réserve majeure liée avec la mise en évidence d'un manque de fibres inter-centraux. Un besoin de mutualisation des fibres entre OLT et Extender Box est alors nécessaire. Des architectures à base de multiplexage WDM sur ces liens ont alors été imaginées en exploitant l'interchangeabilité de modules SFP qui facilitent la colorisation des Extender Box du coté faisant face à l'OLT. Cette notion d'Extender Box WDM n'a pas encore été expérimentée et devra faire l'objet de tests afin de valider cette solution.
Toujours dans un but de mutualiser l'infrastructure fibre, certains équipementiers de réseaux de télécommunications ont également proposé des solutions à base d'agrégation de flux en TDM ou WDM. Une première solution, présentée sous le nom d'OSN1800 a été testée et affiche des résultats similaires à ceux d'une Extender Box OEO.

Une majorité des solutions d'Extender Box présentées dans ce chapitre sont commercialisées aujourd'hui mais pour un marché pour l'instant inexistant. L'ouverture au FTTx de nouvelles zones moins denses devrait créer le besoin de ces technologies afin d'optimiser le déploiement d'un réseau d'accès optique pour tous. Néanmoins, cela pourra être freiné par l'arrivée des nouvelles générations de PON, soulevant des questions de compatibilité de ces solutions avec la montée en débit et les nouvelles architectures proposées à plus ou moins long terme.

Le Chapitre 3 a décrit les travaux d'extension de portée des systèmes NGPON. Dans le cadre du NGPON1, l'amplification optique à base de SOA et EDFA a permis l'augmentation du budget optique d'une architecture 10GPON. De plus, dans un optique de convergence des réseaux, un SOA large bande a été mis en place pour amplifier simultanément la transmission descendante d'un GPON et d'un 10GPON.
Dans le cadre du NGPON2, certaines technologies préconisées en normalisation ont fait l'objet d'études d'extension de portée. Des travaux d'amplification simultanée de canaux WDM à l'aide d'un seul SOA ont été introduits et nous avons mis en évidence certaines dégradations de la transmission. Par ailleurs, les tests d'une architecture WDM-TDM, à base d'ONU achromatiques fondés sur des RSOA, ont montré la possibilité de maximiser la bande passante offerte aux abonnés sur une infrastructure fibre, longue distance et mutualisée entre un grand nombre d'utilisateurs. Enfin, nous avons présenté les résultats d'évaluation de l'amplification optique de transmissions employant des techniques OFDM. En insérant un EDFA ou un SOA sur une transmission AMO-OFDM, nous avons montré la possibilité d'étendre le budget optique initial mais au détriment du débit OFDM transmis. L'ensemble de ces études nécessitera un travail d'approfondissement afin de finaliser les démarches d'expérimentation entamées lors de cette thèse.

Finalement, toutes ces études doivent être considérées comme une première approche de l'extension de portée de réseaux NGPON. En l'absence de spécifications techniques concernant l'extension de portée des nouvelles générations de réseau, il est impossible de privilégier une technologie d'amplification ni même d'en certifier le besoin.

Une majorité des travaux réalisés au cours de cette thèse a fait l'objet de plusieurs publications à des conférences nationales et internationales et à des articles de revue scientifique répertoriés sur la bibliographie à suivre. La majorité de ces études rentre dans le cadre de projets nationaux ou européens sur ces thèmes de recherche.

Bibliographie personnelle

Un document annexe comprenant l'ensemble de mes publications est fourni aux membres du Jury en complément de ce rapport de thèse.
Les publications faisant partie de ma bibliographie personnelle sont listées ici :

Publications en tant que premier auteur (par ordre chronologique)

F. Saliou, P. Chanclou, Z. Belfqih, Architecture hybride du réseau d'accès optique: WDM-TDM PON utilisant des RSOA en mode burst", JNOG 2007, communication orale Th1-1

F. Saliou, P. Chanclou, B. Landousies, N. Genay, F. Laurent, L. Guillo, Z. Belfqih, " GPON Extender Box: SOA, PDFA, OEO 2R repeater solutions", NOC2008, July 1-3, 2008

F. Saliou, P. Chanclou, F. Laurent, B. Landousies, N. Genay, Z. Belfqih, " Class B+ GPON extended to 44dB while maintaining 15dB optical budget difference", ECOC 2008, P.6.10, 21-25 September 2008, Brussels, Belgium.

F. Saliou, P. Chanclou, B. Landousies, N. Genay, F. Laurent, L. Guillo, Z. Belfqih, " Extension de budget optique de systèmes d'accès FTTH à l'aide de SOA", JNOG2008, A5.6, 20-22 Septembre 2008, Lannion, France

Fabienne Saliou, Philippe Chanclou, Bernard Landousies, Naveena Genay, Claude Le Bouëtté, "Extended Reach Access Network Based on Aggregation of the G-PON Traffic", OFC&NFOEC, NThC2, 22-26 March 2009, San Diego, California, USA

Fabienne Saliou, Philippe Chanclou, Noëlla Evanno, Naveena Genay, Laurent Guillo, Bernard Landousies and Fabien Laurent, " Virtual splitter for passive optical networks", NOC2009, oral, NOC/OC&I 2009, 10-12 June, 2009, Universidad de Valladolid, Spain

Fabienne Saliou, Philippe Chanclou, Benoît Charbonnier, Thanh Nga Duong, Naveena Genay, Ahmed Gharba, Jérome Le Masson, Chloé Milion, Meryem Ouzzif, "EXTENSION DE BUDGET D'UN RESEAU D'ACCES OPTIQUE HAUT DEBIT A L'AIDE DE SOA ET EDFA AMPLIFIANT DES SIGNAUX OFDM JUSQU'A 19GBIT/S", poster A10.5, JNOG09, 6-9 Juillet 2009 Lille, France

Fabienne Saliou, Philippe Chanclou, Fabien Laurent, Naveena Genay, Jose A Lazaro, Francesc Bonada, Josep Prat, "Reach extension strategies for PONs", Journal of Optical Communications and Networking (JOCN), Vol. 1, Iss. 4, pp. C51–C60 (1 Septembre 2009)

F. Saliou, P. Chanclou, B. Charbonnier, T. N. Duong, N. Genay, A. Gharba, C. Million, M. Ouzzif,"SOA or EDFA Amplifying 10Gbit/s OFDM Signals for Access Networks", ECOC2009, P6.21, 20-24 September 2009, Vienna, Austria.

F. Saliou, P. Chanclou, N. Genay, J. A. Lazaro, F. Bonada, A. Othmani, Y. Zhou ; "Single SOA to Extend Simultaneously the Optical Budget of Coexisting G-PON and 10G-PON", ECOC2010, Oral, 19 - 23 September 2010, Turin, Italy.

Publications en tant que co-auteur (par ordre chronologique)

Z. Belfqih, F. Saliou, P. Chanclou, T. Soret, N. Genay, " Bidirectional Amplifier for Standard PON Architecture in Burst Mode Configuration with Class B+ Attenuation Range", OWS1, OFC2007, 25-29 March 2007

N. Genay, T. Soret, P. Chanclou, B. Landousies, L. Guillo, F. Saliou," Evaluation of the budget extension of a GPON by EDFA amplification", ICTON 2007, Mo.P.20 1-5 July 2007.

N. Genay, P. Chanclou, F. Saliou, Q. Liu, T. Soret, L. Guillo, "Solutions for budget increase for the next generation optical access network", ICTON 2007, Tu.A4.7 1-5 July 2007(Invited)

Z. Belfqih, P. Chanclou, F. Saliou, "Hybrid WDM-TDM Passive Optical Network in burst mode configuration with RSOA", OFC2008, JThA96, 24-28 February 2008

Z. Belfqih, P. Chanclou, F. Saliou, N. Genay, B. Landousies, "Enhanced Optical Budget System Performance of an Burst Extended PON at 10.7Gbit/s over 60km of Fibre", ECOC 2008, Th.2.F.4, 21-25 September 2008, Brussels, Belgium.

P. Chanclou, Z. Belfqih, B. Charbonnier, T. Duong, F. Frank, N. Genay M. Huchard, P. Guignard, L. Guillo, B. Landousies, A. Pizzinat, H. Ramanitra, F. Saliou, S. Durel, P. Urvoasa, M. Ouzzif and J. Le Masson, "Access network evolution: optical fibre to the subscribers and impact on the metropolitan and home networks", C. R. Physique 9 (2008), Volume 9, Issues 9-10, November-December 2008, Pages 935-946.

Philippe Chanclou, J.- P. Lanquetin, S. Durel, F. Saliou, B. Landousies, N. Genay, Z. Belfqih, " Investigation into Optical Technologies for Access Evolution ", OFC&NFOEC, OWH1, 22-26 March 2009, San Diego, California, USA (invited)

F. Raharimanitra, P. Chanclou, T. N. Duong, J. Le Masson, B. Charbonnier, M. Ouzzif, N. Genay, A. Gharba, F. Saliou, R. Brenot, G. Devalicourt, "SOURCES TRANCHÉES SPECTRALEMENT ET MODULÉES EN FORMAT AMOOFDM POUR LE WDM ET TDM PON", poster A10.1, JNOG09, 6-9 Juillet 2009 Lille, France

A. Benfattoum, A. Pizzinat, F.Saliou, P. Chanclou, F. Frank, B. Charbonnier, "SOLUTION DE CONVERGENCE D'INFRASTRUCTURE OPTIQUE POUR LE RESEAU D'ACCES FIXE ET MOBILE", oral Je1.2, JNOG09, 6-9 Juillet 2009 Lille, France

F. Raharimanitra, P. Chanclou, T. N. Duong, J. Le Masson, B. Charbonnier, M. Ouzzif, N. Genay, A. Gharba, F. Saliou , R. Brenot , G. Devalicourt, "Spectrum Sliced Sources AMOOFDM Modulated for WDM&TDM PON", ECOC2009, W.6.5.3, 20-24 September 2009, Vienna, Austria.

L. Anet Neto, F. Saliou, P. Chanclou, N. Genay, L. Bramerie, E. Borgne, C. Aupetit-Berthelemot, "10 Gb/s Continuous Clock and Data Recovery for Burst Mode Transmissions with Externally Modulated Laser ", Access Networks and In-house Communications conference, ANIC2010, June 21-24, 2010, Karlsruhe, Germany

Annexes

TABLE DES ANNEXES

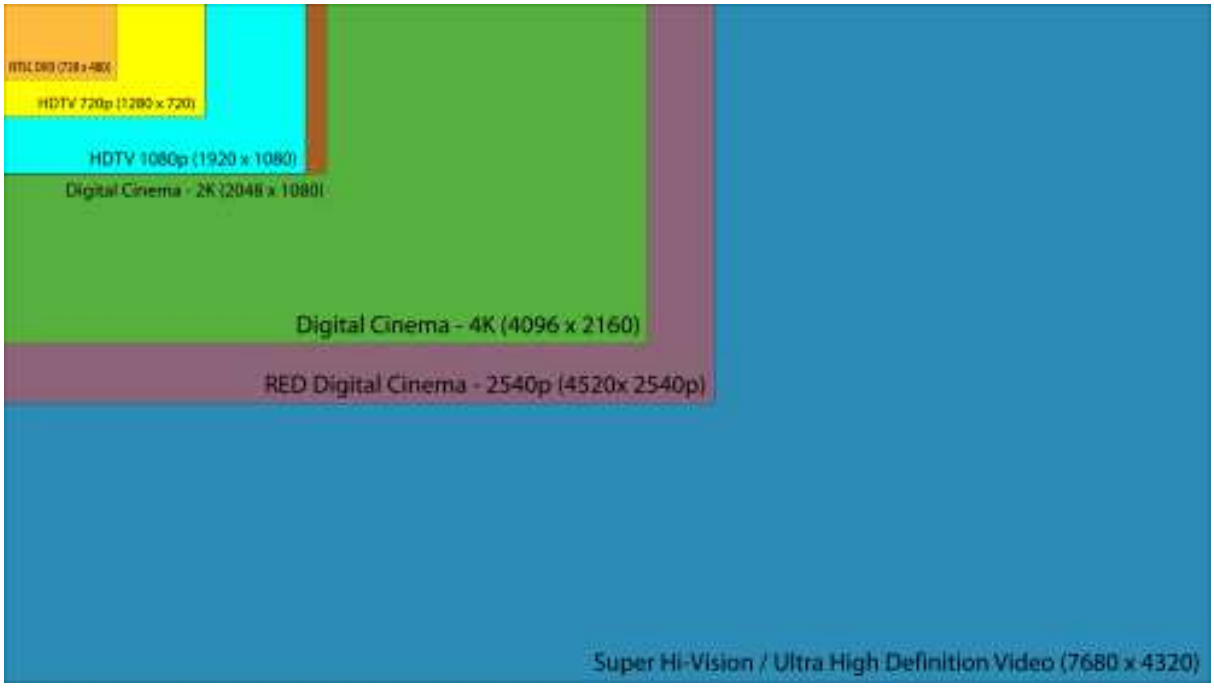
Annexe 1. Exemple de formats vidéo 206
Annexe 2. Technique d'un réseau à commutation de paquets optiques..... 208
Annexe 3. Tableaux des résultats obtenus avec l'amplification au central 209
Annexe 4. Tableaux des résultats de budget optique et courbes de BER obtenues avec l'amplification monodirectionnelle en ligne..... 210
Annexe 5. Tableaux des résultats obtenus avec l'amplification bidirectionnelle en ligne 212
Annexe 6. Caractéristiques en NF et Gain des SOA..... 215
Annexe 7. Test d'autres solutions d'EB 216
Annexe 8. Cartographie GPON-10GPON pour différentes puissances émises 219
Annexe 9. Caractérisation des RSOA utilisés 220
Annexe 10. Principe de modulation et démodulation OFDM..... 221

