

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Télécommunications

Spécialité : Télécommunications

Par : **CHENIKA Abdelfettah**

Sujet

**ÉTUDE ET CONCEPTION DE NOUVEAUX
FORMATS DE MODULATIONS DEDIES AUX
RÉSEAUX D'ACCÈS OPTIQUES HAUT DÉBIT.**

Soutenue publiquement, le 14/04/ 2016 , devant le jury composé de :

Mr S. KAMECHE

Mr A. TEMMAR

Mr O. SEDDIKI

Mr A. BELGHORAF

Mr A. BOUDGHENE STAMBOULI

Mr A. R. BORSALI

MCA

Professeur

Professeur

Professeur

Professeur

MCA

Univ. Tlemcen

INTTIC (Oran)

Univ. Tlemcen

USTO (Oran)

USTO (Oran)

Univ. Tlemcen

Président

Directeur de thèse

Co- Directeur de thèse

Examineur 1

Examineur 2

Examineur 3

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier « **ALLAH** » d'avoir donné la force et le courage de parvenir à élaborer ce travail.

Je voudrais exprimer mes sincères gratitudee à mes directeurs de recherche, le Professeur **TEMMAR Abdelkader** et le Professeur **SEDDIKI Omar**, pour leurs conseils, appuis et encouragements durant la préparation de ce travail de recherche.

Mes plus vifs remerciements s'adressent aux membres du jury, qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer cette thèse. Leurs commentaires et suggestions sont très importants pour le développement de ce travail de recherche.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du laboratoire de recherche appliquée en TIC (LaRATIC) de l'INTTIC d'Oran. J'adresse mes remerciements à tous mes collègues en particuliers **OUALD SAADI Houcine** et **NIAR Saad-eddine** pour leurs conseils perspicaces, et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Je suis également endetté à tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu et m'ont donné leurs amours constants tout le temps, ils ont su m'aider et me soutenir durant toute ma vie.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	1
TABLE DES MATIÈRES.....	2
LISTE DES FIGURES	5
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	8
CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux d'accès optiques.....	11
I.1 Introduction	11
I.2 L'état de l'art du réseau d'accès	12
I.2.1 Techniques d'accès sans fil	12
I.2.2 Techniques d'accès filaire	14
I.2.2.1 Les technologies xDSL (Accès cuivre)	14
I.2.2.2 La technologie FTTx (Accès optique)	15
I.3 La terminologie du réseau d'accès optique	17
I.4 Différentes architectures du FTTx	17
I.4.1 Architecture point-à-point (P2P).....	17
I.4.2 Architecture point-à-Multipoint Active(AON).....	18
I.4.3 Architecture point-à-Multipoint Passive (PON)	19
I.5 Dimensionnements comparés entre PON et P2P.....	20
I.6 Les topologies FTTx	21
I.6.1 Topologie en Arbre (splitter1:N)	21
I.6.2 Topologie en bus.....	21
I.6.3 Topologie en anneau	22
I.7 Le réseau d'accès PON.....	22
I.7.1 Principe de fonctionnement du PON	23
I.7.1.1 La voie descendante.....	23
I.7.1.2 La voie montante.....	24
I.7.2 Les différents types de TDM PONs	24
I.7.2.1 APON (ATM PON)	25
I.7.2.2 BPON (Broadband PON)	25
I.7.2.3 GPON (Gigabit PON).....	26
I.7.2.4 EPON (Ethernet PON)	27
I.8 Les classes des G-PONs	28
I.9 Comparatif des différentes technologies	29
I.10 Le PON la technologie verte.....	30
I.11 Conclusion.....	32
CHAPITRE II : Les réseaux d'accès optiques de nouvelles générations WDM PON	33
II.1 Introduction	33
II.2 Les NGPON TDM (Next Generation PON TDM)	33
II.2.1 Le 10GPON (10GigaPON)	33
II.2.2 10GEPON (10Gigabit EPON)	33
II.2.3 OCDMA-PON	34
II.3 Les limites du PON TDM à 10 Gb/s.....	35
II.4 Le multiplexage en longueur d'onde (PON WDM)	36
II.4.1 Principe du PON WDM.....	36
II.4.2 Intérêt du WDM dans les réseaux d'accès	38
II.4.3 Types de WDM PON.....	39
II.4.3.1 PON WDM avec diffusion puis sélection.....	39

II.4.3.2	PON WDM avec démultiplexage spatial.....	40
II.4.4	Description de l'AWG.....	42
II.5	L'architecture hybride ou WDM-TDM PON.....	42
II.6	Mise en œuvre du WDM PON.....	44
II.6.1	ONUs achromatiques.....	44
II.6.2	Les intérêts des ONUs achromatiques	45
II.6.3	Émetteur pour ONU achromatique	46
II.6.4	Composants à émission directe	46
II.6.4.1	Laser accordable	46
II.6.4.2	Les sources large bande et le découpage spectral.....	51
II.6.5	Émission à base de modulateurs réflectifs (Modulation déportée).....	54
II.6.5.1	Laser Fabry-Perot verrouillé par injection optique (IL-FP).....	55
II.6.5.2	Amplificateur optique à semi-conducteur en réflexion (RSOA).....	56
II.6.5.3	Modulateur électro-absorbant en réflexion R-EAM (R-EAM-SOA)	57
II.7	Principales architectures de mise en œuvre du réseau WDM PON.....	58
II.7.1	Architecture à base de découpage spectral (spectrum slicing).....	58
II.7.2	Architecture à base de modulation déportée avec IL-FP	59
II.7.3	Architecture à base de RSOA.....	60
II.7.4	Architectures avec re-modulation du signal descendant.....	60
II.7.4.1	Modulation de phase sur le signal descendant	61
II.7.4.2	Porteuse RF sur le signal descendant	62
II.7.4.3	Remodulation avec deux niveaux de taux d'extinction.....	63
II.7.4.4	Effacement du signal descendant.....	64
II.7.4.5	Autres techniques utilisées.....	64
II.8	Avantages et limites de l'architecture WDM-PON bidirectionnelle	65
II.8.1	Avantages	65
II.8.2	Inconvénients	65
II.8.3	Bruit des effets non linéaires	66
II.8.4	Rétrodiffusion de Rayleigh	66
II.8.5	Influence sur le taux d'erreur binaire	67
II.9	Conclusion.....	69
CHAPITRE III : Formats de modulations utilisés dans le réseau WDM PON		70
III.1	Introduction	70
III.1.1	Définition	70
III.1.2	Principe de la modulation optique	70
III.1.3	Intérêt du choix du format de modulation	71
III.2	Modes de modulation optiques	71
III.2.1	Modulation directe	72
III.2.2	Modulation externe	73
III.3	Modulateurs à commande électrique	73
III.3.1	Modulateurs à électro-absorption (EAM)	73
III.3.2	Modulateur Mach-Zehnder (MZM)	75
III.4	Codages en intensité (OOK).....	76
III.4.1	Le format NRZ (Non Return-to-Zero)	76
III.4.2	Le format RZ (Return-to-Zero)	78
III.4.3	Le format CS-RZ (Carrier Suppressed Return-to-Zero).....	79
III.4.4	Autres formats OOK	81
III.4.5	Modulation d'amplitude Multi-niveaux (M-ary ASK)	81
III.5	Les modulations de phase optique	82
III.5.1	Modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying).....	82
III.5.1.1	Principe de génération.....	82
III.5.1.2	Démodulation et détection différentielle.....	83
III.5.2	Modulation DQPSK (Differential Quaternary PSK).....	85

III.5.2.1	Principe	85
III.5.2.2	Méthodes de génération.....	87
III.5.2.3	Détection différentielle de la DQPSK	90
III.6	La modulation OFDM optique (O-OFDM).....	91
III.6.1	Introduction.....	91
III.6.2	Principe de fonctionnement de l'OFDM	92
III.6.2.1	Principe de fonctionnement de la modulation multi-porteuses	92
III.6.2.2	Orthogonalité du signal multi porteuses OFDM.....	92
III.6.2.3	Modulation et démodulation.....	93
III.6.2.4	Implantation numérique du modulateur.....	94
III.6.2.5	Implantation numérique du démodulateur	95
III.6.2.6	Avantages et inconvénients de l'OFDM.....	96
III.6.2.7	L'intervalle de garde	96
III.6.2.8	Estimation de canal pour les systèmes OFDM	97
III.6.3	Un système de transmission optique OFDM	99
III.6.4	Techniques de génération de signal OFDM optique.....	99
III.6.4.1	Conversion optique à détection directe.....	100
III.6.4.2	Conversion optique à détection cohérente (CO-OFDM)	101
III.6.5	Méthodes et techniques de détection OOFDM.....	101
III.6.5.1	DD-OOFDM récepteur	102
III.6.5.2	CO-OFDM récepteur.....	102
III.7	Conclusion.....	103
CHAPITRE IV : Simulations et résultats des architectures proposées		104
IV.1	Introduction	104
IV.2	Description du système WDM PON étudié	104
IV.3	Simulations réalisées et résultats.....	106
IV.3.1	WDM PON basé sur la modulation NRZ-ASK/ASK.....	106
IV.3.1.2	Système avec filtrage au niveau de l'ONU.....	109
IV.3.1.3	Système avec deux polarisations différentes.....	112
IV.3.2	WDM PON basé sur la modulation NRZ-DQPSK/ASK.....	115
IV.3.2.1	Architecture du réseau	115
IV.3.2.2	Résultats des simulations.....	116
IV.3.3	WDM PON basé sur la modulation OOFDM/ASK.....	119
IV.3.3.1	Architecture du réseau	119
IV.3.3.2	Les paramètres de simulation	120
IV.3.3.3	Résultats des simulations.....	122
IV.4	Comparaison et discussion des résultats.....	125
IV.4.1	Comparaison des résultats des différentes simulations.....	125
IV.4.2	Comparaison aux autres travaux	126
IV.5	Conclusion.....	127
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		129
BIBLIOGRAPHIE		131
GLOSSAIRE		140
ANNEXE DES TRAVAUX.....		143

Listes des figures

Chapitre I

Figure I.1:	Architecture des réseaux de télécommunications.....	12
Figure I.2:	Catégories de réseaux sans fil.....	12
Figure I.3:	Influence de la longueur de la liaison sur le débit	15
Figure I.4:	Les différents scénarios de la fibre optique dans le réseau d'accès.....	16
Figure I.5:	Architecture point à point (P2P)	18
Figure I.6:	Architecture en double étoile active (AON).....	19
Figure I.7:	Architecture Point-to-Multipoint (PON)	20
Figure I.8:	Topologie en arbre.....	21
Figure I.9:	Topologie en bus.....	22
Figure I.10:	Topologie en anneau.....	22
Figure I.11:	Transmission sur un PON.....	23
Figure I.12:	Trafic descendant dans un PON TDM.....	24
Figure I.13:	Trafic montant dans un PON TDM.	24
Figure I.14:	Architecture et concept de base d'un BPON.	26
Figure I.15:	Architecture et concept de base d'un GPON.	27
Figure I.16:	Architecture et concept de base d'un EPON.	28
Figure I.17:	Architecture d'un système PON de classe B+.....	29