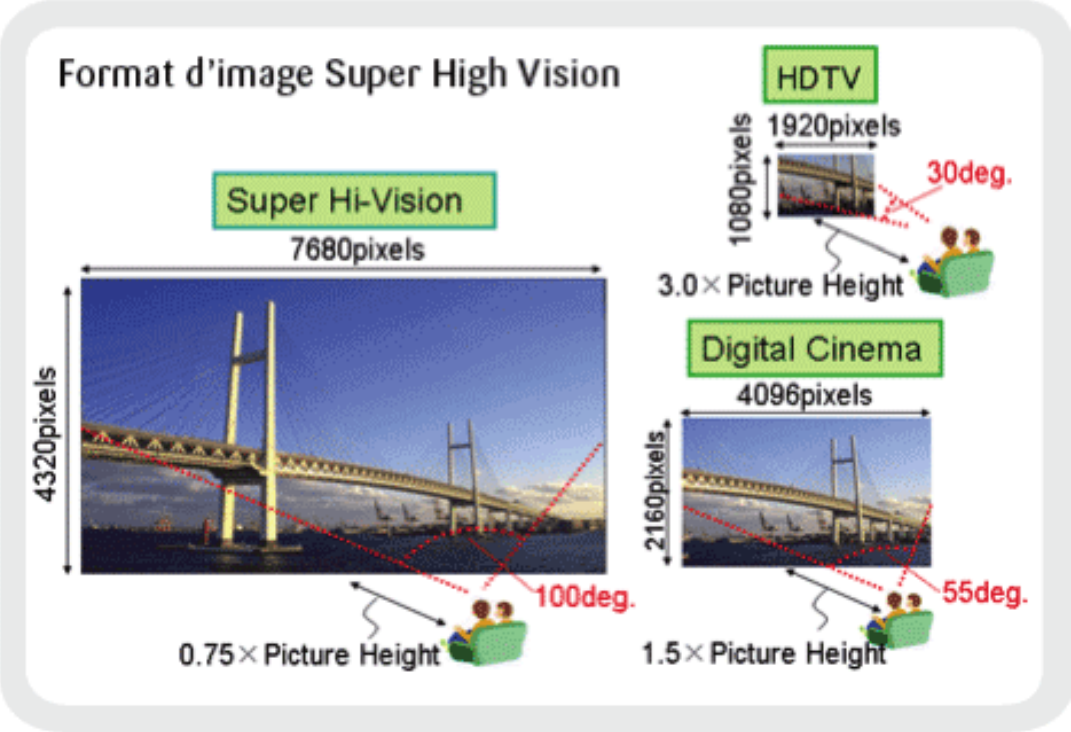
Annexe 1. Exemple de formats vidéo

Au-delà des standards actuels (HDTV 720p, HDTV 1080p…), des formats offrant plus de définitions sont en cours de spécification et d'expérimentation.
De nombreux travaux sont effectués sur les formats vidéo pour la restitution 3D. Par exemple, le consortium 3D@Home , créé en 2008, se propose, entre autres, d'accélérer la mise sur le marché de produits 3D au niveau mondial. Il se charge également de veiller à une expérience de visualisation de qualité, ceci en aidant à l'élaboration des standards pour toute l'industrie de la 3D (équipement, contenu, logiciel…).

D'autres formats pour la très haute définition sont :

- le 4k cinéma avec une résolution de 4096x2160 pixels, des débits de 6.4 à 9.5Gbit/s bruts réduits à 200-400 Mbit/s avec codec JPEG2000. Ce format est utilisé pour certains films numériques de cinéma. Des milliers de salles sont équipées en 4k à travers le monde.
- le 8k super hi-vision avec une résolution de 7680x4320 pixels, des débits de 24 Gbit/s bruts réduits à 160-600Mbit/s par compression. Le son est diffusé sur 22+2 canaux, compressé de 28 Mbit/s à 7-28Mbit/s. La diffusion est prévue pour 2020.



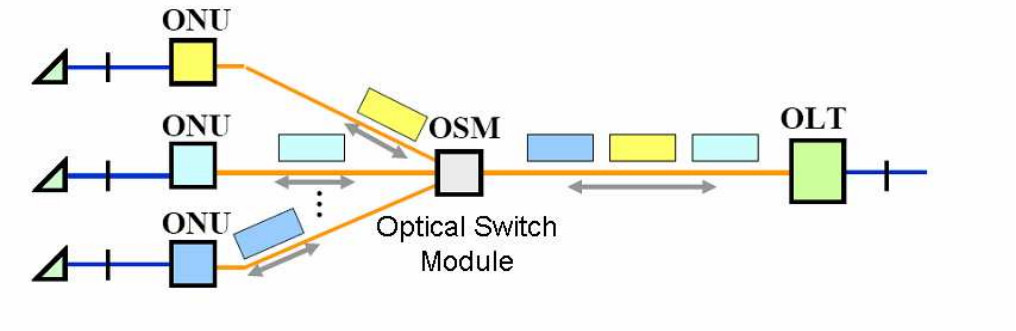


Comparaison de la résolution des différents formats vidéo numériques.

Annexe 2. Technique d'un réseau à commutation de paquets optiques

Une voie possible pour répartir les données entre utilisateurs à très haut débit est celle de la commutation optique. Cela revient à faire de l'optical burst switching dans le réseau d'accès avec un équipement qui en lisant seulement des en-têtes pourrait commuter les ports de sortie afin d'orienter les paquets optiques sans toucher à ceux-ci. Un multiplexage statistique peut alors être utilisé pour multiplexer les données. Ce mode de fonctionnement a le désavantage d'ajouter un équipement actif dans le réseau ce qui n'est pas souhaitable, mais a néanmoins un intérêt dans le cas d'un réseau d'accès plus étendu.

L'OSAN (Optical Switch Access Network) est un réseau d'accès multiple basé sur la commutation des paquets optiques. Un prototype d'OSAN est développé par l'Université de Technologie de Tokyo.



Comme le montre la figure précédente, il présente une topologie similaire à celui du PON, à l'exception des coupleurs passifs qui sont remplacés par des modules de commutation optique (OSM). Ces modules sont contrôlés électriquement et permettent de faire commuter les paquets dans le sens montant et descendant. Leur atout comparé au coupleur optique passif est d'avoir moins de pertes optiques, ce qui permet d'augmenter la portée ou le nombre de client raccordé au réseau comparé à un PON classique.

L'OLT est connecté à chaque ONU paquet par paquet, réalisant ainsi une liaison point à point virtuelle. Cela présente des avantages en termes de sécurité (pas d'encryptage), et l'impossibilité d'attaques d'utilisateurs malveillants. Son principal inconvénient est le caractère actif de l'OSM.

Annexe 3. Tableaux des résultats obtenus avec l'amplification au central

- Avec des SOAs

Résultat des mesures de BER et budget optique avec SOA		Ligne	Att entrée	Att en ligne (dB) sans filtrage	Filtré avec MUX	Filtré à 5nm
SOA centré à 1510nm Polarisé à 150mA	1570nm	13dB	-	10	17,2	
		28dB	-	sans attenuateur	2,2	
Montant 1,25Gb/s	1550nm	13dB	-	10,5	15,6	(170mA) 19,1
		28dB	-	-	1	(170mA) **4**
	1530nm	13dB	-	(135mA) 8,5	12,9	(170mA) 15,8
		28dB	-	-	-	(170mA) 1,5
SOA centré à 1550nm Polarisé à 250mA	1570nm	13dB	13dB	16,6		
		28dB	13dB	**2**		
	1550nm	13dB	13dB	14,9		
		28dB	13dB	0		
Descendant 2,5Gb/s	1530nm	13dB	13dB	13		
		28dB	13dB	-		

- Avec des EDFAS

EDFA		Ligne	Att entrée	Atténuation en ligne (dB) sans filtrage	Filtré avec MUX	Filtré à 5nm
EDFA 2 (Courant de pompe 150mA) Montant 1,25Gb/s	1570nm	13dB	-	5,6	18,9	
		28dB	-	-	4,3	
	1550nm	13dB	-	15,8	23,5	25,9
		28dB	-	1	9	10,6
	1530nm	13dB	-	18,2	22,2	23,1
		28dB	-	3,1	7,8	8,2
EDFA 1 (Courant de pompe 250mA) Descendant 2,5Gb/s	1570nm	13dB	13dB	26		
		28dB	13dB	11		
	1550nm	13dB	13dB	27,7		
		28dB	13dB	13,2		
	1530nm	13dB	13dB	26,7		
		28dB	13dB	12,8		

Annexe 4. Tableaux des résultats de budget optique et courbes de BER obtenues avec l'amplification monodirectionnelle en ligne

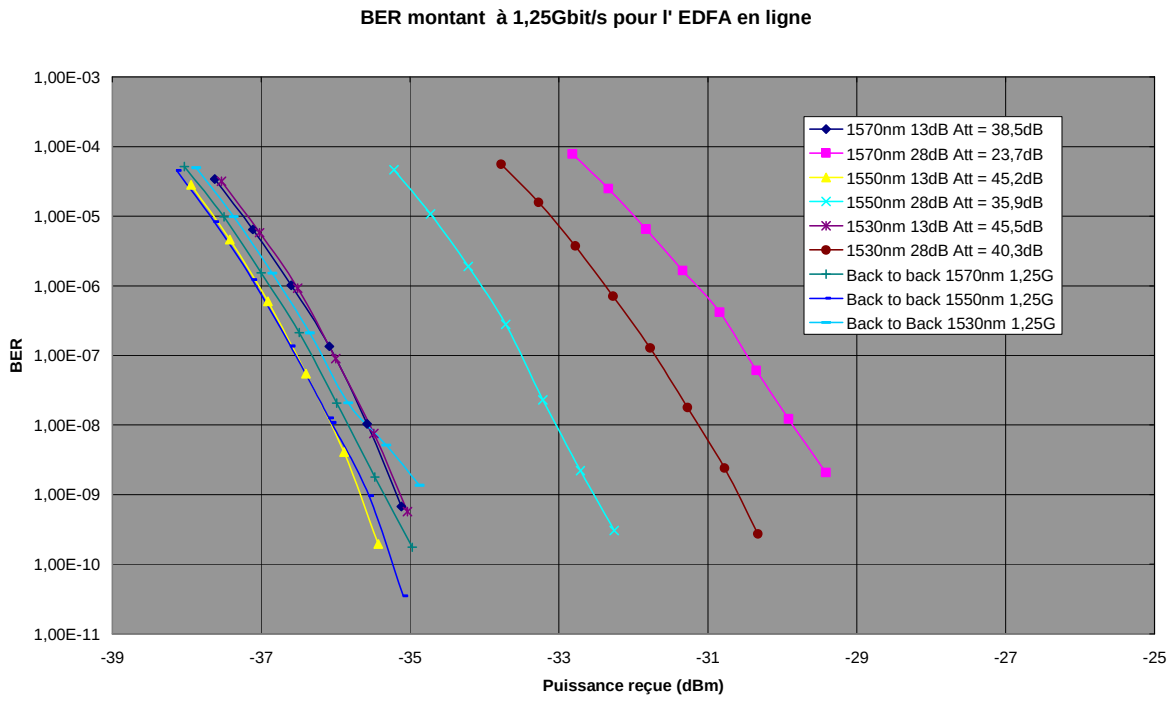
- Avec des SOA centrés à 1510nm ou 1550nm, polarisés à un courant de 250mA