Chapitre II

Figure II.1:	Architecture d'un PON WDM.....	36
Figure II.2:	Comparaison entre la CWDM et le DWDM.....	37
Figure II.3:	Un PON WDM utilisant le principe de « broadcast and select ».....	39
Figure II.4:	Un PON WDM utilisant un démultiplexeur en longueur d'ondes.....	41
Figure II.5:	Schéma d'un AWG.	42
Figure II.6:	Architecture hybrid WDM/TDM-PON.	43
Figure II.7:	un WDM PON utilise des ONU achromatiques.	45
Figure II.8:	Réarrangement des longueurs d'onde en cas de panne.	46
Figure II.9 :	Structure d'un laser DFB.	47
Figure II.10:	Laser DFB accordable par l'ajustement de la température.....	48
Figure II.11:	Cavité typique d'un laser SSG-DBR	48
Figure II.12:	Laser à cavité externe (EDL).....	49
Figure II.13 :	ECL compatible avec un débit de 2,5 Gbit/s.....	50
Figure II.14:	Structure du laser VECSEL.....	50
Figure II.15:	SLED offrant une plage spectrale large entre 1260 nm et 1640 nm.	51
Figure II.16:	Cavité laser FP.....	52
Figure II.17:	Modes longitudinaux dans un laser FP.....	53
Figure II.18:	Principe « Spectrum Slicing » d'une source large bande.....	54
Figure II.19:	WDM PON utilise le principe de modulation déportée.....	55
Figure II.20:	Principe de fonctionnement d'un laser IL-FP	56
Figure II.21:	Principe de fonctionnement d'un RSOA.....	56
Figure II.22:	Principe de fonctionnement d'un R-EAM-SOA.....	58
Figure II.23:	WDM PON utilise le découpage spectral optique.....	59
Figure II.24:	Architecture d'un WDM PON à base d'IL-FP.	60
Figure II.25:	WDM PON basé sur des RSOA à l'ONU.....	60
Figure II.26:	WDM PON bidirectionnel basé sur le principe de re-modulation à l'ONU.	61
Figure II.27:	ONU avec démodulation en phase et remodulation en OOK.....	61
Figure II.28:	Impact du signal descendant modulé en phase sur le signal montant.....	62
Figure II.29:	Montage expérimental de l'architecture avec le signal descendant sur une porteuse RF sur une longueur d'onde qui est remodulée ensuite en OOK.....	63
Figure II.30:	Architecture avec deux niveaux de taux d'extinction.....	63
Figure II.31:	Principe de la réécriture de données sur une longueur d'onde.....	64

Figure II.32:	Effets limitants dans une liaison bidirectionnelle.....	66
Figure II.33:	Principe de la rétrodiffusion de Rayleigh.....	67
Figure II.34:	Pénalité théorique de la transmission en dB.....	68

Chapitre III

Figure III.1:	Synoptique d'un module d'émission avec (a) une modulation directe et (b) une modulation externe.....	72
Figure III.2:	Schéma d'un émetteur optique à base.....	73
Figure III.3:	Courbe de commutation d'un modulateur à électro-absorption.....	74
Figure III.4:	Schéma simplifié d'un modulateur Mach-Zehnder.....	75
Figure III.5:	La fonction de transfert en intensité et en phase du Mach-Zehnder.....	76
Figure III.6:	Diagramme d'un transmetteur NRZ.....	77
Figure III.7:	Trace temporelle, diagramme de l'œil et spectre du format NRZ.....	78
Figure III.8:	Diagramme d'un transmetteur RZ.....	78
Figure III.9:	Trace temporelle, diagramme de l'œil et spectre du format RZ- 50%.....	79
Figure III.10:	Diagramme d'un transmetteur CS-RZ.....	80
Figure III.11:	Trace temporelle, diagramme de l'œil et spectre du format CS-RZ.....	80
Figure III.12:	Récapitulation des plages d'évolution des différents signaux à appliquer à un MZM.....	81
Figure III.13:	Émetteur DPSK et une trace d'une modulation DPSK.....	83
Figure III.14:	Trace temporelle, diagramme de l'œil et spectre du format DPSK.....	83
Figure III.15:	Schéma d'un détecteur différentiel pour DPSK.....	84
Figure III.16:	Constellations d'un signal NRZ-OOK et NRZ-DPSK.....	85
Figure III.17:	Présentation spectrale des signaux NRZ et DQPSK pour un débit de 10 Gb/s.....	86
Figure III.18:	La constellation de la modulation DQPSK.....	86
Figure III.19:	Schéma bloc du précodeur DQPSK.....	87
Figure III.20:	Génération de la DQPSK par deux modulateurs MZM en série, et constellations correspondantes du signal optique modulé.....	88
Figure III.21:	Génération de la DQPSK par deux modulateurs MZM en parallèle, et constellations correspondantes du signal optique modulé.....	88
Figure III.22:	(a) La variation temporelle d'amplitude d'un signal optique DQPSK, (b) La variation temporelle de la phase du signal optique NRZ-QPSK.....	90
Figure III.23:	Récepteur DQPSK.....	90
Figure III.24:	Modulation multi porteuses, principe de génération (a),.....	92
Figure III.25:	Superposition des spectres de N porteuses orthogonales.....	93
Figure III.26:	Spectre du signal OFDM.....	94
Figure III.27:	Schéma de principe du démodulateur.....	94
Figure III.28:	Schéma du modulateur OFDM numérique.....	95
Figure III.29:	Schéma du démodulateur OFDM numérique.....	95
Figure III.30:	Illustration de l'intervalle de garde.....	97
Figure III.31:	Pilote de type peigne.....	98
Figure III.32:	Pilote de type bloc.....	98
Figure III.33:	Blocs fonctionnels d'un système OFDM optique.....	99
Figure III.34:	Émetteurs DD-OOFDM, en utilisant la symétrie hermitienne.....	100
Figure III.35:	Émetteurs DD-OOFDM, en utilisant la fréquence intermédiaire.....	101
Figure III.36:	L'architecture du système CO-OFDM.....	101
Figure III.37:	La structure de DD-OOFDM récepteur.....	102
Figure III.38:	La structure de CO-OFDM récepteur.....	102

Chapitre IV

Figure IV.1:	Architecture générale du système WDM-PON simulé.....	105
Figure IV.2:	L'architecture de l'OLT (a) et l'ONU (b) du système NRZ-ASK. Système à remodulation avec deux niveaux de taux d'extinction.....	107
Figure IV.3:	Variation temporelle de la puissance optique;.....	108
Figure IV.4:	Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système.....	109

Figure IV.5:	Architecture de l'ONU utilise le principe de filtrage optique.	110
Figure IV.6:	Variation temporelle de la puissance optique du la porteuse descendante, (a) avant le filtrage, (b) après le filtrage.	111
Figure IV.7:	Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système NRZ-ASK/ASK avec filtrage dans l'ONU.	112
Figure IV.8:	Architecture de l'ONU utilise la conversion de polarisation.	113
Figure IV.9:	État de polarisation de la porteuse optique, (a) Signal descendant, (b) signal montant.	114
Figure IV.10:	Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système NRZ-ASK/ASK avec inversion de polarisation.	114
Figure IV.11:	Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système NRZ-ASK/ASK à 4 ONUs.	115
Figure IV.12:	Architecture de l'OLT (a) et l'ONU (b) du système NRZ-DQPSK.	116
Figure IV.13:	Allure des signaux transmis par l'OLT (a) et l'ONU (b) dans le système DQPSK/ASK.	117
Figure IV.14:	Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système DQPSK/ASK.	118
Figure IV.15:	Architecture du l'OLT pour le système WDM PON OOFDM/ASK.	119
Figure IV.16:	Architecture du l'ONU pour le système WDM PON OOFDM/ASK.	119
Figure IV.17:	Signal électrique transmis par le modulateur OFDM (4-QAM), Spectre électrique (a), Constellation d'émissions (b).	121
Figure IV.18:	Allure des signaux transmis par l'OLT du CH1 du système OFDM/ASK, Spectre optique (a), Variation temporelle (b).	122
Figure IV.19:	Variation de BER en fonction de l'OSNR pour système OOFDM.	123
Figure IV.20:	Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le WDM-PON OOFDM (4-QAM) à 4 ONUs.	124
Figure IV.21:	Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le WDM-PON OOFDM (16-QAM) à 4 ONUs.	124

Liste des Tableaux

Tableau I.1:	Les différentes normes du réseau sans fil.	13
Tableau I.2:	Synthèse des technologies xDSL.	15
Tableau I.3:	Classification du G-PON selon le Budget.	28
Tableau I.4:	Spécifications des émetteurs et récepteurs à l'OLT et à l'ONT selon les classes.	29
Tableau I.5:	Récapitulatif des performances des PON normalisés.	30
Tableau I.6:	Comparaison entre le GPON et d'autres types de réseaux d'accès haut débit.	31
Tableau II.1:	Différences entre CDWM vs DWDM.	38
Tableau II.2:	Pertes de coupleur en fonction du nombre de ports.	40
Tableau III.1:	Table de vérité du précodage DPSK.	82
Tableau III.2:	Correspondance entre les symboles transmis et leurs phases.	87
Tableau III.3:	Affectation des symboles reçus pour différentes valeurs de phase détectées.	91
Tableau IV.1:	Les paramètres de simulation de système OFDM/ASK.	120
Tableau IV.2:	Résumé des résultats trouvés.	125
Tableau IV.3:	Les progrès des réseaux PON dans la littérature.	127

Introduction générale

La croissance des services de télécommunications est une des clés majeures pour le développement socio-économique. Les services peuvent être destinés aux usages personnels et résidentiels comme l'internet à très haut-débit, la visiophonie, la vidéo à haute définition HDTV (High-Definition Television), les échanges de fichiers... ou aux usages professionnels comme le télétravail, l'enseignement à distance (e-Education), la télé-administration, la télémédecine (e-Health),... Afin d'assurer la croissance très rapide des services, le débit de transmission des réseaux de télécommunications doit aussi évoluer à la même vitesse, y compris dans les derniers kilomètres reliant les utilisateurs, que nous appelons le réseau d'accès.

L'introduction de la fibre optique dans les réseaux d'accès constitue une avancée majeure pour répondre à la demande de bande passante des utilisateurs, due à la croissance des services, les opérateurs de télécommunications ont commencé dans le monde entier à déployer la fibre optique dans le réseau d'accès. En effet, l'optique peut apporter un débit bien plus élevé par rapport à la paire de cuivres. Cette technologie d'accès optique est connue sous le nom FTTX (Fiber-To-The-X où X indique l'endroit pour lequel la fibre s'arrête). En Juin 2009, on comptait plus de 36 millions d'utilisateurs dans le monde entier, servis par la fibre, dont plus de 30 millions habitent à des pays d'Asie de l'Est notamment le Japon et la Corée du Sud.

La plupart des systèmes d'accès optique déployés aujourd'hui sont basés sur les technologies PON (Passive Optical Network). Les réseaux d'accès optiques passifs permettent actuellement de fournir un débit de 100 Mbps par utilisateur et de recevoir plusieurs services simultanément [1]. Ils mettent en œuvre une longueur d'onde pour la voie descendante et une longueur d'onde pour la voie remontante. La technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) apparaît progressivement dans les réseaux d'accès optiques et semble être la technique adoptée à moyen terme même si d'autres techniques comme l'OCDMA pourraient voir le jour à plus long terme [2]. L'association des deux technologies, WDM et PON semble donc inévitable pour accompagner l'augmentation du débit chez l'abonné [3]. La forte capacité de montée en débit du WDM-PON est expliquée grâce au fait que la communication avec chaque utilisateur est dédiée à une longueur d'onde. Pour cette raison, la technologie WDM-PON apparaît actuellement comme un des candidats les plus potentiels pour la future génération PON.

Néanmoins, une des contraintes majeures pour implémenter cette technologie WDM-PON dans le réseau d'accès optique est liée notamment au problème de la grande complexité et de coût élevé des émetteurs-récepteurs WDM. Donc, une réduction de

coût et de complexité est nécessaire afin d'adapter la technologie WDM au contexte du réseau d'accès. En effet, afin de rendre le fonctionnement du réseau d'accès WDM faisable et flexible, des émetteurs achromatiques sont requis. C'est-à-dire que les émetteurs WDM installés chez les utilisateurs doivent être identiques quelque soit la longueur d'onde d'émission utilisée. En plus, ces longueurs d'onde doivent être contrôlables et reconfigurables à partir du central optique de l'opérateur. Plusieurs méthodes sont citées dans la littérature à pour objectif de maintenir cette notion d'achromatique, parmi eux, on cite la méthode de re-modulation des données montantes sur la porteuse descendante, cette technique permet d'éviter d'utiliser une nouvelle source optique (LASER) au niveau du client, ce qui permet de réduire le cout et la complexité d'équipement [4].

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons d'étudier l'évolution de l'architecture PON WDM en termes de bande passante en considérant l'introduction de nouveaux formats de modulation et composants photoniques. Une structure WDM-PON mettant en œuvre un schéma de re-modulation orthogonale FSK/ASK a récemment été étudié [5]. Des résultats de simulation montrent que le système peut transmettre des débits importants dans les voies montante et descendante du réseau tout en couvrant un réseau de rayon de couverture de 20 kilomètres. Une autre communication propose une modulation QAM 16 mettant en œuvre un système radio sur fibre [6]. La simulation montre la possibilité de générer une onde radiofréquence de 30 GHz portant un signal QAM 16 à 5 Gb/s. Nous allons envisager ces formats de modulation ainsi que d'autres comme le format DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), et OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Le travail de la thèse consistera donc à proposer des systèmes de transmission pour l'accès fonctionnant avec divers formats de modulation permettant de proposer des débits par utilisateur élevés. Des simulations numériques seront effectuées sur ces divers schémas.

Les objectifs de ce travail de thèse peuvent se résumer aux points suivants:

- Proposer de nouvelles architectures de réseaux d'accès de type WDM PON fonctionnant à des débits de 40 Gb/s par utilisateur en sens descendant et de l'ordre de 10 Gb/s en sens montant sur des portés de 30 km.
- Évaluer la faisabilité de fonctionnement de ces architectures en proposant des solutions d'émetteurs ONU achromatiques à base de composants moins complexes afin de préserver l'aspect économique d'équipement du client.
- Analyser et étudier l'impact du bruit dû à la rétrodiffusion de Rayleigh, principal effet physique limitant la qualité de la transmission dans les systèmes WDM-PON bidirectionnels et ceci par l'utilisation de plusieurs formats de modulation.

Ce manuscrit est organisé en 4 chapitres :

Le chapitre 1 décrit tout d'abord le réseau d'accès de façon générale afin de se familiariser avec les termes et les technologies employés. Les architectures de réseaux d'accès optiques déployées sont présentées ainsi que les perspectives d'évolution. La technologie de multiplexage en longueur d'onde est ensuite décrite et l'intérêt de son utilisation dans le réseau d'accès optique est discuté.

Le chapitre 2 est donne un état de l'art détaillé des solutions technologiques qui sont étudiées par les acteurs du domaine pour utiliser le WDM dans le réseau d'accès optique. Les composants et architectures proposés sont soigneusement analysés afin d'en dégager les avantages et inconvénients.

Le chapitre 3 est consacré à la présentation des différents formats de modulations utilisés dans les systèmes optiques d'une manière générale, en détaillant l'aspect théorique et pratique pour l'utilisation de ces formats dans un tel système, ainsi que les avantages et inconvénients de chaque format.

Le chapitre 4 est une étude à la fois expérimentale et théorique des pénalités dues à la transmission bidirectionnelle sur une seule fibre. Nous présenterons les différents travaux de simulations réalisés ainsi que les résultats obtenus.

Une discussion sur les perspectives d'avenir des architectures de réseaux d'accès optiques utilisant le multiplexage en longueurs d'onde conclut ce manuscrit.

CHAPITRE I:

Généralités sur les réseaux d'accès optiques

I.1 Introduction :

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: le PON (Passive Optical Network).

La première partie présente les différentes technologies concurrentes utilisées dans le réseau d'accès. En deuxième temps, on cite la terminologie permet de mettre en place les nombreuses abréviations propres au réseau d'accès optique. L'architecture globale d'un tel réseau et son interfonctionnement avec le réseau de collecte sont décrits. L'évolution du PON est ensuite présentée, avec la description des différentes architectures mises en œuvre et envisagées par les organismes de normalisation.

I.2 L'état de l'art du réseau d'accès :

Afin de s'assurer la communication entre les abonnés, chaque utilisateur doit se connecter au réseau de télécommunication.

Le réseau d'accès est le réseau qui relie les utilisateurs finaux au réseau de transport de l'opérateur de télécommunication via le point d'accès que nous appelons le "central" pour le réseau d'accès de type filaire.

Le support de transmission du réseau d'accès peut être l'espace libre dans le cas du réseau d'accès radio, la paire de cuivre, la fibre optique ou le câble coaxial pour le réseau d'accès filaire.

Le réseau d'accès peut-être considéré comme le dernier tronçon en aval (côté d'utilisateur) dans la hiérarchie des réseaux de télécommunications comme l'illustre la figure I.1.

Dans la figure I.1, nous retrouvons en amont de cette hiérarchie le réseau de transport de l'opérateur qui est classé en deux catégories suivant le caractère géographique et la portée : le réseau cœur pour l'échelle nationale, internationale (quelques centaines jusqu'à des milliers de km), et le réseau de collecte pour l'échelle régionale et métropolitaine (quelques dizaines jusqu'à quelques centaines de km). Le support de transmission de ces réseaux est tout optique, notamment grâce aux liens WDM à très haut-débit (2,5 Gb/s à 40 Gb/s).

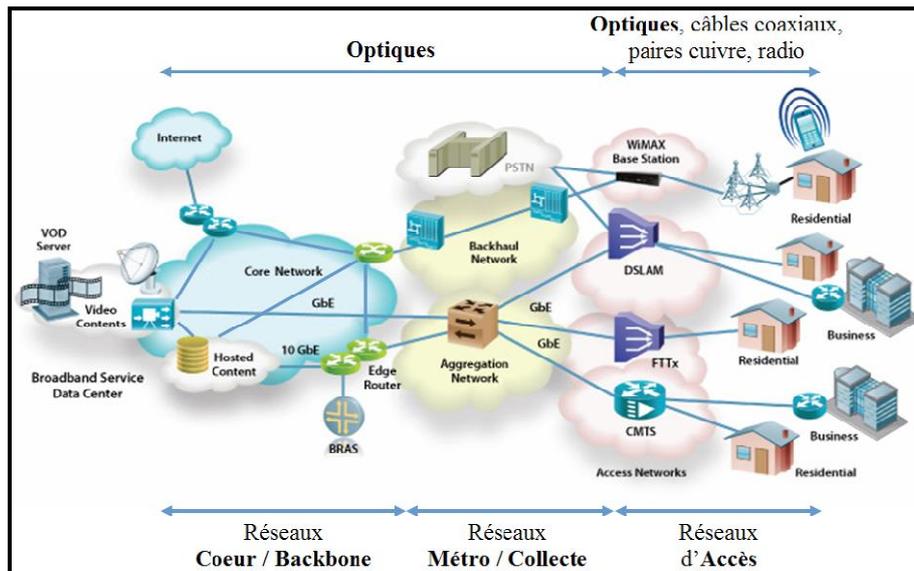


Figure I.1: Architecture des réseaux de télécommunications [7].

Comme cela est montré dans la figure I.1, il y a différents types de réseaux d'accès dépendant du support de transmission :

I.2.1 Techniques d'accès sans fil

Le réseau d'accès sans fil se répartit en quatre catégories illustrées sur la Figure I.2.

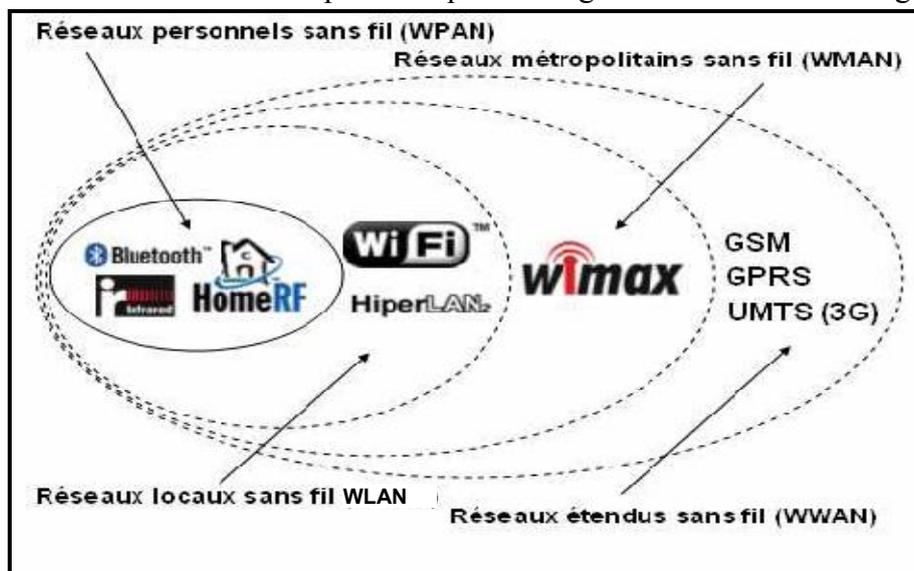


Figure I.2 : Catégories de réseaux sans fil [9].

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 54 Mb/s 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 I.1.

	Fréquence liaison hertzienne	Débit maximum	Distance maximum
802.11	2,45 MHz	2 Mb/s	100 mètres
802.11A	5 à 6 GHz	54 Mb/s maximum	Jusque 366 mètres à l'extérieur, 91 m à l'intérieur.
802.11B	2,4 GHz	11 Mb/s	100 mètres
802.11B+	2,4 GHz	22 Mb/s	100 mètres
802.11G	2,4 GHz	54 Mb/s	100 mètres
802.11G+	2,4 GHz	108 Mb/s	100 mètres

Tableau I.1: Les différentes normes du réseau sans fil [8].

- 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), GPRS (General Packet Radio Service), l'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), cette technologie permet un accès jusqu'à 2Mb/s. Son évolution, le 3G+ permet une vitesse de transfert théorique de 14,4 Mb/s d'une antenne vers un récepteur mobile et de 5,8 Mb/s dans l'autre sens. La portée est limitée à quelques kilomètres.

I.2.2 Techniques d'accès filaire

I.2.2.1 Les technologies xDSL (Accès cuivre)

En termes de débit de transmission, le réseau d'accès filaire basé sur la paire de cuivre du type xDSL peut supporter un débit maximum de 53 Mb/s en voie descendante (direction de transmission du central vers les abonnés) et de 2.3 Mb/s en voie montante (direction de transmission des abonnés vers le central) selon le standard le plus récent VDSL.

Les technologies xDSL sont divisées en deux familles, celles utilisant une transmission symétrique et celles utilisant une connexion asymétrique. Leurs principales caractéristiques des différentes technologies xDSL sont résumées dans le Tableau I.2.