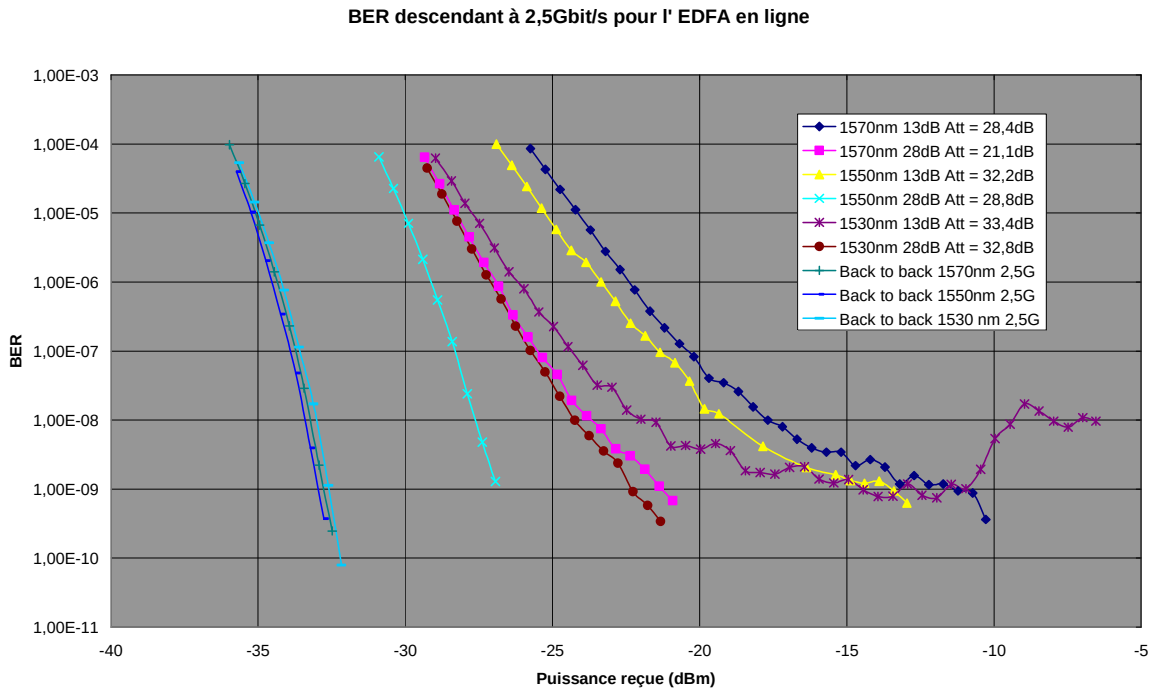
SOA monodirectionnel			Attenuation en ligne (dB)	
		Ligne	SOA 1510nm	SOA 1550nm
Montant 1,25Gb/s	1570nm	13dB	29,3	31,8
		28dB	16	[2,8 - 18]
	1550nm	13dB	31,6	31,3
		28dB	18	[5 - 16,9]
	1530nm	13dB	31,3	28,5
		28dB	[4 - 14]	[4 - 13,7]
Descendant 2,5Gb/s	1570nm	13dB	26,3	26,8
		28dB	12,7	14,8
	1550nm	13dB	27,7	25,8
		28dB	15,2	15,9
	1530nm	13dB	26,1	23,6
		28dB	14,5	12,8

- Avec des EDFAS

EDFA monodirectionnel		Ligne	Atténuation en ligne (dB)
EDFA 2 (250mA) Montant 1,25Gb/s	1570nm	13dB	38,5
		28dB	23,8
	1550nm	13dB	45,2
		28dB	35,9
	1530nm	13dB	45.5
		28dB	40.3
EDFA 1 (250mA) Descendant 2,5Gb/s	1570nm	13dB	28,4
		28dB	21,1
	1550nm	13dB	32,2
		28dB	28,8
	1530nm	13dB	33,4
		28dB	32,8

- Courbes de BER obtenues :





Annexe 5. Tableaux des résultats obtenus avec l'amplification bidirectionnelle en ligne

- Avec un SOA centré à 1510 nm

Couples de longueurs d'onde testés : 1570-1550nm ; 1550-1570nm ; 1550-1530nm ; 1530-1550nm.

SOA 1510nm I=250mA	**Configuration 1**		**Configuration 2**		**Configuration 3**		**Configuration 4**	
	Descendant	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**
	1570nm	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	15,5	17,8	1	3,4	1	17,8	15,5	3,4
Budget étendu (dB)	**24,8**	34,2	**16,3**	[9,2 - 21]	**13,5**	34,2	29,4	[9-**21**]
Gain = Budget étendu - marge	9,3	16,4	15,3	17,6	12,5	16,4	13,9	17,6

SOA 1510nm I=250mA	**Configuration 1**		**Configuration 2**		**Configuration 3**		**Configuration 4**	
	Descendant	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**
	1550nm	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	15,5	17,8	0,4	0,2	0,4	17,8	15,5	0,2
Budget étendu (dB)	**24,5**	33,3	18,6	[10 - 18]	**15,5**	33	29	[10 - 18]
Gain = Budget étendu - marge	9	15,5	18,2	17,8	15,1	15,2	13,5	20,8

SOA 1510nm I=250mA	**Configuration 1**		**Configuration 2**		**Configuration 3**		**Configuration 4**	
	Descendant	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**
	1550nm	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	14,5	14,5	0,1	0,1	0,1	0,1	14,5	14,5
Budget étendu (dB)	**25**	34,1	**17,2**	18,2	**15,1**	34,1	[2 - 28,7]	**18,2**
Gain = Budget étendu - marge	10,5	19,6	17,1	18,1	15	34	14,2	3,7

SOA 1510nm I=250mA	**Configuration 1**		**Configuration 2**		**Configuration 3**		**Configuration 4**	
	Descendant	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**
	1530nm	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	14,5	14,5	0,1	0,1	0,1	0,1	14,5	14,5
Budget étendu (dB)	[2 - **19,8**]	34,2	**18,1**	19,8	**12,8**	34,2	[2,5 - 26,8]	**19,8**
Gain = Budget étendu - marge	5,3	19,7	18	19,7	12,7	34,1	12,3	5,3

- Avec un SOA centré à 1550 nm

SOA 1550nm I=250mA	Configuration 1		Configuration 2		Configuration 3		Configuration 4	
	Descendant	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**
	1570nm	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	15,5	17,8	1	3,4	1	17,8	15,5	3,4
Budget étendu (dB)	**20,5**	[5-33]	**17,5**	[18,8 - 21,6]	**13,3**	[5-33]	28,3	[18,8 - **21,6**]
Gain = Budget étendu - marge	5	15,2	16,5	18,2	12,3	15,2	12,8	18,2

SOA 1550nm I=250mA	Configuration 1		Configuration 2		Configuration 3		Configuration 4	
	Descendant	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**
	1550nm	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	15,5	17,8	0,4	0,2	0,4	17,8	15,5	0,2
Budget étendu (dB)	**18**	32,3	**18**	[14,2 - 20,3]	**11,6**	32,3	[5 - 27,4]	[14,2 - **20,3**]
Gain = Budget étendu - marge	2,5	14,5	17,6	20,2	11,2	14,5	11,9	14

SOA 1550nm I=250mA	Configuration 1		Configuration 2		Configuration 3		Configuration 4	
	Descendant	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**
	1550nm	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	14,5	14,5	0,1	0,1	0,1	0,1	14,5	14,5
Budget étendu (dB)	**20**	33	**17,7**	[13,5 - 21,6]	**14,9**	33	[5,8 - 27]	[13,5 - **21,6**]
Gain = Budget étendu - marge	5,5	18,5	17,6	21,5	14,8	32,9	12,5	7,1

SOA 1550nm I=250mA	Configuration 1		Configuration 2		Configuration 3		Configuration 4	
	Descendant	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**
	1530nm	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**	**1530nm**	**1550nm**
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	14,5	14,5	0,1	0,1	0,1	0,1	14,5	14,5
Budget étendu (dB)	[4,7 - **23**]	31,6	18,5	**10E-07 @ 19,6**	**15,5**	32,3	[4,7 - 28,7]	**10E-07 @ 19,6**
Gain = Budget étendu - marge	8,5	17,1	18,4	19,5	15,4	32,2	14,2	5,1

- Avec un SOA linéaire

SOA Linéaire	Configuration 1		Configuration 2		Configuration 3		Configuration 4	
	Descendant	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**	**Descendant**	**Montant**
	1570nm	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**	**1570nm**	**1550nm**
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d' amplification (dB)	15,5	17,8	1	3,4	1	17,8	15,5	3,4
Budget étendu (dB)	**25,6**	31,3	**10,8**	15,9	**10,6**	31,3	25,6	15,9
Gain = Budget étendu - marge	10,1	15,2	9,8	18,2	9,6	15,2	10,1	18,2

SOA Linéaire	Configuration 1		Configuration 2		Configuration 3		Configuration 4	
	Descendant	Montant	Descendant	Montant	Descendant	Montant	Descendant	Montant
	1550nm	1570nm	1550nm	1570nm	1550nm	1570nm	1550nm	1570nm
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	15,5	17,8	0,4	0,2	0,4	17,8	15,5	0,2
Budget étendu (dB)	**27,6**	28,5	**13,5**	12,9	**13,3**	28,5	27,7	12,9
Gain = Budget étendu - marge	12,1	10,7	13,1	20,2	12,9	10,7	11,9	14

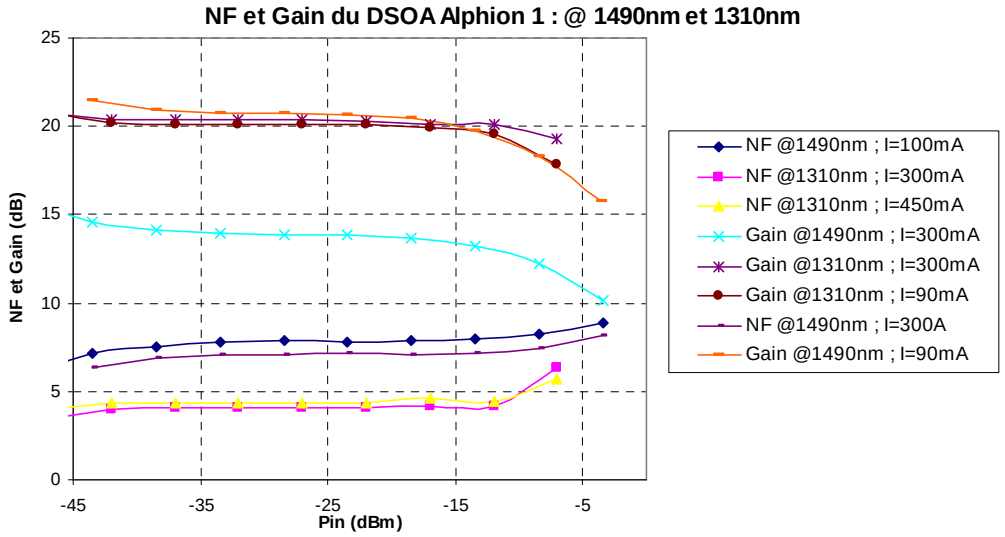
SOA Linéaire	Configuration 1		Configuration 2		Configuration 3		Configuration 4	
	Descendant	Montant	Descendant	Montant	Descendant	Montant	Descendant	Montant
	1550nm	1530nm	1550nm	1530nm	1550nm	1530nm	1550nm	1530nm
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d'amplification (dB)	15,5	17,8	1	3,4	1	17,8	15,5	3,4
Budget étendu (dB)	**27,8**	31,9	**13,5**	16,3	**13,5**	31,9	27,9	16,3
Gain = Budget étendu - marge	12,3	15,2	12,5	18,2	12,5	15,2	12,4	18,2

SOA Linéaire	Configuration 1		Configuration 2		Configuration 3		Configuration 4	
	Descendant	Montant	Descendant	Montant	Descendant	Montant	Descendant	Montant
	1530nm	1550nm	1530nm	1550nm	1530nm	1550nm	1530nm	1550nm
Atténuation (dB)	13	13	28	28	28	13	13	28
Marge d' amplification (dB)	15,5	17,8	0,4	0,2	0,4	17,8	15,5	0,2
Budget étendu (dB)	**27,3**	31,3	**13,9**	15,5	**13,6**	31,3	27,2	15,5
Gain = Budget étendu - marge	11,8	13,5	13,5	20,2	13,2	13,5	11,9	14

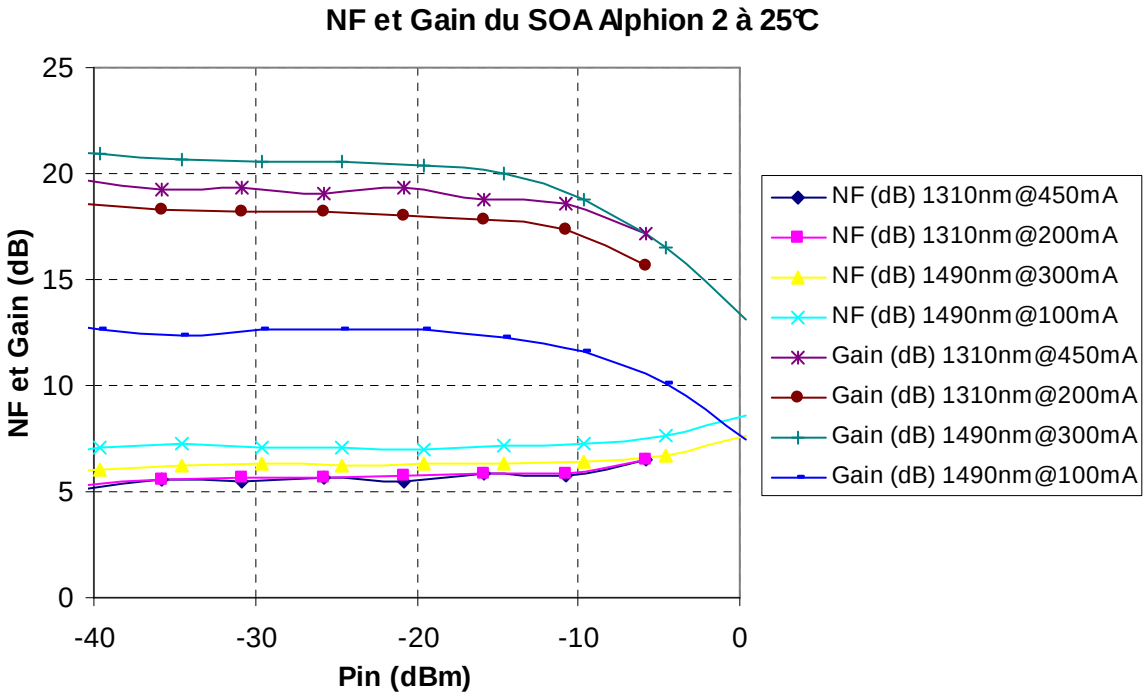
Annexe 6. Caractéristiques en NF et Gain des SOA

Les caractéristiques mesurées en NF et en Gain des SOA utilisés dans nos architectures de test sont présentées en fonction de la puissance d'entrée de l'amplificateur Pin et du courant de polarisation appliqué sur les courbes suivantes.