La tendance des opérateurs est de délivrer au client le maximum de débit permis par la paire de cuivre. Ce débit est fortement lié à l'atténuation de la ligne, c'est-à-dire fonction de sa longueur et de sa qualité. Par exemple, le VDSL peut délivrer 50 Mbit/s et le VDSL2+ 100Mbit/s, les distances de transmission à ces débits sont très faibles. Pour avoir 100 Mbit/s par les paires de cuivre, il faudra être très proche du DSLAM (150 ou 500 mètres) ce qui est problématique pour raccorder l'ensemble des clients à ce débit. Seule une faible partie des clients sera donc éligible à ce débit. La 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 (Nœud de Raccordement d'Abonnés) et le client.

Abréviation	Définition	Mode	Downlink	Uplink	Distance maximum	Nombre de paires
HDSL	High data rate DSL	Symétrique	1.544 Mb/s 2.048 Mb/s	1.544 Mb/s 2.048 Mb/s	3,6 km	2 ou 3 suivant le débit souhaité
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), - 384 Kb/s to 4.6 Mb/s (deux paires)	- 192 Kb/s à 2,3 Mb/s (une paire), - 384 Kb/s to 4.6 Mb/s (deux paires)	5 km	1 ou 2 suivant le débit souhaité
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 Kb/s à 12 Mb/s			
ADSL 2+			128 Kb/s à 24 Mb/s	16 Kb/s à 1 Mb/s	5,4 Km	
RADSL			Rate Adap-	0.6-8 Mb/s	128 kb/s à	

	tive DSL			1Mb/s		
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 I.2 : Synthèse des technologies xDSL [10].

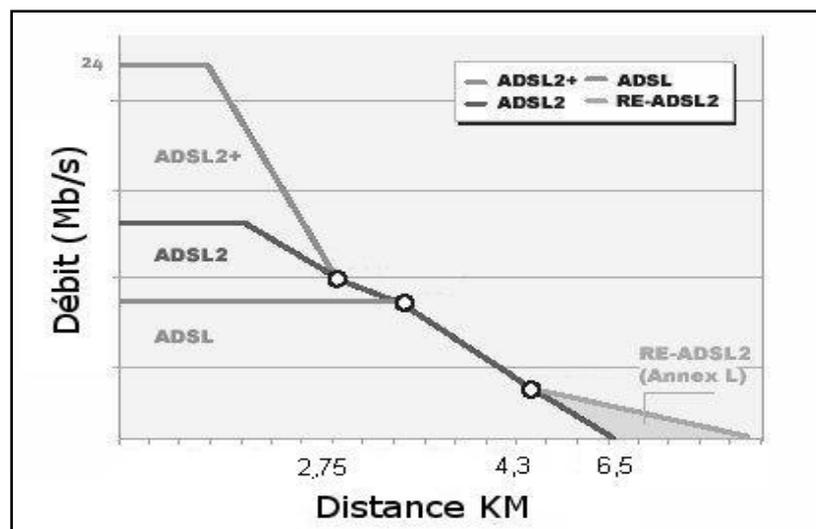


Figure I.3 : Influence de la longueur de la liaison sur le débit [10].

I.2.2.2 La technologie FTTx (Accès optique) :

Vers l'horizon 2015-2020, il est prévu qu'un débit de l'ordre de 100 Mb/s à 1 Gb/s par utilisateur sera nécessaire. L'augmentation en débit et en portée de transmission nécessite le déploiement d'un support qui répond à ces exigences, de ce fait, l'installation de la fibre optique dans tel réseau semble la seule solution jusqu'à présent. Ce type de réseau d'accès optique est connu dans le domaine technique sous le nom de FTTx.

Le déploiement des réseaux d'accès optique était très limité jusqu'en 2003. Il était cantonné à quelques liaisons point à point pour connecter des entreprises ayant besoin d'une bande passante importante.

Le premier véritable déploiement a eu lieu au Japon et son essor continue actuellement à très grande vitesse.

La Chine et la Corée du Sud connaissent également des déploiements importants de réseaux d'accès optiques. Les fortes densités de population font que la fibre est nécessaire jusqu'à l'immeuble pour pouvoir fournir du très haut débit.

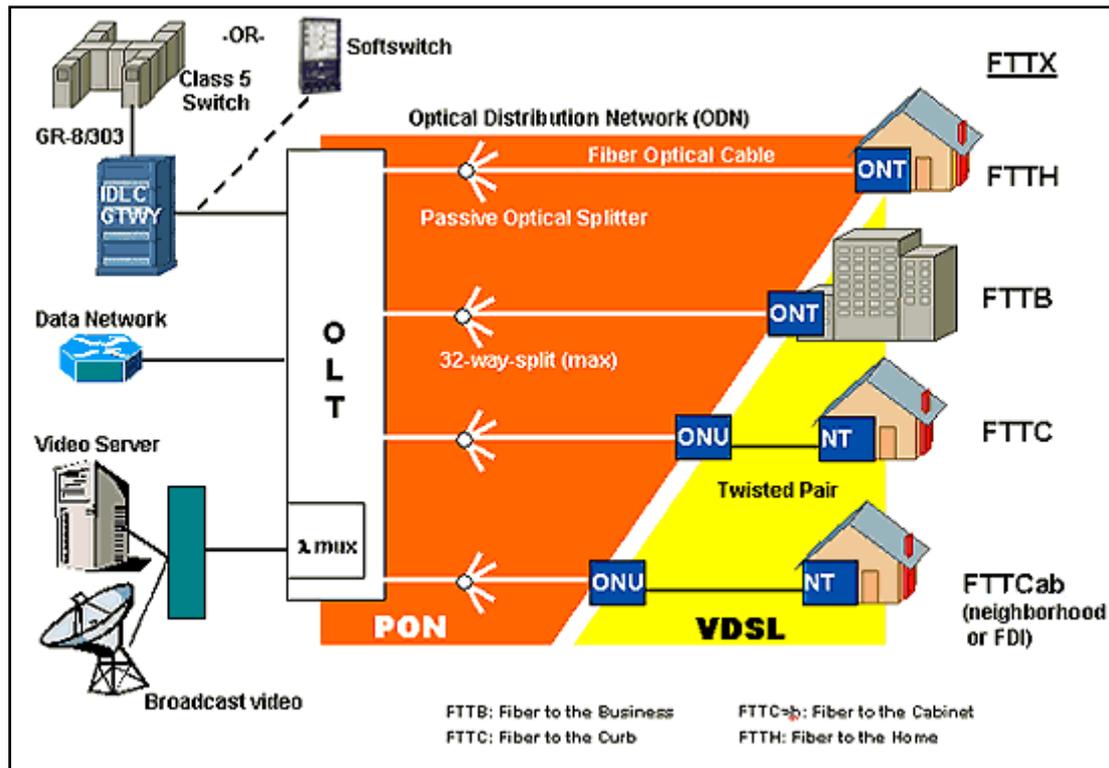


Figure I.4 : Les différents scénarios de la fibre optique dans le réseau d'accès [11].

La figure I.4 représente différents scénarios d'introduction de la fibre optique dans le réseau d'accès. Dépendant du point jusqu'auquel la fibre optique peut pénétrer, nous classifions en différentes catégories :

- **FTTH (Fiber To The Home ou « Fibre jusqu'au domicile »)** : l'abonné est directement raccordé par fibre optique, on fait parvenir la fibre jusqu'à la maison.
- **FTTB (Fiber To The Building ou « Fibre jusqu'à l'immeuble »)** : la connexion en fibre optique va du répartiteur jusqu'au pied des immeubles ; un équipement supplémentaire distribue les flux jusque dans les appartements des internautes,
- **FTTO (Fiber To The Office ou « Fibre jusqu'au bureau »)** : offre spécialement dédiée aux entreprises et aux administrations, on fait parvenir la fibre jusqu'au bureau.
- **FTTC (Fiber To The Curb ou « Fibre jusqu'au sous-répartiteur »)** : La fibre s'étend à une armoire extérieure à côté des maisons ou d'immeubles contenant des bureaux à une distance comprise entre **300 et 600 m** à partir des locaux du client. FTTC peut utiliser la technologie **VDSL** pour accéder aux clients.
- **FTTN (Fiber To The Neighborhood)** : Fibre s'étend à un point de raccordement (une armoire située dans une grande rue ou une unité de réseau optique (ONU)) et utilise la technologie ADSL2 ou ADSL2 + l'accès aux

clients. FTTN sert généralement environ 200 clients résidentiels ou de petites entreprises avec un rayon de 1 à 2,5 km.

I.3 La terminologie du réseau d'accès optique :

Dans la figure I.4, nous trouvons la terminologie usuellement utilisée pour le réseau d'accès optique que nous allons employer par la suite :

- **OLT (Optical Line Terminal)** : L'équipement réseau situé au central (CO : Central Office) qui gère les flux de trafic vers les abonnés ou provenant des abonnés. Il assure l'interfaçage avec les équipements du réseau de collecte. L'OLT est le point d'extrémité en amont du réseau d'accès.
- **RN (Remote Node)** : Point de répartition qui répartit le signal optique provenant de l'OLT vers plusieurs abonnés et combine les signaux optiques provenant des abonnés à destination de l'OLT.
- **ONT (Optical Network Termination)** : Le module optique chez les abonnés qui assure les fonctions d'émission/réception des signaux optiques vers l'OLT ou provenant de l'OLT et la conversion entre les interfaces optiques avec le réseau et les interfaces d'utilisateur. C'est le point d'extrémité en aval du réseau d'accès.
- **ONU (Optical Network Unit)** : c'est un équipement de type ONT, mais partagé entre plusieurs utilisateurs, et utilisé dans le cas où la fibre ne pénètre pas jusqu'au l'abonné (cas des FTTCab/Curb/Buildingcas). La transmission entre l'ONU et les abonnés est réalisée sur les paires de cuivre comme la technologie xDSL.
- **NT (Network Termination)** : Le module chez les abonnés dans le cas où la fibre ne pénètre que jusqu'à l'ONU.

La partie entre l'OLT et l'ONU est appelée ODN (pour Optical Distribution Network) ou réseau de distribution. Il s'agit de l'infrastructure passive du réseau. En effet les composants actifs sont situés aux deux extrémités, à l'ONU et à l'OLT.

I.4 Différentes architectures du FTTx:

Les deux architectures couramment utilisées pour le déploiement FTTH sont :

- L'architecture point à point P2P (Point-to-Point).
- L'architecture le point à multipoints P2MP (Point To Multipoint), est appelée communément PON (Passive Optical Network) ou AON (Active Optical Network).

Le choix de l'architecture active ou passive pour le déploiement dépend: du type de services devant être fourni, du coût de l'infrastructure, de l'infrastructure actuelle et des plans futurs de migration vers les nouvelles technologies.

I.4.1 Architecture point-à-point (P2P):

Dans cette configuration, la fibre optique est véritablement déployée de bout en bout depuis les locaux de l'opérateur OLT ou depuis le NRO (Nœud de Raccordement Optique) jusqu'au domicile de chacun des abonnés. Cette architecture est consommatrice

en fibre optique et elle est souvent réservée pour des zones à forte densité et pour des habitats de type « pavillon » ou « immeuble ».

C'est la technologie la plus intéressante en termes de débit pour l'abonné (pas de partage) et de sécurité de transfert (les données des différents utilisateurs sont séparées), mais la plus onéreuse en termes de coût de déploiement pour l'opérateur.

Les avantages :

- Solution universelle adaptée aux clients résidentiels et aux entreprises.
- Budget optique optimal puisque pas de composants optiques entre l'OLT et l'ONT.
- Les composants d'extrémité ne requièrent pas de grandes performances donc peuvent être bas coût.
- La sécurité des données est garantie puisqu'il n'y a pas de partage de fibre entre clients.
- La gestion du réseau est très simplifiée dans le cas où le nombre de clients est réduit.
- Bande passante illimitée.
- Une plus grande flexibilité de service.

Les inconvénients :

- Gestion compliquée des signaux en broadcaste.
- Pas de mutualisation de la fibre.
- Encombrement à l'intérieur du central dû au grand nombre de transmetteurs/récepteurs.
- Moins économique à cause de l'utilisation de plusieurs fibres.

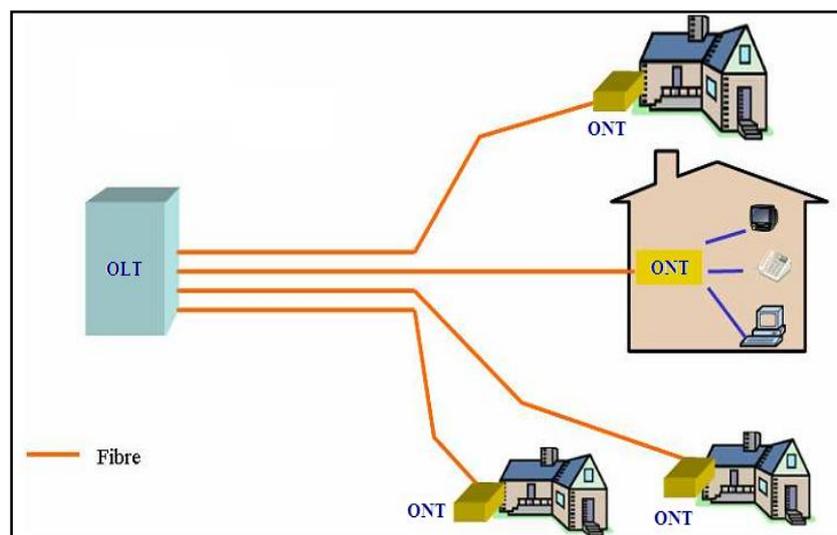


Figure I.5 : Architecture point à point (P2P) [12].

I.4.2 Architecture point-à-Multipoint Active(AON):

Ce type de réseau optique P2MP permettant de partager l'infrastructure entre plusieurs clients, dans cette architecture appelé AON (Active Optical Network), on utilise un

équipement « actif » installé à proximité d'une « grappe » d'utilisateurs d'un secteur géographique donné et regroupe ces utilisateurs, la terminaison finale peut être réalisée en fibre optique après avoir opéré une nouvelle conversion électro-optique du signal.

Les avantages :

- Infrastructure partiellement partagée (économie sur la fibre)
- Budget optique aisé (lié à la portée cuivre/optique)
- Migration aisée entre cuivre et optique

Les inconvénients :

- Partie active dans le réseau (nécessite une alimentation)
- Besoin d'une batterie de secours
- QoS pas encore approuvée.

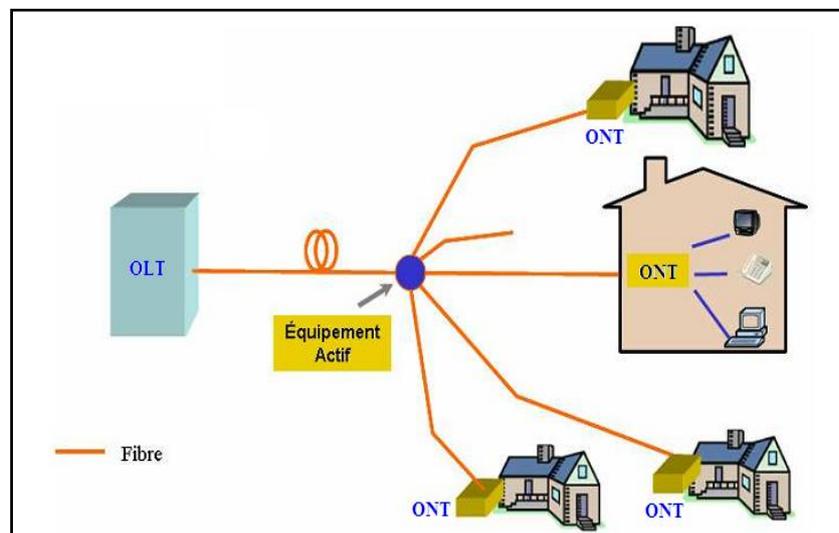


Figure I.6: Architecture en double étoile active (AON) [12].

I.4.3 Architecture point-à-Multipoint Passive (PON):

Le PON (Passive Optical Networks) représente la deuxième solution P2MP. Le concept d'employer un réseau optique passif (PON) qui est composé uniquement des éléments passifs, l'élément principal de cette architecture un coupleur optique passif qui divise la puissance optique entre les abonnés. Dans de tels réseaux, les utilisateurs partagent la même bande passante, ces systèmes recouvrent plusieurs normes qui se sont succédé au cours du temps, on y reviendra en détail par la suite.

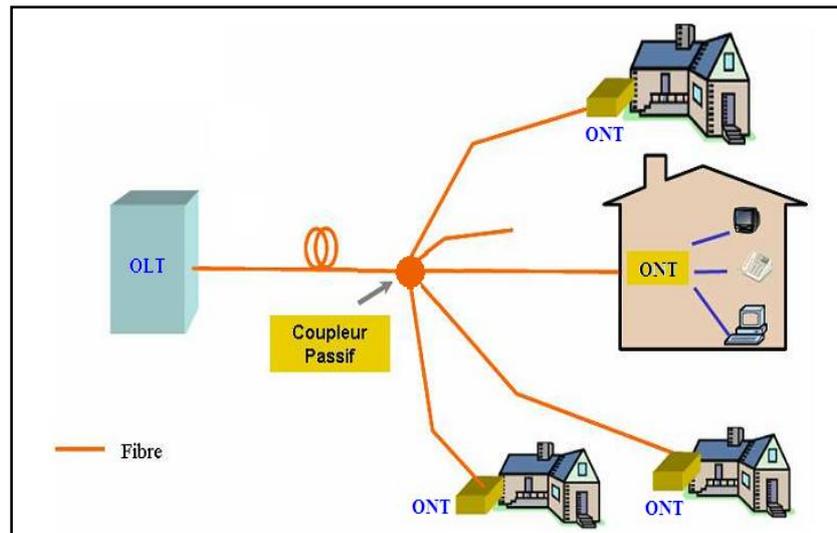


Figure I.7 : Architecture Point-to-Multipoint (PON) [12].

Les avantages :

- Aucun élément électronique actif dans le réseau d'accès, c'est la structure passive.
- Réduit des dépenses capitales et des coûts d'exploitation associés.
- Les frais bas d'entretien de ces composants optiques passifs réduiront de manière significative le coût de mises à niveau et de dépenses de fonctionnement.
- Permet des économies sur la quantité de fibres à poser, et donc sur le dimensionnement des infrastructures d'accueil.
- Architecture favorable à la diffusion.
- Flexibilité dans l'allocation de la bande passante.

Les inconvénients :

- Pas d'interopérabilité avec d'autres réseaux.
- Budget optique limité par le coupleur dont les pertes sont proportionnelles au nombre de ports.
- Bande passante partagée et limitée.
- Sécurité des données nécessaire
- Zone de couverture limitée: au maximum 20 km en fonction du nombre de divisions (plus de divisions = moins de distance)
- Capacité de planification difficile pour les applications d'entreprise.

I.5 Dimensionnements comparés entre PON et P2P

Pour illustrer le gain obtenu entre une architecture point à point et une architecture PON, on prend le cas d'un réseau utilisé simultanément par quatre opérateurs, avec un NRO dimensionné pour 1000 abonnés. Le nombre de fibres sur les câbles de la section 1 requis dans le cas du point à point est de 1000, soit un groupe de câbles d'une capacité de 1024 fibres, quand il est de 36 à 40 dans le cas du PON (cas d'un couplage

de 32), soit au final un câble de seulement 48 fibres. On obtient donc un résultat permettant de diminuer le nombre de fibres par un facteur 22.

Les détails du calcul dans le cas du PON avec un couplage de 32 sont les suivants [13]:

On démarre du principe que le taux de répartition des 1000 abonnés est le suivant:

- OPÉRATEUR A: 400 abonnés.
- OPÉRATEUR B: 300 abonnés.
- OPÉRATEUR C: 200 abonnés.
- OPÉRATEUR D: 100 abonnés.

Le nombre de splitters par opérateur sera donc comme suit:

- OPÉRATEUR A: $400/32=12,5$, on prend 15 pour garantir une évolutivité confortable.
- OPÉRATEUR B: $300/32=9,375$, on prend 11.
- OPÉRATEUR C: $200/32=6,25$, on prend 8.
- OPÉRATEUR D: $100/32=3,125$, on prend 4.

Soit 38 fibres sur le transport (34 en ne prenant pas de marge d'évolutivité). Dans tous les cas on passera au moins un câble de 24 paires, soit 48 fibres donc le gain réel est de $1024/48$ soit 21,3. Ce calcul est réalisé dans l'hypothèse d'un taux d'activation des utilisateurs du réseau de 100%. Si nous nous plaçons dans des conditions différentes (35%), le résultat est proche cette fois de 24/25.

I.6 Les topologies FTTx :

I.6.1 Topologie en Arbre (splitter1:N) :

Elle est la plus couramment utilisée dans les réseaux d'accès et utilise une seule fibre de l'OLT à un point intermédiaire de fractionnement. De ce point, il y a une fibre pour chaque ONU connecté au réseau. Les topologies en arbre sont aussi appelées topologies en étoile.

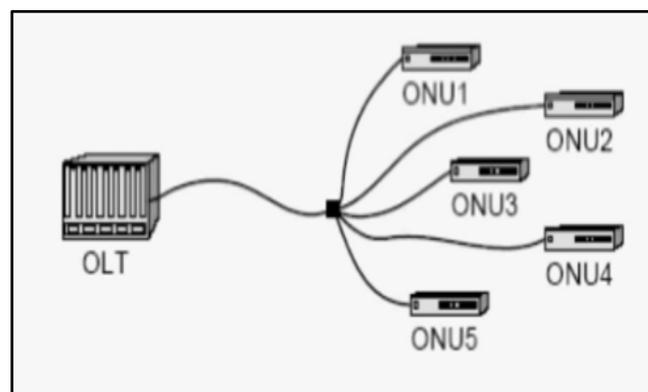


Figure I.8 : Topologie en arbre [14].

I.6.2 Topologie en bus :

Elle utilise une seule fibre de l'OLT, chaque abonné final est relié au moyen d'un coupleur robinet qui extrait une petite partie de la puissance qui est transmise de

l'OLT. Elle permet des déploiements flexibles en rajoutant un robinet pour les nouveaux raccordés.

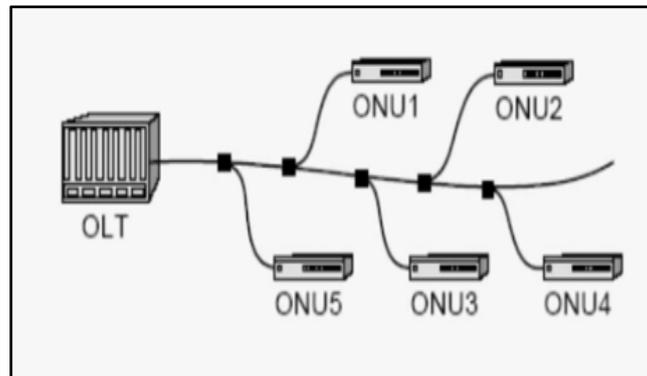


Figure I.9 : Topologie en bus [14].