- **DSOA Alphion 1**



- **DSOA Alphion 2**



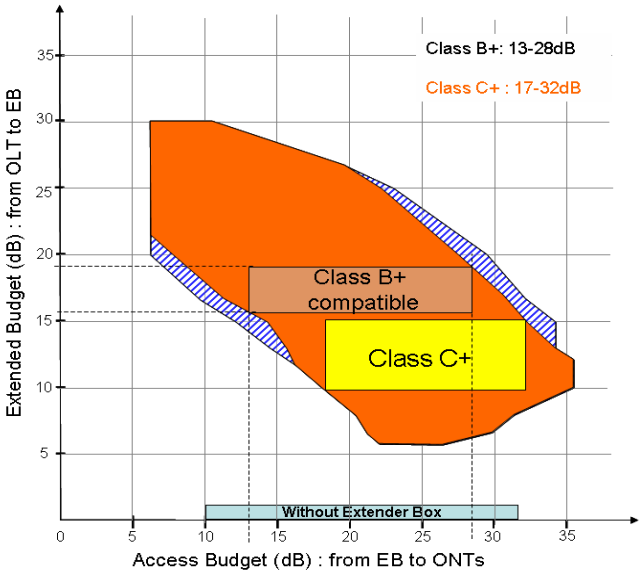
Annexe 7. Test d'autres solutions d'EB

Solution mixte PDFA-SOA

Nous avons réalisé une Extender Box "mixte", dans le sens où nous avons associé au PDFA pour amplifier le sens montant du GPON, plusieurs techniques d'extension de budget pour le sens descendant : un SOA et un OEO 2R. Les caractéristiques des amplificateurs utilisés sont résumées dans le tableau suivant :

	Type	Peak wavelength λ (nm)	Bandwidth Δλ (nm)	Noise Factor NF (dB)	Gain (dB)
PDFA ↑	Fiber	1310	45	5	26
SOA ↓	SC	1490	45	6,3	18
BOA ↑	Booster SC	1310	75	5,9	29,6
BOA ↓	Booster SC	1525	100	8,6	27,1

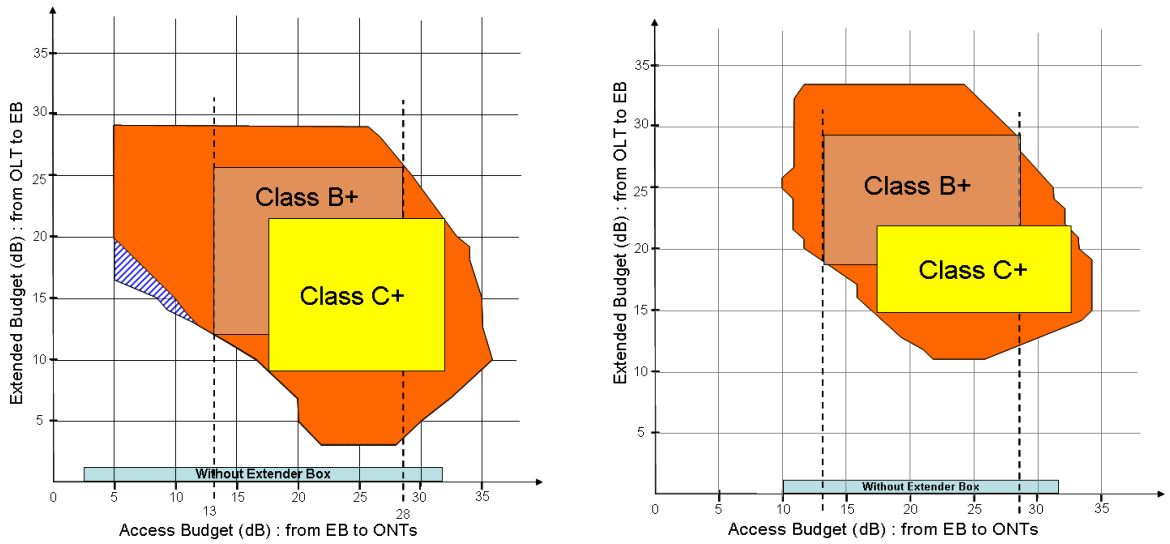
On a ainsi obtenu des résultats similaires à ceux présentés au Chapitre 2, pour la même combinaison PDFA-SOA mais cette fois sur le GPON Alcatel. La figure suivante présente la cartographie de budget obtenue en mesurant les pertes de paquets sur la transmission.



Cartographie de budget obtenue à l'aide d'un SOA et d'un PDFA sur GPON Alcatel

Solution mixte PDFA-OEO 2R

Pour le signal descendant à 1490nm, on a également testé une solution d'extension de portée OEO 2R. Les cartographies de budget optique obtenues sont présentées sur les figures suivantes (a) pour le GPON Huawei et (b) pour le GPON Alcatel.



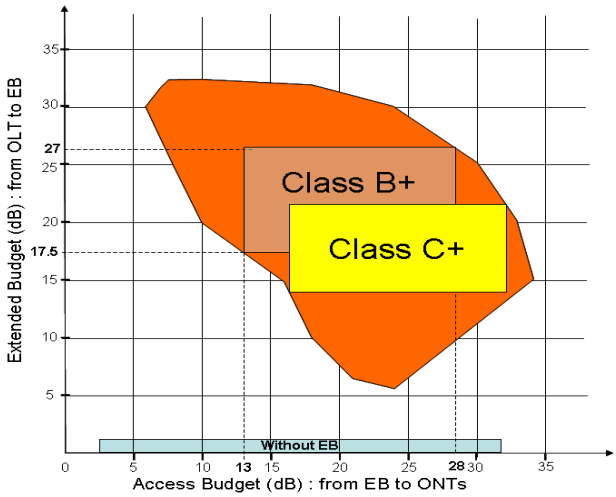
(a) (b)

Cartographie de budget pour une EB 2R-PDFA sur GPON Huawei (a) et sur GPON Alcatel (b)

On remarque alors que les zones de fonctionnement obtenues sur chaque GPON différent. Cela est lié au type de SFP utilisés sur l'EB OEO 2R. Selon si ces SFP sont "reset" ou "resetless", leur fonctionnement ne sera pas le même sur le GPON Huawei et sur le GPON Alcatel. On ne peut alors pas envisager d'implémenter ce type d'EB sur le réseau car elle ne sera pas transparente au GPON. De plus, une solution mixte amplification optique – régénération OEO est difficilement envisageable car elle combine les inconvénients de chacun : cout réduit mais toujours élevé, aucune transparence en débit pour les signaux descendants (OEO).

Solution BOA-BOA

Nous avons également envisagé de tester des BOA qui présentent de meilleures performances en termes de gain pour un facteur de bruit équivalent. Malheureusement, les amplificateurs utilisés étaient fortement sensibles à la polarisation et les résultats obtenus n'ont pas été assez précisément reproductibles pour valider l'utilisation de ce type d'amplificateur. C'est la raison pour laquelle les résultats de cette étude figurent en annexe. La figure suivante présente les résultats obtenus ponctuellement avec un BOA pour chaque sens de la transmission sur un GPON Huawei.



Cartographie de budget pour une EB BOA-BOA sur GPON Huawei

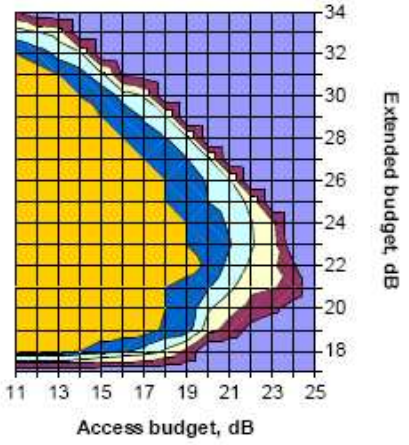
Synthèse des performances en budget optique

EB solution	Budget for Class B+ (dB)			Budget for Class C+ (dB)		
UP / DOWN	Access	Trunk	Total	Access	Trunk	Total
PDFA / SOA	13 - 28	12 - 20	25 - 48	17-32	10 - 15	27 - 47
PDFA / 2R	13 - 28	19 - 29	32 - 57	17-32	9 – 21,5	26 – 53,5
BOA / BOA	13 - 28	17,5 - 27	30,5 - 55	17-32	14 – 21,5	31 – 53,5

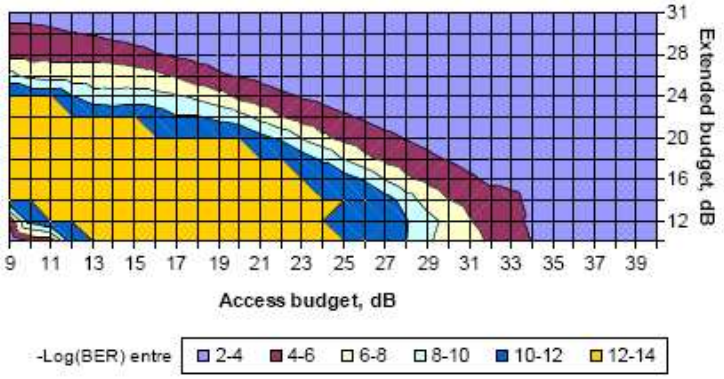
Pour chacune des EB présentée dans cette annexe, le tableau précédant synthétise les budgets optiques possibles en déport avec un accès de classe B+ et C+. Le budget total y est également calculé. Ce tableau montre qu'il est possible avec chaque solution d'EB, d'atteindre un budget total considérable et compatible avec une migration d'un GPON dont le budget accès serait de classe B+ ou C+. Cependant, ces solutions ne sont pas encore assez matures pour être considérées comme EB.

Annexe 8. Cartographie GPON-10GPON pour différentes puissances émises

downstream 1490 nm, (1490max-1577max)

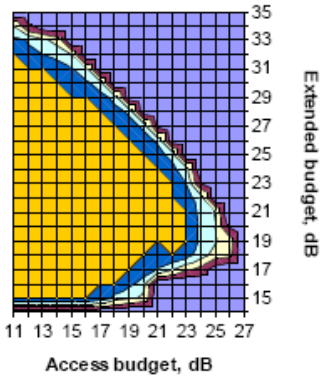


downstream 1577 nm, (1490max-1577max)

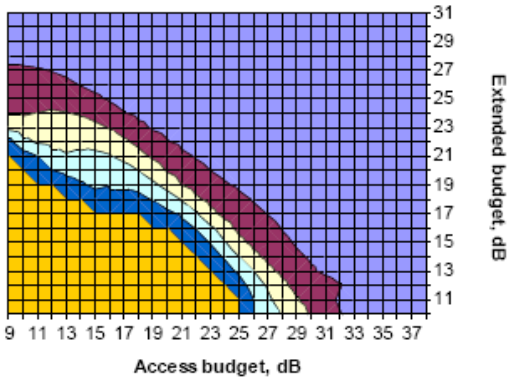


---

downstream 1490 nm, (1490max-1577min)

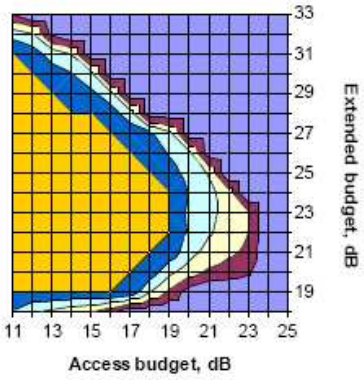


downstream 1577 nm, (1490max-1577min)

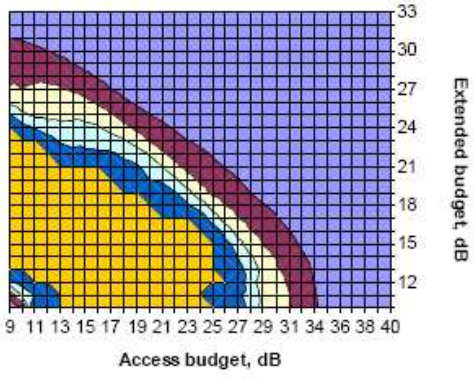


---

downstream 1490 nm, (1490min-1577max)



downstream 1577 nm, (1490min-1577max)



Annexe 9. Caractérisation des RSOA utilisés

Au niveau ONU, les RSOA utilisés sont des modules de type SFF (Small Form Factor), compatibles avec une modulation en mode burst à 1,25Gbit/s. On dispose de 4 RSOA : 1 RSOA noté "AC" et 3 RSOA "DC" notés par la suite "101", "102", "103". Dans un premier temps, nous les avons caractérisés en NF et Gain tel que le montre la figure suivante, pour différentes longueurs d'onde du spectre de la bande C.