I.6.3 Topologie en anneau :

Elle est principalement utilisée dans les réseaux métropolitains, car elle offre une capacité de résilience avec un nombre minimal des liens. Comme il y a deux façons possibles d'atteindre l'OLT, il est toujours possible d'établir et de maintenir une liaison de données en cas de coupure dans la fibre.

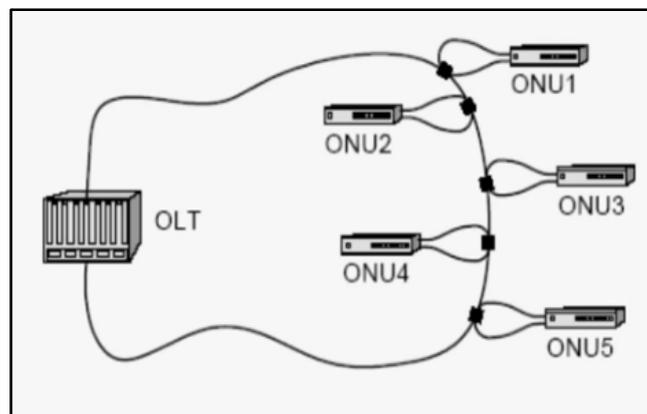


Figure I.10 : Topologie en anneau [14].

I.7 Le réseau d'accès PON :

Aujourd'hui, l'architecture point à multipoint passif du type PON est considérée actuellement comme la solution la plus attractive et la plus compatible au contexte du réseau d'accès du point de vue économique et des performances requises.

Mon travail de recherche se focalise sur cette architecture PON et principalement sur sa future évolution.

Dans ce qui suit, je vais présenter la technologie du réseau PON, notamment les techniques de multiplexage en temps, les différentes versions qui permettent d'augmenter le débit, la portée et le taux de partage du réseau.

I.7.1 Principe de fonctionnement du PON:

Dans un réseau PON la transmission se fait sur une seule fibre optique en utilisant le multiplexage de longueur d'onde *WDM* (*Wavelength Division Multiplexing*), il est à noter que les PONs actuels sont mono longueur d'onde c'est-à-dire qu'ils n'utilisent qu'une seule longueur d'onde pour le sens montant ou pour le sens descendant. Il s'agit de PON TDM (PON Time Division Multiplexing).

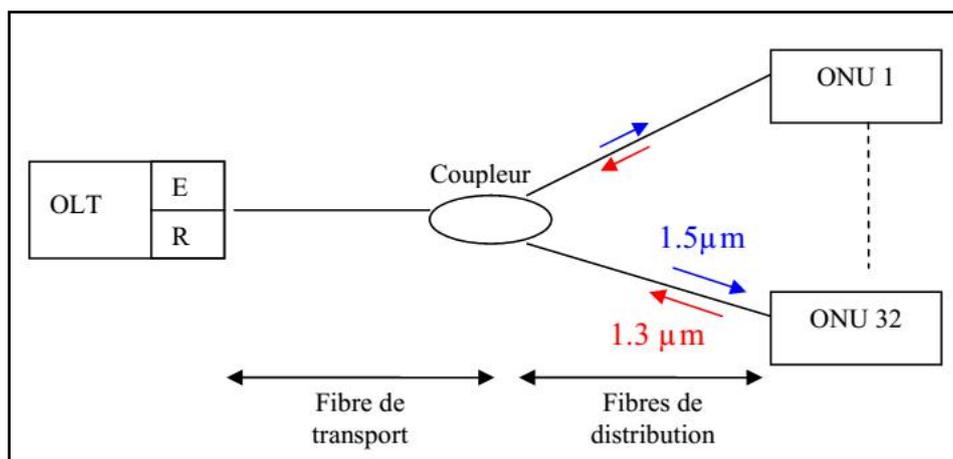


Figure I.11 : Transmission sur un PON [15].

I.7.1.1 La voie descendante :

On utilise une longueur d'onde porteuse de 1,5 μm pour la transmission des données aux différents utilisateurs. Le choix de cette longueur d'onde est dû au fait qu'elle permet un plus grand débit et un budget en puissance plus efficace (l'atténuation la plus petite au tour de 0.2 dB/km).

Les données envoyées par l'OLT sont étiquetées en fonction de leur destinataire. Tous les ONTs reçoivent toutes les données, mais seul l'ONT concerné les retransmet dans le réseau interne de l'abonné. Le débit instantané du PON est partagé entre tous les abonnés qui reçoivent des données. Si un seul abonné télécharge, il peut disposer de tout le débit maximum autorisé par le PON (sauf limitation mise en place par l'opérateur, par choix commercial ou technique vis-à-vis de son réseau de collecte).

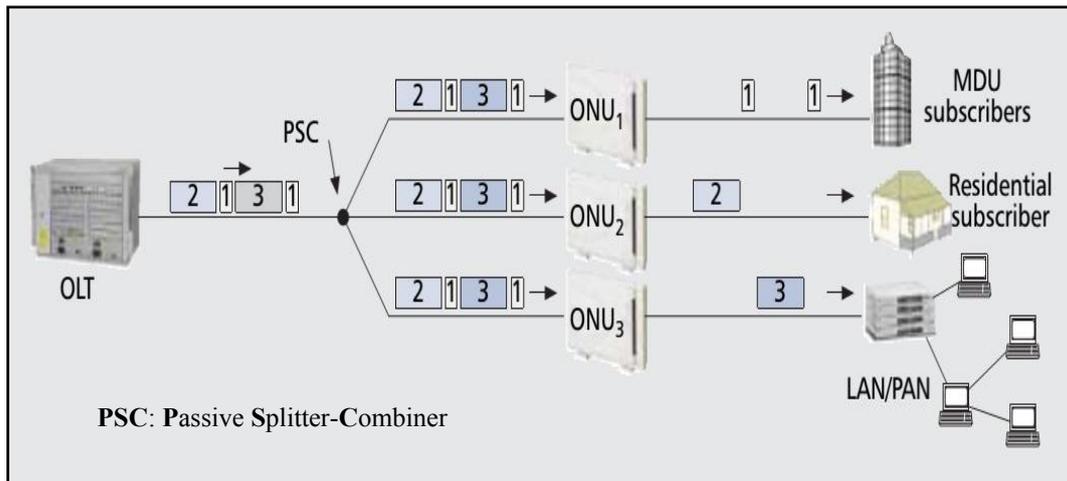


Figure I.12 : Trafic descendant dans un PON TDM [16].

I.7.1.2 La voie montante

On utilise une longueur d'onde à 1,3 μm avec des débits moins importants et des équipements moins coûteux (laser Fabry Pérot). Les utilisateurs sont multiplexés temporellement au niveau du diviseur.

Le coupleur étant passif, et les ONTs émettant tous dans la même longueur d'onde, si les signaux émis par deux ONT parvenaient simultanément au coupleur, ils ressortiraient sous la forme d'un mélange illisible par l'OLT. 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. On utilise donc un partage du "temps de parole".

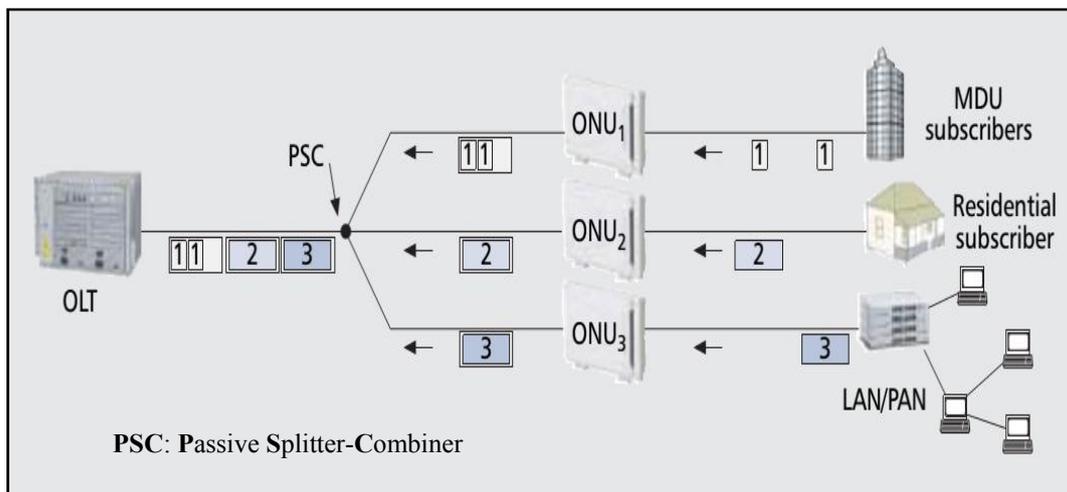


Figure I.13 : Trafic montant dans un PON TDM [16].

I.7.2 Les différents types de TDM PONs :

Depuis les années 90, les technologies PON ont été normalisées par l'ITU (*International Telecommunication Union*) et par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics*

Engineers), différents standards apparaissent au fil des années, on a ainsi défini : APON, BPON, GPON et EPON, le paragraphe qui suit détaille ces technologies.

I.7.2.1 APON (ATM PON) :

L'architecture APON (ATM Passive Optical Network) a été initiée en 1995 par l'ITU/FSAN, standardisée par l'ITU en 1998. C'est simplement un système point à multipoint sur fibre optique qui utilise l'ATM comme protocole de transmission. Avec l'APON, les données à haut débit, la voix et la vidéo peuvent être acheminées jusqu'aux abonnés sur une seule fibre.

Un système APON peut relier jusqu'à 32 abonnés au PON et leur fournit un système d'accès flexible et un débit élevé (622 Mbit/s ou 155 Mbit/s dans le sens descendant, 155 Mbit/s dans le sens montant). Dans le sens descendant, le multiplexage des cellules ATM est utilisé, alors qu'un protocole de TDMA commande l'accès ascendant des abonnés.

I.7.2.2 BPON (Broadband PON):

Le BPON est l'extension du APON en vue de fournir d'autres services, tels que l'Ethernet et la diffusion de la vidéo (broadcast video). C'est un réseau de distribution en fibre optique à large bande. En effet, les améliorations récentes de l'APON incluent une vitesse plus élevée, le multiplexage en longueur d'onde WDM, une commande dynamique de la largeur de bande, une meilleure sécurité de données.

Pour traduire cette évolution, ITU-T a officiellement changé le nom du système en PON à large bande, ou BPON (Broadband PON), défini par la norme G.983.1 [17].

Les BPON actuellement déployés opèrent en l'un des 3 modes downstream/upstream: 155Mb/s /155Mb/s, 622Mb/s /155 Mb/s, 622Mb/s /622Mb/s ou 1244 Mb/s /622Mb/s.

Les autres caractéristiques de réseau BPON sont:

- 32 ONU's dans un seul PON,
- La longueur de la fibre peut aller jusqu'à 20 km,
- Pour la voix et les données, les longueurs d'onde utilisées dans le sens descendant et montant sont 1490 nm et 1310 nm respectivement,
- Une troisième longueur d'onde (1550 nm) peut être utilisée pour le transport de la vidéo numérique dans le sens descendant.