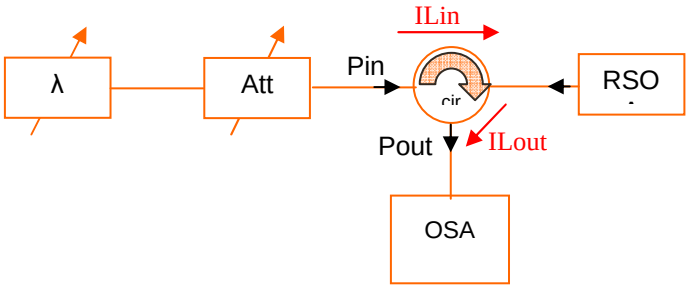
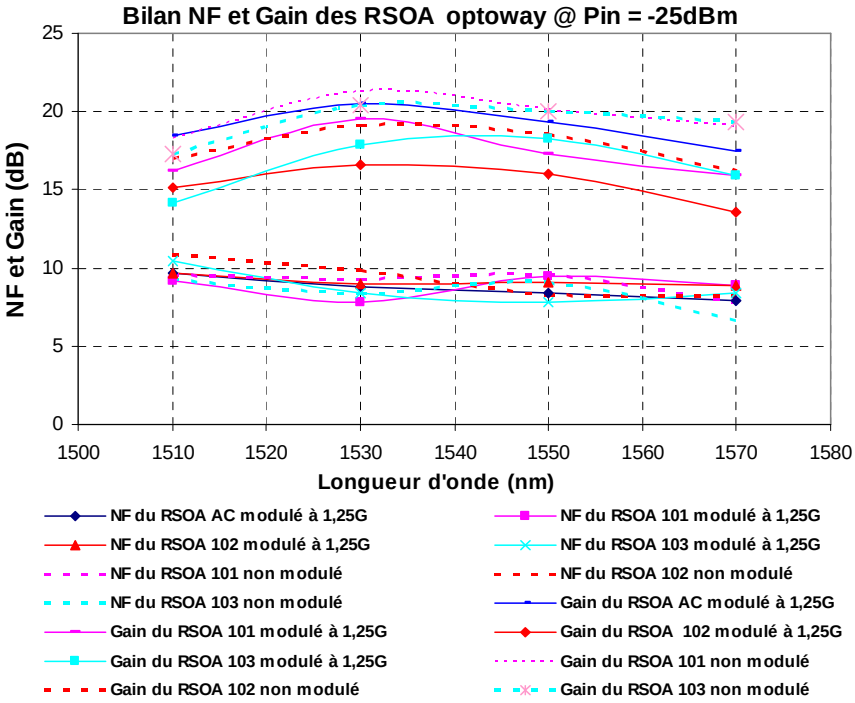


Schéma de mesure de NF et Gain pour un RSOA

De la même façon que pour les SOA dans le chapitre précédent, on obtient les courbes de NF et Gain suivantes.



Leurs spectres sont centrés autour de 1550nm avec une bande passante à -3dB du pic de gain d'environ 40nm. A 1550nm, les RSOA ont typiquement un gain de 19dB et un NF (Noise Factor) de 9dB pour une puissance d'entrée de -25dBm.

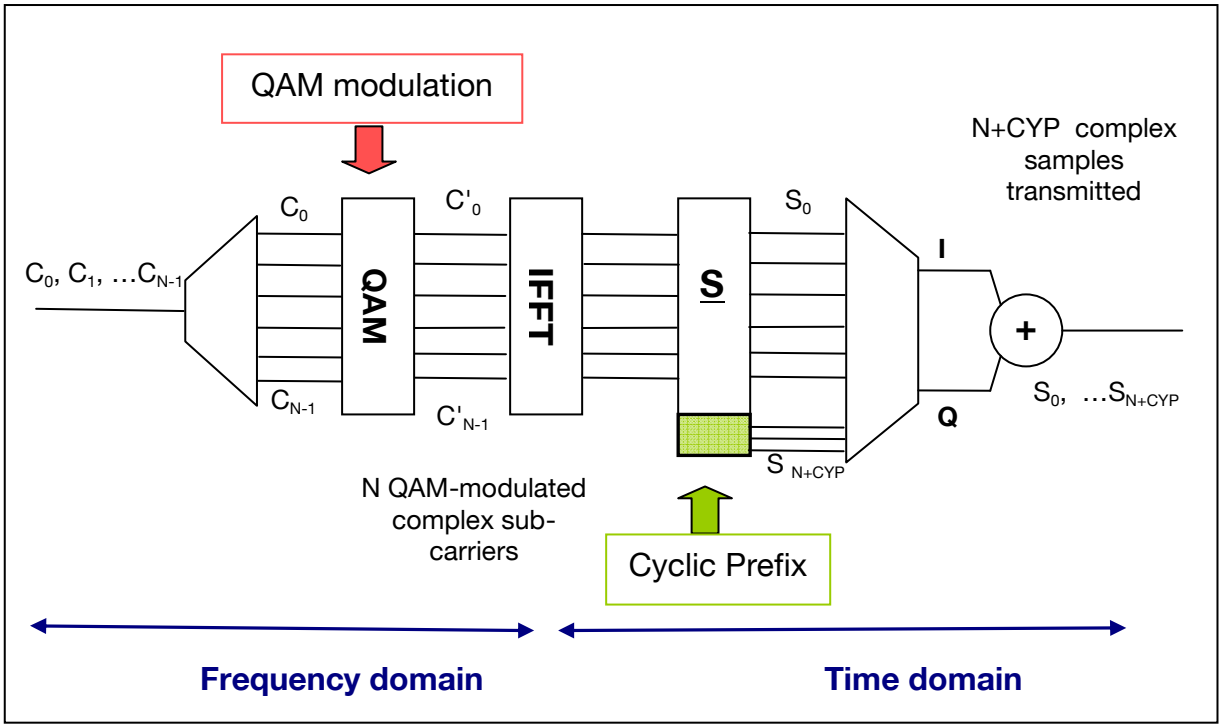
Annexe 10. Principe de modulation et démodulation OFDM

Modulation

Le principe de l'OFDM est de transmettre des données numériques en parallèle, modulées sur un grand nombre de porteuses à bas débit. Pour cela, le multiplexage en fréquence regroupe des données numériques en paquets de L et module tous les symboles par une porteuse différente en même temps. Le flux initial de données de débit D est multiplexé en L flux parallèles de débit D/L. Ainsi l'OFDM peut être vue soit comme une technique de modulation soit comme une technique de multiplexage fréquentiel.
Considérons les L symboles s_0; s_1; s_2; s_{L-1} émis pendant une durée symbole OFDM Tu, c'est à dire le temps qui sépare deux séquences de L données. Chaque symbole s_k module un signal à la fréquence f_k.
Le signal sm(t) résultant de la modulation de tous les signaux modulés en fréquence s'écrit :

$$sm(t) = \sum_{k=0}^{L-1} sk \exp(2j\pi fkt) \text{ pour } t \in [kTu, (k+1)Tu] \qquad \textit{Formule 1}$$

Ainsi, d'après la formule 1, la modulation OFDM apparait comme une transformée de Fourier discrète inverse des L symboles à moduler. On optimise généralement le calcul du signal sm(t) en utilisant une Transformée de Fourier Rapide Inverse (IFFT).



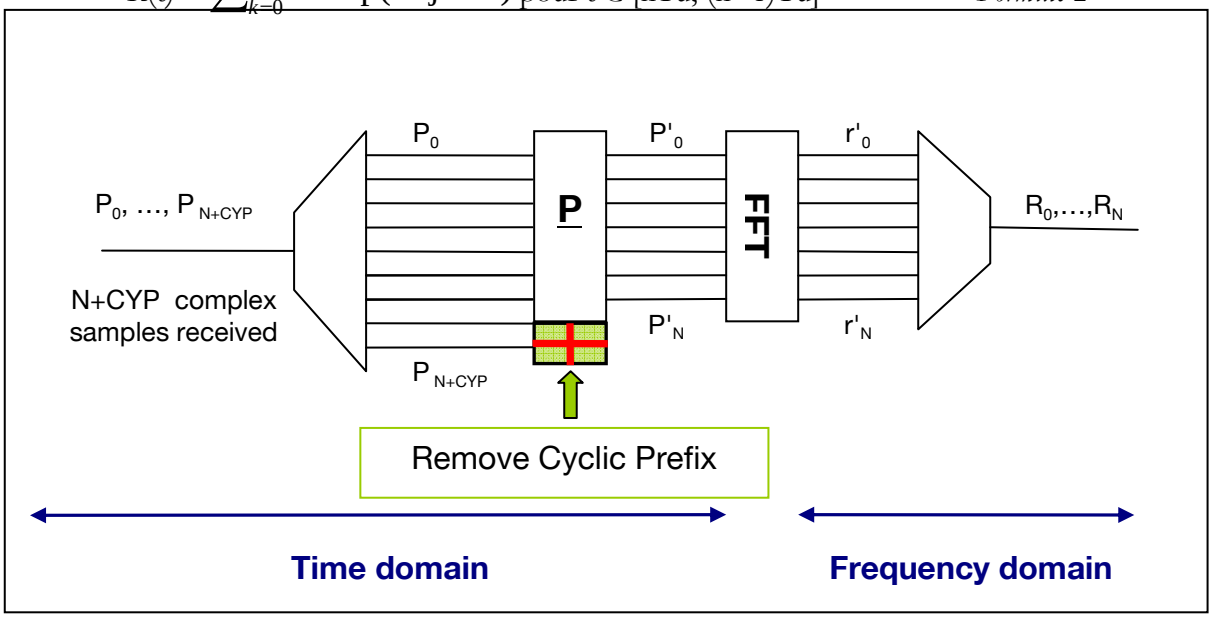
Schématisation de la modulation OFDM

Pour améliorer la résistance du signal OFDM aux effets défavorables comme la dispersion sur le canal de transmission, diminuer les phénomènes d'interférence entre symboles et faciliter la synchronisation, un préfixe cyclique est introduit à chaque symbole OFDM dans le domaine temporel.

Démodulation

Pour démoduler le signal reçu, il suffit d'appliquer la Transformée de Fourier Rapide FFT au lieu de l'IFFT.
En effet, le signal reçu après démodulation s'écrit:

$$R(t) = \sum_{k=0}^{L-1} rk \exp(-2j\pi fkt) \text{ pour } t \in [kTu, (k+1)Tu]$$ *Formule 2*



Schématisation de la démodulation OFDM

Index des figures

Figure 1 : Architecture d'un réseau de télécommunication 13
Figure 2 : Terminologie du réseau d'accès 14
Figure 3 : Carte des zones Françaises 15
Figure 4 : Catégories de réseaux sans fil [1] 16
Figure 5 : Débit possible selon la technologie et la portée 22
Figure 6 : Notations FTTx 23
Figure 7 : Architecture Point-à-Point optique [] 26
Figure 8 : Architecture PON unidirectionnelle 27
Figure 9 : Architecture PON bidirectionnelle 27
Figure 10 : Architecture PON WDM bidirectionnelle "broadcast and select" 28
Figure 11 : Architecture PON WDM bidirectionnelle avec aiguillage en longueur d'onde 29
Figure 12 : Exemples de modules SFP et SFF fabriqués par Zenko Technologies 31
Figure 13 : Schématique simplifiée du GPON 32
Figure 14 : Photographie d'un OLT GPON Alcatel-Lucent 33
Figure 15 : Plan d'allocation des longueurs d'onde GPON 35
Figure 16 : Détails des paquets et de la trame montante 36
Figure 17 : Programme de la trame descendante 36
Figure 18 : Atténuation linéique d'une fibre SMF28 41
Figure 19 : Architecture d'un système PON de classe B+ 42
Figure 20 : Répartition des technologies et des systémiers BPON, GPON, GEPON 45
Figure 21 : Schéma d'implémentation d'une Extender Box 45
Figure 22 : Extender box à base d'amplification optique 46
Figure 23 : Extender Box à base de convertisseur OEO 46
Figure 24 : Planification de l'évolution du NGPON au FSAN 49
Figure 25 : Prévisions des débits des services en continuité et innovants 53
Figure 26 : Impact de la concurrence sur la course au débit selon NTT 57
Figure 27 : PON avec superposition en λ des générations de PON et Extender Box 61
Figure 28 : Scope de l'IEEE 802.3av [] 61
Figure 29 : Plan d'allocation des longueurs d'onde 10GEPON [20] 63
Figure 30 : Synthèse des différentes gammes de budget du 10GEPON [20] 63
Figure 31 : Migration de l'EPON vers le 10GEPON [20] 64
Figure 32 : Technologies de réception double-débit pour EPON et 10GEPON [20] 64
Figure 33 : Convergence des topologies dans le cadre du NGPON2 68
Figure 34 : Convergence des technologies dans le cadre du NGPON2 69
Figure 35 : Architecture WDM-PON 69
Figure 36 : Déploiement mondial du PON WDM [] 70
Figure 37 : Architecture d'un réseau PON hybride WDM/TDM 71
Figure 38 : Schématisation du projet SARDANA [28] 73
Figure 39 : Principe de multiplexage OFDM en sous porteuses [] 74
Figure 40 : Codage des sous porteuses OFDM [31] 74
Figure 41 : Schématisation d'un PON OFDMA [31] 75
Figure 42 : Combinaison OFDM + TDM (a) et OFDM + TDM +WDM (b) [31] 75
Figure 43 : Implémentation de l'Extender Box une architecture GPON 81
Figure 44 : Schématisation de l'augmentation de portée du GPON 82
Figure 45 : Schématisation de l'augmentation du taux de remplissage du GPON 82
Figure 46 : Schématisation de la remontée des centraux vers le réseau de collecte 83
Figure 47 : Cartographie de maillage des centraux DSL (NRA) autour de Lannion 84
Figure 48 : Exploitation du budget optique en longueur de fibre ou taux de couplage 85
Figure 49 : Relevé de spectre d'un amplificateur centré à 1510nm 86
Figure 50 : Mesure du NF à partir du spectre optique relevé sur l'OSA 87
Figure 51 : Courbe de NF et gain en fonction du courant de pompe et de la longueur d'onde 88
Figure 52 : Principe de la modulation de gain croisée dans un SOA 89
Figure 53 : Schéma d'un Double SOA [] 90
Figure 54 : Schéma de fonctionnement d'un répéteur OEO 93
Figure 55 : Régénération des signaux sur la liaison descendante 94
Figure 56 : Emission et réception des signaux descendants [] 94
Figure 57 : Régénération des signaux en mode burst sur la voie montante 94

Figure 58 : Modulation à l'ONU des signaux montants [49] **95**
Figure 59 : Réception à l'OLT des signaux montants [49] **95**
Figure 60 : Signal de Reset pour la réception mode burst [49] **96**
Figure 61 : Régénération des données reçues à l'aide d'une CDR [] **96**
Figure 62 : Régénération 3R sur la voie montante **97**
Figure 63 : Diagramme temporel des trames en entrée et en sortie de la CDR **97**
Figure 64 : Photographie d'une EB Telnet SFF (a), Zenko SFF (b) et Telnet SFP 1 vers 4(c) **98**
Figure 65 : Diagramme de l'œil d'un signal NRZ **99**
Figure 66 : Architecture du réseau avec amplificateur au central **102**
Figure 67 : Architecture du réseau avec amplificateur en ligne **103**
Figure 68 : Architecture du réseau avec amplificateur en bidirectionnel **104**
Figure 69 : Schéma de test d'une EB sur un GPON **106**
Figure 70 : Schématisation du phénomène d'hystérésis **107**
Figure 71 : Cartographie de budget du DSOA sur GPON Huawei en fonction du courant de polarisation **109**
Figure 72 : Cartographie de budget du DSOA à 300mA bidirectionnel sur GPON ALU **110**
Figure 73 : Résultats de BER avec un D-SOA sur un GPON ALU pour les signaux montants (a), descendants (b). **111**
Figure 74 : Courbes de BER des signaux descendants à budget d'accès fixe avec un DSOA **111**
Figure 75 : Courbes de BER des signaux montants à budget d'accès fixe avec un DSOA **112**
Figure 76 : Cartographie de BER d'un DSOA sur GPON en fonctionnement bidirectionnel **113**
Figure 77 : Cartographie de budget avec PDFA & SOA sur GPON Huawei **114**
Figure 78 : Architecture de test avec deux DSOA cascadés en série **115**
Figure 79 : Résultats de la mesure de BER des signaux descendants et montants **115**
Figure 80 : Courbes de BER à budget déport fixés à 19 et 22 dB **116**
Figure 81 : Application typique pour un GPON rural **117**
Figure 82 : Architecture de test avec 2 DSOA connecté en parallèle **117**
Figure 83 : Comparaison des zones de fonctionnement d'un DSOA seul ou 2 DSOA cascadés **118**
Figure 84 : Résultats de BER bidirectionnel avec un répéteur OEO 2R sur un GPON **119**
Figure 85 : Résultats de BER bidirectionnel avec un répéteur OEO 3R sur un GPON **120**
Figure 86 : Test des services Net et VoD sur un GPON étendu **121**
Figure 87 : EB avec option d'amplification CATV [55] **123**
Figure 88 : Synthèse des performances optiques de chaque type d'EB **125**
Figure 89 : Localisation des centraux et densité de DSLAM en région Bretagne **126**
Figure 90 : Eligibilité en fonction de la localisation de l'OLT et du budget optique **126**
Figure 91 : Taux de couplage possible à partir d'un OLT en collecte 1&2 par classe de budget **127**
Figure 92 : Coupleur virtuel (a) et son implémentation (b) sur un GPON **128**
Figure 93 : Courbes de BER des signaux montants et descendants pour les arbres GPON 1 et 2 ..... **129**
Figure 94 : Application pour le coupleur virtuel : **129**
Figure 95 : Application du coupleur virtuel : **130**
Figure 96 : Prototype Telnet d'Extender Box GPON 1 vers 4 avec management OMCI [] **130**
Figure 97 : Cartographie de budget d'une EB 1:4, prototype Telnet **131**
Figure 98 : Schématisation du scénario A **133**
Figure 99 : Schématisation du scénario B **134**
Figure 100 : Schématisation du scénario C **134**
Figure 101 : Schématisation du scénario D **134**
Figure 102 : Schématisation du scénario E **135**
Figure 103 : Schématisation du scénario F **135**
Figure 104 : Schématisation du scénario G **135**
Figure 105 : Illustration d'un central maître amené à couvrir les zones d'éligibilité de 3 autres centraux esclaves **136**
Figure 106 : Consommation électrique par client selon le scénario de déport et le nombre de clients connectés par central **137**
Figure 107: Taux de remplissage moyen de la zone selon le scénario de déport et le nombre de clients connectés par central **137**
Figure 108 : Architecture de GPON étendu par une EB WDM **139**
Figure 109 : Scénarios de mutualisation proposés par CORECESS **140**
Figure 110 : Réseau d'accès étendu avec une agrégation à 10Gbit/s **141**
Figure 111 : Schéma expérimental de l'agrégation **141**
Figure 112: Conversion du mode burst en mode continu (CW) (1 à 3) et sa réciproque (3 à 4) **142**

Figure 113 : Courbes de BER du signal descendant à 10Gbit/s et 2,5Gbit/s et du signal montant à 1,25Gbit/s 142
Figure 114 : Schématisation de l'architecture réalisée avec l'OSN 1800 143
Figure 115 : Cartographie de perte de paquet selon les budgets possibles sur chaque lien OSN : de A à C et de C aux ONU 144
Figure 116 : Solution OTN proposée par Huawei : l'OSN 1800 144
Figure 117 : Illustration d'une transmission monodirectionnelle à 10Gbit/s 151
Figure 118 : Schéma descriptif du module de réception mode burst implémenté 152
Figure 119 : Burst optique émis par l'EML (b) et reçu par la CDR après remplissage (a) 153
Figure 120 : Courbes de BER mesurées en B2B pour des ER de 6, 9 et 11dB et différentes longueurs de préambule regroupées par type de modulation: modulation continue (a), burst de 96% (b), burst de 50% (c) et burst de 10% (d) 154
Figure 121 : Schéma d'expérimentation de l'amplification de signaux à 10Gbit/s 158
Figure 122 : Courbes de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec et sans EDFA 159
Figure 123 : Cartographie de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec EDFA 159
Figure 124 : Courbes de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec et sans SOA 160
Figure 125 : Cartographie de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec SOA 161
Figure 126 : Courbes de BER d'une transmission continue à 10Gbit/s avec SOA + filtres 162
Figure 127 : PON amplifié à l'aide d'un SOA à 10.7Gbit/s 163
Figure 128 : Trames montantes avant (a) et après le SOA(b) 164
Figure 129 : Evolutions du budget déport en fonction du budget d'accès 164
Figure 130 : Courbes de BER en fonction de la puissance reçue à l'OLT 165
Figure 131 : Architecture de coexistence GPON-10GPON 167
Figure 132 : Relevés du spectre optique du SOA (a) et de ses caractéristiques en NF et gain (b) 168
Figure 133 : Cartographies de BER associées aux transmissions GPON seule (a) et 10GPON seule (b) avec le même SOA. 168
Figure 134 : Cartographies de BER associées aux transmissions simultanées GPON (a) 169
Figure 135 : Exemple d'architecture PON WDM, amplifiée par un seul SOA 172
Figure 136 : Caractérisation des émetteurs-récepteurs en back to back 173
Figure 137 : Spectres des SOA ayant des pics de gain à 1510nm et à 1550nm 173
Figure 138 : Schématique de la mesure de NF et Gain d'un SOA amplifiant simultanément une transmission bidirectionnelle 173
Figure 139 : Courbes de NF et Gain du SOA (pic à 1510nm) pour λ_1 = 1570nm et λ_2 = 1550nm 174
Figure 140 : Courbes de BER d'un SOA en bidirectionnel pour un signal descendant à 2,5Gbit.s & 1550nm et un signal montant à 1,5Gbit/s &1570nm. 175
Figure 141 : Architecture d'un réseau hybride PON WDM-TDM 177
Figure 142 : Image des paquets modulés par les RSOA : (a) paquets A et B ; (b) réglage de l'allumage du RSOA 178
Figure 143 : Architecture avec 10 km de fibre en distribution (a) et double fibre en transport (b) 178
Figure 144 : Courbes de BER d'un ONU 179
Figure 145 : Schéma d'une transmission AMO-OFDM basé sur une architecture TDM PON 181
Figure 146 : Evolution du débit OFDM à BER fixe (1.10^{-4}) pour les couples DFB1+APD2.5 [97] (a) et DFB6.9 et APD8 (b) 182
Figure 147 : Evolution du BER à débit fixe (10.5Gbit/s) pour le couple DFB1+APD2.5 en Back to Back ou en présence de 20km, et 50km de fibre [97] 182
Figure 148 : Schéma d'expérimentation de l'amplification d'une transmission OFDM 183
Figure 149 : Courbes de NF et Gain de l'EDFA (a) et du SOA (b) 183
Figure 150 : Débits OFDM atteints à un BER de 10^{-4} 185
Figure 151 : Débit ODFM en fonction du budget optique total à un BER=10^{-4}, selon plusieurs types de filtre : 5nm, Gaussien ou AWG. 186
Figure 152 : Cartographie de budget optique en fonction du BER à 2.5Gbit/s (a) 187
Figure 153 : Cartographie de budget optique en fonction du BER à 2.5Gbit/s (a), 5Gbit/s (b) 188
Figure 154 : Evaluation en débit et budget optique pour un BER = $1,2.10^{-4}$ avec un SOA (a) 189
Figure 155 : Evaluation des effets de la dispersion chromatique sur le débit OFDM et le budget optique total sans amplification, avec un SOA et un EDFA. 190
Figure 156 : Un équipement central gérant plusieurs RRH (RRU) 192
Figure 157: Architecture de convergence des réseaux d'accès fixe et mobile 192
Figure 158 : Schéma de fonctionnement de la RoF numérique [7]. 194
Figure 159 : Utilisation de plusieurs longueurs d'onde pour contrôler plusieurs RRU 195

Index des tableaux

Tableau 1 : Performance des normes sans fil 17
Tableau 2 : Synthèse des technologies xDSL [2] 19
Tableau 3 : Consommation électrique des ONT Huawei et ALU 34
Tableau 4 : Allocation des services par VLAN 39
Tableau 5 : Pertes d'un coupleur optique 41
Tableau 6 : Classes A, B, B+, C, C+ 42
Tableau 7 : Spécifications des émetteurs et récepteurs à l'OLT et à l'ONT selon les classes. 43
Tableau 8 : Récapitulatif des performances des PON normalisés 44
Tableau 9 : Identification des classes de budget optique du XGPON1 59
Tableau 10 : Synthèse des propriétés du XGPON1 et XGPON2 60
Tableau 11 : Spécifications de l'IEEE du 10GEPON [20] 62
Tableau 12 : Synthèse des portées et taux de partage du 10GEPON 62
Tableau 13 : Synthèse technique de la normalisation du NGPON1 67
Tableau 14 : Performances WDM relevées par technologies d'ONU 71
Tableau 15: Evaluation du budget supplémentaire nécessaire selon l'objectif 84
Tableau 16 : Meilleurs résultats de l'amplification au central 102
Tableau 17 : Meilleurs résultats de l'amplification en ligne : Budget possible de l'OLT à l'EB 103
Tableau 18 : Meilleurs résultats de l'amplification en bidirectionnel 105
Tableau 19 : Caractéristiques des DSOA à Pin= -20dBm 108
Tableau 20 : Consommation électrique des EB 124
Tableau 21 : Coût des EB 124
Tableau 22 : Coût détaillé de chaque scénario : Scénario 1 (a), Scénario 2 (b) 132
Tableau 23 : Consommation électrique par client d'un OLT selon le nombre de port P 133
Tableau 24 : Synthèse des résultats obtenu sur GPON selon la technologie 145
Tableau 25 : Synthèse des Budget Optique (OB) obtenus à un BER de 10^{-3} 156
Tableau 26 : Principales caractéristiques des amplificateurs utilisés 157
Tableau 27 : Rappel des paramètres particuliers aux standards GPON et 10GPON 166
Tableau 28 : Synthèse des résultats obtenus avec amplification 190
Tableau 29 : Caractéristiques du SOA (InPhenix) 195

Table des références

[*] "Analyse des performances de modules optoélectroniques pour l'accès optique"; Rapport de stage d'ingénieur en optronique de Fabienne Saliou, publié en 2006 l'ENSSAT

[**] "Analyse de l'architecture d'une nouvelle génération de réseau d'accès optique"; rapport de stage de Master PHYPHOTON de Fabienne Saliou, publié en 2007 à l'ENSSAT.