L'avantage des A/BPONs est qu'ils permettent en quelque sorte la réallocation dynamique en mode TDM. En effet, vu que la bande offerte est limitée, les ONU's les plus actifs peuvent envoyer leurs données pendant les times slots des ONU's inactifs, de cette manière le débit par utilisateur actif peut être augmenté.

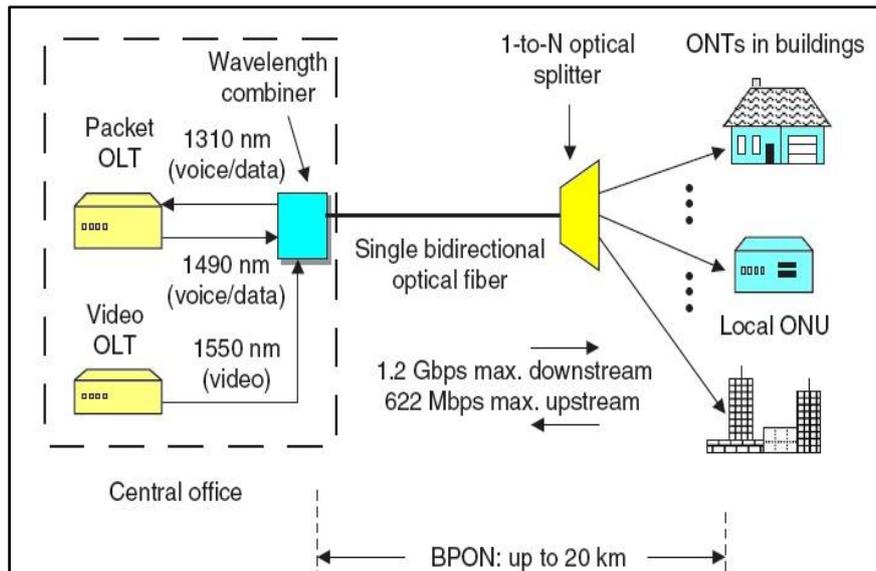


Figure I.14 : Architecture et concept de base d'un BPON.

Pour remédier à cette insuffisance, deux autres architectures sont apparues par la suite: le GPON et le EPON.

I.7.2.3 GPON (Gigabit PON) :

Le progrès de la technologie, le besoin en bande passante plus large, en plus de l'insuffisance de l'ATM, ont poussé à réviser le standard APON et à réfléchir à une autre solution appelée GPON qui a été standardisée par l'ITU en 2003. L'architecture GPON ne repose plus sur un tramage ATM mais sur un protocole beaucoup plus simple appelé GFP (*Generic Framing Protocol*). Il s'agit d'un complément à l'ATM. Les trames ont une taille variable (jusqu'à 4095 octets avec un entête de 5 octets), elles sont identifiées par un numéro de port (port-id) et peuvent être fragmentées.

L'avantage majeur de GPON est qu'il peut supporter plusieurs services à la fois et permet la transmission des paquets en se basant sur des protocoles différents (ATM, IP). De plus, en comparaison avec le standard BPON, le GPON permet une transmission allant jusqu'à 2.48 Gb/s dans le sens descendant et 1.244 Gb/s dans le sens montant bien qu'il n'utilise qu'une seule longueur d'onde dans ce sens, partagé entre les 64 (max 128) clients dont la bande passante est gérée par un algorithme d'allocation de bande passante dynamique (DBA).

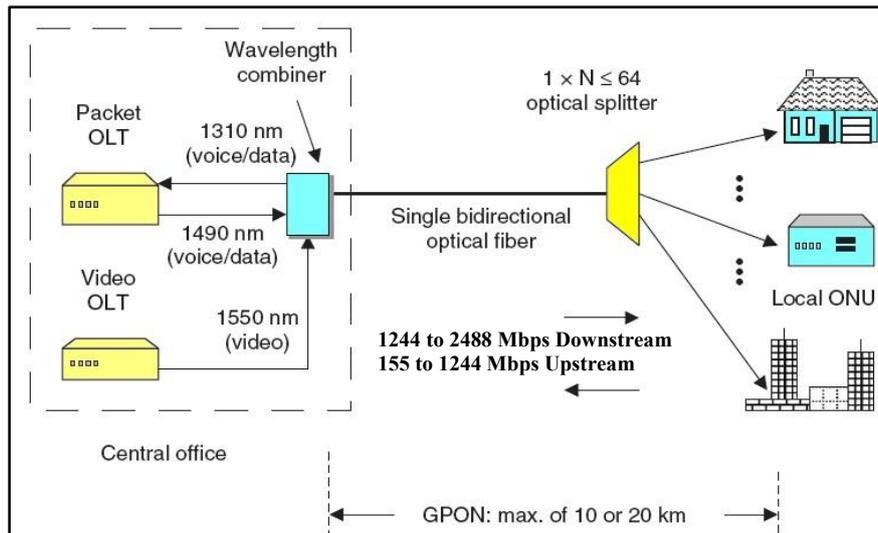


Figure I.15 : Architecture et concept de base d'un GPON.

I.7.2.4 EPON (Ethernet PON) :

L'architecture Ethernet PON a été standardisée en septembre 2004 par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) sous la référence 802.3ah. Fortement déployée au Japon, en Corée et en Europe, la norme E-PON supporte le service « triple play : Voie, Data et la vidéo » sur IP.

Elle est basée sur l'utilisation de l'Ethernet pour encapsuler et transmettre les données. Comme Ethernet est une technologie peu coûteuse, omniprésente et possède une très large bande passante, EPON apparaît comme la meilleure solution en ce moment pour délivrer les paquets IP à travers les PONs.

Dans cette architecture, on a une seule longueur d'onde pour la voix montante et une seule longueur d'onde pour la voie descendante selon une technique TDM. Cette norme propose des débits symétriques jusqu'à 1.25 Gb/s pour 32 abonnés à des portées pouvant atteindre 20 km.

La différence principale entre E-PON et APON est que dans les architectures E-PON les données sont transmises en paquets de longueurs variables jusqu'à 1.518 octets selon le protocole IEEE 802.3, tandis que dans un APON les données sont transmises en cellules de longueur fixe de 53 octets (charge utile 48-octets et cinq octets d'en-tête), comme indiqué par le protocole ATM. Ce format signifie qu'il est difficile et inefficace qu'un réseau APON transporte un trafic adapté au protocole IP. En effet dans un protocole IP les données sont segmentées dans des paquets de longueurs variables jusqu'à 65.535 octets. Pour qu'un APON porte le trafic IP, les paquets doivent être divisés en segments de 48 octets avec un en-tête de 5 octets attaché à chacun. Ce processus est long et compliqué et augmente le coût des OLT et des ONU. De plus, 5 octets de largeur de bande sont gaspillés pour chaque segment de 48 octets, créant ainsi des pertes qui sont connues communément sous le nom « ATM cell tax ».

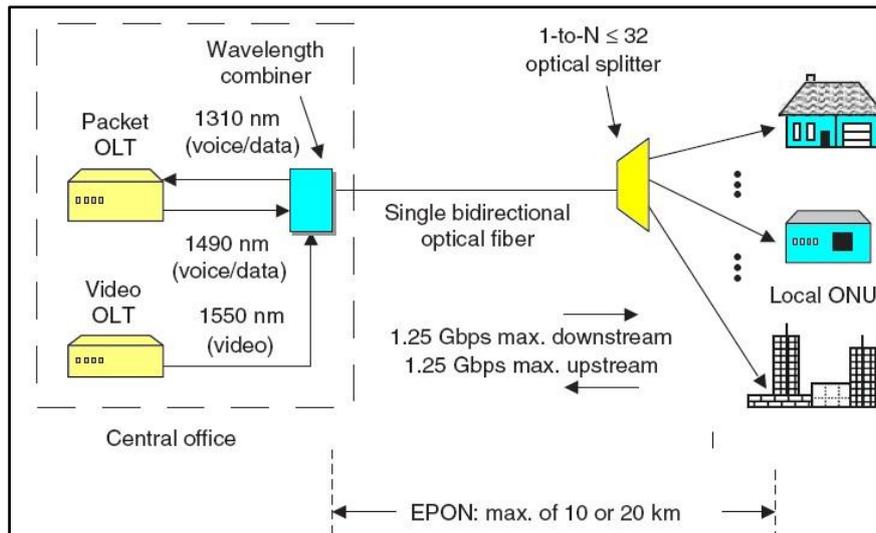


Figure I.16 : Architecture et concept de base d'un EPON.

I.8 Les classes des G-PONs :

La distance de fonctionnement de 20 km est fixée entre le central et le client le plus éloigné. Cette distance correspond à une portée typique avec un taux de partage 1:64. Mais si on raisonne en termes de portée logique, cette distance serait de 60 km avec un taux de partage de 1:16. Une classification de l'architecture G-PON selon le budget de liaison (ou pertes de puissance maximale autorisée) a été établie dans la norme ITU G 984, comme l'indique le Tableau I.3.

Classe	Budget optique minimum (dB)	Budget optique maximum (dB)
A	5	20
B	10	25
B+	13	28
C	15	30
C+	17	32

Tableau I.3 : Classification du G-PON selon le Budget optique.

Aujourd'hui, la solution G-PON déployée se situe dans la Classe B+, avec un budget d'atténuation optique de 28 dB maximum. Ce budget est consommé par le taux de partage, la connectivité et la portée. L'infrastructure optique a été conçue pour supporter ce budget d'atténuation optique [18].

La Figure I.17 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 [8].

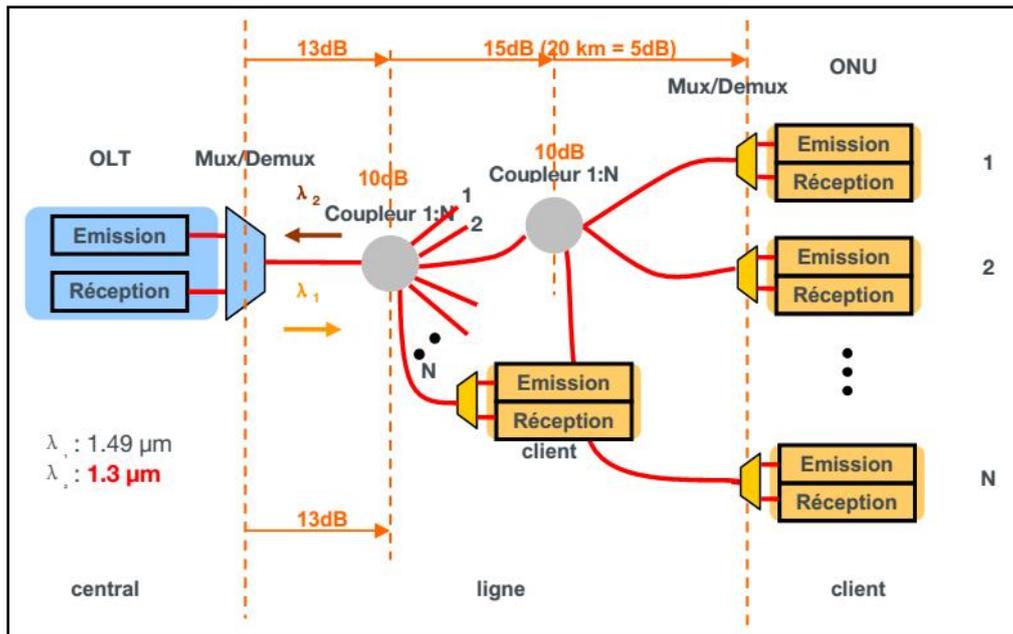


Figure I.17 : Architecture d'un système PON de classe B+ [8].