[1] http://www.commentcamarche.net/wireless/wlintro.php3

[2] http://www.ybet.be/hardware2_ch6/Liaisons_haut_debit.htm

[3] http://www.fibre-optique-france.com/14092009/matignon-va-verser-750-millions-de-pour-la-fibre-optique-dans-les-zones-peu-denses.html

[4] http://www.avicca.org/La-fibre-optique-ne-doit-pas-etre.html

[5] http://www.csi.ucd.ie/Staff/jmurphy/publications/921.pdf

[6] http://www.ant.developpement-durable.gouv.fr/article.php3?id_article=18

[7] ITU-T,"Réseaux optiques passifs gigabitaires : Spécification de la couche dépendante du support physique", G.984.2, Mars 2003

[8] "Transient Chirping in Single Frequency Lasers: Lightwave Systems Consequences", R.A. Linke, Electronics Letters 20, 472-473, 1984

[9] "Modulation Induced Transient Chirping in Single Frequency Lasers", R.A. Link, IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, Vol. 21, No. 6, JUNE 1985

[10] "Single-Mode Operation of 500 Mbit/s Modulated AIGaAs Semicondoctor Laser by Injection Locking", S. Kobayashi et al., Electronics Letters Vol. 16 pp747-748, 1980

[11] "Upstream traffic transmitter using injection-locked Fabry-Perot laser diode as modulator for WDM access networks", L.Y Chan et al., Electronics Letters, Vol.38, N°1 pp 43-45, 2002

[12] http://zenkotech.com/optical.htm

[13] Recommandation ITU-T G984.2

[14] http://www.pr-inside.com/teknovus-and-ntt-communications-collaborate-r691936.htm

[15] Recommandation ITUT-T G984.3

[16] ITU-T G.983.x: BPON (Broadband PON) standard

[17] IEEE 802.3ah : EPON or GEPON (Ethernet PON) standard

[18] "Approaching the Zettabyte Era", white paper by Cisco Visual Networking , june 2008 https://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481374_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html

[19] http://en.wikipedia.org/wiki/Plain_old_telephone_service

[20] Standard IEEE , 802.3.Av

[21] Han Hyub Lee et al, "WDM PON experience and direction",FSAN Workshop, Technical Session Meeting 4.1 November 10, KYOTO, Japan, FSAN 2009

[22] Bo Zhang et al, "A simple high-speed WDM-PON utilizing a centralized supercontinuum broadband light source for colorless ONUs," in the proc. of OFC 2006, USA, paper OTuC6.

[23] Chih-Lung Tseng et al, " Bidirectional Transmission Using Tunable Fiber Lasers and Injection-Locked Fabry–PÉrot Laser Diodes for WDM Access Networks ", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 20, NO. 10, MAY 15, 2008

[24] Thang T. Pham et al., "Bidirectional 1.25 Gbit/s WDM-PON with broadcasting function based on fabry-perot light source and RSOA," in the proc. of OFC 2009, San Diego, USA, paper OThA2.

[25] Jingjing Zhang and Nirwan Ansari, "Design of WDM PON With Tunable Lasers:The Upstream Scenario", Journal or Lightwave Technologies, VOL. 28, NO. 2, JANUARY 15, 2010, p228

[26] C. W. Chow, C. H. Wang, C. H. Yeh, and S. Chi, "Performance Analysis of Spectrally Broadened Rayleigh Noise Mitigation Scheme for DWDM-PONs", OECC/ACOFT 2008, 7-10July 2008.

[27] "10 Gbit/s Hybrid DWDM/TDM PON For Long Reach Optical Access", E. K. MacHale, G. Talli and P. D. Townsend, The Second International Conference on Access Technologies 2006, 21-22 June 2006 Page : 37 – 40

[28] http://www.ict-sardana.eu

[29] Josep Prat et al, "Hybrid Ring-Tree WDM/TDM-PON Optical Distribution Network", ICTON 2009, Th.B3.1

[30] Yiyan Wu, "Performance Comparison of ATSC 8-VSB and DVB-T COFDM Transmission Systems for Digital Television Terrestrial Broadcasting", ICCE'99 (Invited paper).

[31] NEC Laboratories America, "OFDM-based PON for NGPON2", FSAN NGPON2 Workshop
San Francisco, CA, Feb. 2-4 2010

[32] Peter J. Winzer and René-Jean Essiambre, "Advanced Optical Modulation Formats", Proceedings of the IEEE, Vol 94, No 5, May 2006.

[33]Ilya Lyubomirsky and Bharath Pitchumani, "DPSK Demodulator Based on Optical Discriminator Filter", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, No. 2, February 2005.

[34] A. H. Gnauck and P.J Winzer, "Optical Phase Shift Keyed Transmission", Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 1, January 2005.

[35] Hiromi Ueda et al, "A New Optical Access Network Using Optical Packet Switches", Tokyo University of Technology, November 10, 2009, KYOTO, Japan, FSAN meeting 2009

[36]"Etude de l'augmentation de capacité des réseaux d'accès optique de type PON basés sur l'accès multiple à répartition dans le temps" ; Thèse de doctorat de Z.Belfqih ; Université de Rennes 1 et Telecom Bretagne , présentée le 16 Décembre 2008.

[37] http://cms.comsoc.org/SiteGen/Uploads/Public/Docs_Globecom_2009/Fricke.pdf

[38] D. Payne and R. Davey, "The future of fibre access systems?," BT Technol. J., 20, 104-114, 2002

[39] Agrawal, G.P." Fiber-Optic Communications Systems" (3 ed. Wiley, 2002), Chapter 3 "basic concept"

[40] "Optical fiber telecommunications IVA", Kaminow, Academic press, Elsevier, 2002

[41] "Modélisation et caractérisation d'un amplificateur optique à semiconducteurs avec adaptateurs de mode" ; Thèse de doctorat de Fabienne Riou, Université des sciences de Saint-Etienne, 1994

[42] http://www.alphion.com/default.asp?contentID=10

[4] "Demonstration of RSOA-based remote modulation at 2.5 and 5 Gbit/s for WDM PON", P.Chanclou et al., OWD1, OFC2007

[44]"Performance Analysis of Wavelength Conversion Based on Cross-Gain Modulation in Reflective Semiconductor Optical Amplifiers", P. S. André et al., IMOC 2001, pp. 119-122

[45] "High performance 1.55µm polarisation-insensitive semiconductor optical amplifier based on low-tensile-strained bulk GaInAsP", J-Y. Emery and al. , electronic letters, Vol. 33, n°12, 1997

[46] "16x1.25 Gbit/s WDM PON based on ASE-injected R-SOAs in 60°C temperature range", H.S. Shin and al, OFC'06, paper OTuC5

[47] "Evaluation of the Budget Extension of a GPON by EDFA Amplification", Genay, N. ; Soret, T. ; Chanclou, P. ; Landousies, B. ; Guillo, L. ; Saliou, F ; ICTON '07. 9th International Conference on Transparent Optical Networks, vol 4, p79-79.

[48] Reach Extension Strategies for Passive Optical Networks [Invited] ; Saliou, F.; Chanclou, P.; Laurent, F.; Genay, N.; Lazaro, J.A.; Bonada, F.; Prat, J.; Journal of Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Volume: 1 , Issue: 4, p C51-C60.

[49] http://www.zenkotech.com/PON-Modules%20Introduction.pdf

[50] "Photodiode UTC et oscillateur différentiel commande en tension à base de TBdH InP pour récupération d'horloge dans un réseau de transmission optique à très haut débit", S. Withitsoonthorn, thèse de doctorat de l'université Paris 6 soutenue le 4 juin 2004

[51] " A Cross Layer Study of Packet Loss in All-Optical Networks" ; Andreas Kimsas, Harald Øverby, Steinar Bjørnstad and Vegard L. Tuft ; Advanced International Conference on Telecommunications andInternational Conference on Internet and Web Applications and Services (AICT/ICIW 2006)

[52] Présentation du projet AROME : http://www.agence-nationale-recherche.fr/documents/aap/2006/finance/Telecom-2006-resumes.pdf

[53] "1.3 / 1.5 µm QD-SOAs for WDM/TDM GPON with extended reach and large upstream / downstream dynamic range "; Bonk, R.; Brenot, R.; Meuer, C.; Vallaitis, T.; Tussupov, A.; Rode, J.C.; Sygletos, S.; Vorreau, P.; Lelarge, F.; Duan, G.H.; Krimmel, H.-G.; Pfeiffer, T.; Bimberg, D.; Freude, W.; Leuthold, J.; OFC 2009.

[54] "Field experiment with a hardened GPON reach extender with dual-parenting protection" ; Nesset, D.; Grossman, D.; Appathurai, S.; Fitzgerald, J.; Wright, P.; Farrow, K.; Yang, S.; ECOC 2008. 34th European Conference on Optical Communication, 2008.

[55] Telnet Redes Inteligentes web site (product sheet) : http://www.telnet-ri.es/index.php?id=346&L=1

[56] " Alcatel veut réduire par mille la consommation des réseaux", Journal Le Monde, article du 12 Janvier 2010

[57] http://www.ofcnfoec.org/conference_program/NFOEC2010_Lange_Final_vPUB.pdf

[58] http://www.zenkotech.com/system.htm "Dual ECL product"

[59] http://www.telnet-ri.es/index.php?id=368&L=1%2F%2Fassets%2Fsnippets%2Freflect%2Fsnippet.reflect.php%3Freflect_base%3D

[60] http://en.wikipedia.org/wiki/Idle_(CPU)

[61] Thèse de doctorat de Z.Belfqih, Telecom Bretagne , Décembre 2008.

[62] Z. Belfqih, P. Chanclou, F. Saliou, N. Genay, B. Landousies ;"Enhanced Optical Budget System Performance of an Burst Extended PON at 10.7Gbit/s over 60km of Fibre" ECOC 2008, 21-25 September 2008, Brussels, Belgium Th.2.F.4

[63], S. Nishihara et al., "A 10.312-Gbit/s SiGe BiCMOS Burst Mode 3R Receiver for 10G-EPON Systems", OFC 2007, PDP8

[64] Mickelsson, Hans In De Betou, Einar Skubic, Bjorn Dahlfort, Stefan ; "Challenges and opportunities for migration towards 10GPON" ; Communications and Photonics conference and Exhibition, ACP 2009. Asia ; 2-6 Nov. 2009; Volume : 2009-Supplement ; Shanghai, China

[65] GUAN Ai-Hong (1) ; FU Hong-Liang (1) ; "Experiment study on reducing SOA induced crosstalk by CW light injection and dispersion management"; Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering ; Optical transmission, switching, and subsystems No6, Hangzhou , CHINA, 2008, vol. 7136 (2), pp. 71362I.1-71362I.8

[66] Li, Z.; Dong, Y.; Lu, C.; Wen, Y. J.; Wang, Y.; Hu, W.; Cheng, T. H.; "Comparison of Cross-Gain Modulation Effect of Manchester-Duobinary, RZ-DPSK, NRZ-DPSK, RZ, and NRZ Modulation Formats in SOAs" ; Photonics Technology Letters, IEEE ; Volume: 18 , Issue: 24 ; 2006 , Pages: 2680 – 2682

[67] Luo, G.; Zyskind, J.L.; Nagel, J.A.; Ali, M.A.; "Experimental and theoretical analysis of relaxation-oscillations and spectral hole burning effects in all-optical gain-clamped EDFA's for WDM networks" ; Journal of Lightwave Technology ; Volume: 16 , Issue: 4 ; Publication Year: 1998 , Page(s): 527 – 533

[68] Hara, K. Kimura, S. Nakamura, H. Yoshimoto, N. Kumozaki, K. ; "Burst-mode bit-rate discrimination circuit for 1.25/10.3-Gbit/s dual-rate PON systems" ; OFC 2009; 22-26 March 2009 ; San Diego, CA

[69] J.Nakagawa, M. Noda, N. Suzuki, S. Yoshima, K.Nakura, M.Nogami ; "First demonstration of 10G-EPON and GE-PON co-existing system employing dual rate burst mode 3R transceiver"; OFC2010, March 2010, PDPD10, San Diego, CA

[70] Iannone, P.P. ; Reichmann, K.C. ;Frigo, N.J. "WDM Access Networks" ; European Conference on Optical Communication. ECOC 2002. 8-12 Sept. 2002, Copenhagen

[71] Rogowski, T. Faralli, S. Bolognini, G. Di Pasquale, F. Di Muro, R. Nayar, B. ; "SOA-Based WDM Metro Ring Networks With Link Control Technologies"; Photonics Technology Letters, IEEE Oct.15, 2007 ; Volume 19 , Issue 20 ; On page(s) : 1670 – 1672

[72] Iannone, P.P. Reichmann, K.C. Spiekman, L.H. :LEOS . " Amplified CWDM systems"Lasers and Electro-Optics Society 2003, IEEE, 27-28 Oct. 2003; Volume 2; on page(s): 678 - 679

[73] Kowakewski, M.; Marciniak, M.; Sedlin, A.; "Nonlinear interactions in short-haul DWDM optical fibre telecommunication system " ; Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, 2000. Proceedings of LFNM 2000. 2nd International Workshop on Digital ; Page(s): 13 – 16

[74] Awaji, Y.; Inoue, J.; Sotobayashi, H.; Kubota, F.; Ozeki, T.; "Nonlinear inter-channel cross talk of linear optical amplifier (LOA) in DWDM applications", Optical Fiber Communications Conference, 2003. OFC 2003 , Publication Year: 2003 , Page(s): 441 - 443 vol.2

[75] Bang, S.W.; Daut, D.G.; "Analysis of CPM and FWM phenomena for various signaling formats in 16 channel DWDM"; The First IEEE and IFIP International Conference in Central Asia on Internet, 2005.

[76] Liu, Y.; Bursev, S.; Tsuda, S.; Hegarty, S.P.; Mozdy, R.S.; Hempstead, M.; Luther, G.G.; Smart, R.G.; "Four-wave mixing in EDFAs"; Electronics Letters; Publication Year: 1999 ,Volume: 35 , Issue: 24 Page(s): 2130 – 2131

[77] Reichmann, K.C. Iannone, P.P. Birk, M. Frigo, N.J. Barbier, D. Cassagnettes, C. Garret, T. Verlucco, A. Perrier, S. Philipsen, J. : " An eight-wavelength 160-km transparent metro WDM ring network featuring cascaded erbium-doped waveguide amplifiers", Photonics Technology Letters, IEEE , Oct 2001, Volume 13, on page(s): 1130 – 1132

[78] Jang, J.H. ; Jung, J.H. ; Lee, W.J. ; Yun, W.W. ; Lee, K.K. ; "Implementation of automatic gain controlled bidirectional EDFA in WDM networks" Conference on Lasers and Electro-Optics, 1999. CLEO/Pacific Rim '99 Seoul. 1999 Volume 3 on page(s): 650 - 651

[79] J.M.Oh et al, "Enhance System Performance of an RSOA based hybrid WDM/TDM-PON System using a Remotely Pumped Erbium-Doped Fibre Amplifier", OFC 2007, PD

[80] F. Payoux et al, , "Demonstration of a RSOA-based wavelength remodulation scheme in 1.25Gbit/s bidirectional hybrid WDM-TDM PON", ECOC 2005

[81] J.Prat et al, "Optical Network Unit based on a Bidirectional Reflective Semiconductor Optical Amplifier for Fibre-To-The-Home Network ", Photonics Technology Letters, Jan 2005, IEEE.

[82] D.J. Shin et al, "Hybrid WDM/TDM-PON for 128 subscribers using λ-selection-free transmitters"OFC 2004, San Diego, CA

[83]"Etude des réseaux d'accès optiques utilisant le multiplexage en longueurs d'onde", Thèse de Franck PAYOUX, ENST Bretagne/Université de Rennes 1, présentée le 28 août 2006.

[84] U.H.Hong et al, Effects of Rayleigh backscatering in long reach RSOA-based WDM PON ", in Tech.Dig. OFC 2010, Paper OThG1

[85] Lee, H.H. ; Iannone, P.P. ; Richmann, K.C. Kim B.W. ; "A bidirectional SOA-Raman hybrid amplifier shared by 2.5 Gb/s, 60 km long-reach WDM-TDM PON", ECOC 2008, Septembre 2008, Brussels

[86] http://www.frost.com/prod/servlet/market-insight-top.pag?docid=184986442

[87] Prat, Josep ; Lazaro, Jose; Chanclou, Philippe; Cascelli, Sergio ; "Passive OADM network element for hybrid ring-tree WDM/TDM-PON"; ECOC '09. 20-24 Sept. 2009 , Vienna, Austria

[88] De Valicourt, G.; Make, D. ; Landreau, J. ; Lamponi, M.; Duan, G.H. ; Chanclou, P.; Brenot, R. ; "High Gain (30 dB) and High Saturation Power (11 dBm) RSOA Devices as Colorless ONU Sources in Long-Reach Hybrid WDM/TDM-PON Architecture"; Photonics Technology Letters, IEEE, Feb.1, 2010 ; Volume 22, Issue 3 ; On page(s) : 191 – 193

[89] Belfqih, Z. ; Chanclou, P. ; Saliou, F.; "Hybrid WDM-TDM Passive Optical Network in burst mode configuration with RSOA"; OFC/NFOEC 2008.; 24-28 Feb. 2008 ; San Diego, CA

[90] Miyazaki, N. Tanaka, K. Horiuchi, Y. ; "Hybrid TDM-WDM EPON Repeater"; OFC/NFOEC 2008; 24-28 Feb. 2008 ; San Diego, CA

[91] Genay, N. ; Chanclou, P.; Saliou, F. ; Liu, Q. ; Soret, T.; Guillo, L.; "Solutions for Budget Increase for the Next Generation Optical Access Network"; ICTON 2007. 1-5 July 2007 ; Volume 1 ; on page(s): 317 – 320 ; Rome

[92] Schrenk, B. ; Chatzi, S. ; Bonada, F. ; Lazaro, J.A. ; Klonidis, D. ; Tomkos, I. ; Prat, J. ; "C+L band remote node for amplification in extended reach full-duplex 10Gb/s WDM/TDM Passive Optical Networks" ; ECOC 2009 ; 20-24 Sept. 2009, Vienna

[93] Saliou, F. ; Chanclou, P. ; Laurent, F. ; Genay, N. ; Lazaro, J.A. ; Bonada, F. ; Prat, J. ; "Reach Extension Strategies for Passive Optical Networks [Invited] " ; Journal of Optical Communications and Networking, IEEE/OSA , September 2009 ; Volume 1 , Issue 4 ; on page(s) : C51 - C60

[94] Tang, J ; Giddings, R ; Hugues-Salas, E ; Jin, X; "Experimental Demonstration of Real-Time Optical OFDM Transmission at 7.5Gb/s over 25km SSMF Using a 1GHz RSOA"; Photonics Technology Letters, IEEE ; Date Of Publication : 2010-03-18; Volume : PP , Issue:99

[95] Duong, T. Genay, N. Chanclou, P. Charbonnier, B. Pizzinat, A. Brenot, R. ; "Experimental demonstration of 10 Gbit/s upstream transmission by remote modulation of 1 GHz RSOA using Adaptively Modulated Optical OFDM for WDM-PON single fiber architecture"; ECOC 2008, 21-25 Sept. 2008 , Brussels

[96] Duong, T.N. Genay, N. Chanclou, P. Charbonnier, B. Le Masson, J. Ouzzif, M.; "Maximizing the transmission performance of DMT signal for next generation PON system by direct modulation of cost-effective and low bandwidth lasers" ; OFC 2009; 22-26 March 2009, San Diego, CA

[97] Duong, T.N. ; " Etude de techniques de modulation multiporteuse OFDM pour la montée en débit dans le réseau d'accès optique" ; Thèse de doctorat présentée le 21 Mai 2010, ENSSAT.

[98] Chanclou, P. ; Belfqih, Z. ; Charbonnier, B. ; Duong, T. ; Frank, F. ; Genay, N. ; Huchard, M. ; Guignard, P. ; Guillo, L. ; Landousies, B. ; Pizzinat, A. ; Ramanitra, H. ; Saliou, F. ; "Optical access evolutions and their impact on the metropolitan and home networks"; ECOC 2008 ; 21-25 Sept. 2008 ; Brussels

[99] http://fr.wikipedia.org/wiki/Handover

[100] Sun Kun; Wang Ping; Li Yingze; "Path loss models for suburban scenario at 2.3GHz, 2.6GHz and 3.5GHz"; ISAPE 2008. 8th International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory, Publication Year: 2008 , Page(s): 438 – 441

[101] http://www.fcc.gov/pshs/techtopics/techtopics17.html

[102] F.Frank et al, "bidirectional Multi-UMTS FDD Carrier Distribution over an Extended Reach PON Architecture using a shared SOA", ECOC 2009, 20-24 Septembre, 2009, Vienna, Austria

[103] 3GPP, "TD 25.141 – Base Station (BS) Conformance Testing (FDD)", 3GPP, may 2008

[104] Florian FRANK, Benoit CHARBONNIER, Catherine ALGANI ; "3GPP Compliant Downlink ACLR Performances Of PON Distributed Multiple UMTS FDD Carriers", ANIC 2010, June 2010, Munich

[105] http://www.adc.com/us/en/productsandservices/wireless/products/outdoor/prism.jsp

[106] 3GPP TS25.104 Version 3.21.0 Release 1999: "Base Station radio transmission and reception (FDD)"

[107] 3GPP TS25.133 Version 3.21.0 Release 1999: "Requirements for support of radio resource management (FDD)"

Résumé

Dans le but d'optimiser le déploiement du réseau fibré, cette thèse a pour objectif d'étudier les solutions d'extension de portée du réseau d'accès optique.

Le premier chapitre décrit le contexte du réseau d'accès dans lequel s'inscrit cette thématique. Le fonctionnement des systèmes GPON (Gigabit Passive Optical Network) déployés aujourd'hui pour amener la fibre jusqu'à la maison (FTTH : Fibre To The Home) est détaillé ainsi que les nouvelles générations de PON (NGPON : Next Generation PON). Ces dernières promettent de nouvelles architectures à plus ou moins long terme (NGPON1 et NGPON 2), dont l'objectif commun est la montée en débit. Le principe d'extension de portée est également introduit par la description des travaux de normalisation pour lesquels l'insertion d'Extender Box est proposée pour le réseau d'accès optique.

Le deuxième chapitre présente différentes solutions d'extension du budget optique de systèmes GPON. Les résultats d'évaluation technique d'Extender Box, à base d'amplification optique ou de régénération Optique-Electrique-Optique, sont présentés suivant plusieurs configurations. De plus, des études technico-économiques et énergétiques sur la réduction du nombre de centraux optiques montrent l'importance de la mutualisation des fibres inter-centraux. Dans ce contexte, des Extender Box intégrant des fonctions de multiplexage en longueur d'onde ou de duplication de port PON sont proposées.

Enfin, le troisième chapitre traite de l'extension de portée de systèmes NGPON. L'amplification optique est mise en place sur des systèmes de future génération et dont la normalisation est en cours : 10GPON, WDM PON, et OFDM PON. Le comportement de SOA et d'EDFA est étudié sur des plateformes de laboratoire reproduisant ces systèmes.

Abstract

In order to optimize the fiber network deployment, this thesis has the objective to study solutions to extend the reach of the access optical network.

The first Chapter describes the optical access network context: from GPON (Gigabit Passive Optical Network) systems deployed today for FTTH (Fiber To The Home), to the Next Generation PON (NGPON) which is mainly driven by a rising bit rate as a mid or long term issue. Reach extension is also introduced in this chapter with the description of standardization works proposing the insertion of Extender Boxes in the optical access network.

The second Chapter presents several solutions to extend the optical budget of a GPON system. Technical evaluations of Extender Boxes based on optical amplification or optoelectronic regeneration are made trough several configurations. Further studies regarding the economical aspect and expenditure of energy lead to other options for Extender Boxes such as wavelength multiplexing function and PON port duplicator.

Finally, the third chapter deals with reach extension of NGPON systems. Optical amplification is evaluated over 10GPON, WDM PON and OFDM PON: SOA or EDFA are inserted on test platforms reproducing each type of networks.