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 2,5Gb/s et montante à 1,25Gb/s [18].

OLT	Classes				ONU	Classes			
	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 I.4 : Spécifications des émetteurs et récepteurs à l'OLT et à l'ONT selon les classes.

I.9 Comparatif des différentes technologies :

Un résumé des caractéristiques physiques de ces systèmes s'avère alors utile. Le Tableau I.5 présente cette synthèse pour le BPON, GPON et l'EPON.

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

Tableau I.5 : Récapitulatif des performances des PON normalisés [15].

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.

I.10 Le PON la technologie verte :

Une vitesse plus élevée égale une augmentation de la consommation d'énergie. Partant de cette phrase, et avec la focalisation d'offrir toujours plus de débit aux utilisateurs, ceci nous conduit à une augmentation drastique de la quantité d'énergie consommée au NRA (Noeud de Raccordement d'Abonnés).

Parallèlement à cela vient une augmentation considérable dans le coût d'énergie nécessaire pour l'alimentation de ces centraux, à la fois en termes de dépenses et éventuellement, à un impact sur l'environnement.

Aujourd'hui, une grande importance est mise sur le réchauffement climatique et d'autres effets environnementaux, il semble que la technologie GPON peut avoir un impact beaucoup moins négatif que les autres technologies d'accès large bande. Le papier présenté par Dan Parsons de BroadLight à IEEE Globecom 2007 [19] éclaire à quel point la technologie GPON préserve l'environnement.

Par exemple, dans un pays européen, le fournisseur de services consomme plus de 2.000.000 MW-heures d'énergie. Avec la hausse du coût de l'énergie, le fournisseur de services est très préoccupé, par ce que l'impact sera sur sa facture d'énergie lors de la mise en œuvre de nouvelles technologies à haute vitesse. Le coût de migration à partir de l'ADSL2 vers le VDSL2 augmente la puissance requise par plus d'un facteur de deux.

Pour plus de détail, un fournisseur de services avec six millions d'abonnés ADSL consommera 9600 kW-heures (1,6 W par abonné ADSL) de l'énergie à un coût d'environ 8 millions de dollars par ans. Si on migre vers le VDSL2 (3,6 W par abonné), le coût de l'énergie augmente de plus d'un facteur de deux, environ 18 millions de dollars par ans. Ceci est probablement pas très important parce que le fournisseur de services dispose d'un budget de plusieurs milliards de dollars, et il peut probablement récupérer une partie ou la totalité du coût supplémentaire par l'augmentation des tarifs des services.

L'impact réel pour vous et moi n'est pas l'augmentation du coût d'énergie consommée, mais l'impact de cette consommation sur l'environnement. À la fin de 2007, il y avait environ 250 millions d'abonnés DSL dans le monde nécessitant environ 400 MW de puissance pour le fonctionnement des équipements. Cette analyse n'inclut pas la puissance nécessaire pour le refroidissement d'équipement (air conditionné). Selon les compagnies de télécom, on a besoin de 60W pour refroidir un équipement qui consomme 100W. Ainsi, une quantité de 60% est nécessaire à chaque fois, plus de puissance est ajoutée.

Ce besoin en puissance a un impact d'énergie qui se traduit par une empreinte environnementale de carbone qui peut être calculé via un site Web géré par le service public américain, Pacific Gas and Electric (PG & E). L'énergie consommée pour alimenter les 250 millions d'abonnés ADSL libère plus de 850.000 tonnes de dioxyde de carbone dans l'environnement chaque année. À titre de comparaison, ce chiffre correspond à la combustion de 90.000.000 gallons d'essence ou la contribution en dioxyde de carbone de 500.000 foyers aux États-Unis pendant une année.

À travers l'analyse effectuée pendant une année, on peut constater que le déploiement de GPON à une réduction significative sur les émissions de dioxyde de carbone, comme indiqué dans le tableau I.6. Le tableau montre à quel point les émissions sont réduites pour un million d'abonnés GPON en comparant à l'ADSL2, VDSL2, et P2P Ethernet.

GPON vs.	Puissance sauvegardée	Coût économisé	Quantité de CO2 réduite.
ADSL	~11 MWh / 0.88 Ml du Gazoil	\$1.2 M	~2.18 kt / 0,95 Ml
VDSL2	~29 MWh / 2.5 Ml du Gazoil	\$2.9 M	~6.17 kt / 2,65 Ml
P2P	~27 MWh / 2.44 Ml du Gazoil	\$2.7 M	~5.76 kt / 2,48 Ml

Tableau I.6 : Comparaison entre le GPON et d'autres types de réseaux d'accès haut débit [20].

I.11 Conclusion :

La principale problématique à résoudre dans le contexte du déploiement du FTTH est de proposer de nouvelles solutions technologiques et architecturales qui pourraient succéder au G-PON afin de garantir un réseau d'accès « Next Generation » offrant un débit de plus en plus important et économique. Dans l'avenir, la technologie PON à base du multiplexage temporel TDM va s'enrichir d'un nouveau type de multiplexage basé sur la longueur d'onde, WDM (Wavelength Division Multiplexing). Le chapitre suivant va traiter les réseaux d'accès optiques de nouvelles générations (NG-PON) y compris les WDM PON.

Chapitre II:

Les réseaux d'accès optiques de nouvelles générations

WDM PON

II.1 Introduction

En général les déploiements de fibre-to-the-Home au cours des dernières années ont été basés sur des technologies déjà normalisée du réseau PON tels que Gigabit Ethernet Passive Optical Networks (GEPON) et Gigabit PON (GPON). Le succès de ces déploiements a conduit à l'innovation significative à la fois d'architectures du système et aux composants utilisés pour construire ces systèmes. La prochaine génération de réseaux optiques passifs sera inévitablement beaucoup plus avancée que ce qui est déployé aujourd'hui.

Actuellement, le développement du réseau PON repose sur deux approches distinctes qui semblent rivaliser pour les systèmes de la prochaine génération: 10 Gb/s PON (que ce soit 10G EPON ou 10G PON) et WDM PON. Chaque approche a ses propres avantages et ses propres problèmes, sachant que les progressions des deux nouvelles technologies sont accélérées au cours des dernières années.

Dans ce chapitre on va présenter ces deux technologies, en concentrant particulièrement sur le WDM PON, puisque les travaux de cette thèse s'appuient sur cette dernière architecture, en examinant les défis à débattre et les nouvelles technologies qui font de cette technologie une concurrente très viable pour les réseaux de prochaines générations.

II.2 Les NGPON TDM (Next Generation PON TDM)

II.2.1 Le 10GPON (10GigaPON)

Cette norme NGPON1 est l'extension de standard ITU-T G.984 GPON, pour laquelle le débit est amélioré à 10Gb/s pour la voie descendante et de 2.5Gb/s à 10 Gb/s pour le sens inverse.

Dans cette norme, les performances des composants optoélectroniques ont été améliorées en voie descendante comme en montante:

- En voie descendante à 1,5 μ m, le laser DFB est remplacé par un laser à modulateur intégré pour réduire l'effet chirp et la non-linéarité de la modulation directe de la diode. En réception, la diode PIN est remplacée par une diode à avalanche qui présente une meilleure sensibilité.

- En voie montante à 1,3 μm , on conserve le laser FP par contre la diode PIN est remplacée par une APD.

L'avantage principal de cette norme, c'est la possibilité de coexistence avec le standard GPON sur le même réseau, on trouve deux variantes:

- XGPON1 (10GigaPON1):10G/2,5G
 - Une version 29 dB et une version 31 dB sont envisagées suivant les technologies utilisées pour les émetteurs/récepteurs.
 - Distance de 20 km.
 - Fonctions de « power saving » prévues.
 - Normalisé en 2010 du XGPON1.
- XGPON2 :10G/10G, normalisation prévu en 2015.

II.2.2 10GEPON (10Gigabit EPON)

La norme 10 GEPON est l'extension de standard IEEE 802.3av EPON pour laquelle le débit est amélioré de 1.25 Gb/s à 10 Gb/s pour les deux voies descendante et montante.

Plusieurs variantes ont été présentées selon le débit transmit, le type de lien (symétrique ou asymétrique) et le budget optique disponible.

- PR10: fonctionne à 10Gb/s pour les deux sens, avec un budget optique de 20 dB au maximum.
- PR20: fonctionne à 10Gb/s pour les deux sens, avec un budget optique de 24 dB au maximum.
- PR30: fonctionne à 10Gb/s pour les deux sens, avec un budget optique de 29 dB au maximum.
- RX10: fonctionne à 10Gb/s pour le sens descendant et à 1.25 Gb/s pour le sens montant, avec un budget optique ≤ 20 dB.
- PRX20: fonctionne à 10Gb/s pour le sens descendant et à 1.25 Gb/s pour le sens montant, avec un budget optique ≤ 24 dB.
- PRX30: fonctionne à 10Gb/s pour le sens descendant et à 1.25 Gb/s pour le sens montant, avec un budget optique ≤ 29 dB.

II.2.3 OCDMA-PON

Une architecture relativement nouvelle du PON a commencé à attirer l'attention qui emploie la technique de multiplexage OCDMA (Optical Code Division Multiplexing Access). C'est plus ou moins la même technique utilisée dans la technologie sans fil mobile. Cette technique promet une très bonne sécurisation des signaux [21] et des transmissions à débits très élevés.

Le principe de base dans le domaine électrique est de multiplier le signal numérique à transmettre par une séquence de N éléments binaires de durée très inférieure à celle du signal, ce qui a pour effet d'étaler le spectre. À la réception, la multiplication par la séquence identique à celle d'émission restitue le signal d'origine.

Deux principales solutions sont généralement retenues : l'OCDMA temporel et l'OCDMA en longueurs d'onde [22].

L'OCDMA peut être utilisé dans une configuration de PON avec un coupleur 1 vers N qui diffuse toutes les informations à tous les utilisateurs. Comme pour tous les systèmes diffusés, chaque utilisateur reçoit l'ensemble des informations véhiculées par le réseau, et sélectionne celles qui lui sont destinées.

Pour un utilisateur donné, l'ensemble des informations destinées aux autres utilisateurs constitue un bruit qui vient se superposer au signal correspondant à ses propres données, bruit que l'on appelle Interférence d'Accès Multiple (IAM). L'IAM, qui augmente avec le nombre d'utilisateurs du réseau, va constituer la principale limitation des performances des systèmes OCDMA.

En plus, quelque soit l'approche considérée pour l'OCDMA, il est nécessaire de construire un code avec une différence (ou une "distance") entre les mots la plus grande possible (codes orthogonaux entre eux), ceci afin d'améliorer l'extraction du signal souhaité parmi le bruit. Dans le domaine électrique, l'orthogonalité stricte entre les mots de code peut être obtenue. Par contre, dans le domaine optique, l'orthogonalité stricte ne peut plus être atteinte, et il faut se contenter d'une quasi orthogonalité, moins favorable pour de bonnes performances en décodage. Une des difficultés de la technique réside donc dans l'élaboration de codes permettant d'obtenir les meilleures performances.

Aujourd'hui, la mise en œuvre de cette technique dans les réseaux PON est tout à fait compliquée, cependant avec l'évolution et la maîtrise de cette technique peut donner une nouvelle dimension aux réseaux NGPON.

II.3 Les limites du PON TDM à 10 Gb/s

Le concept de déploiement de l'architecture du réseau PON, dans la majorité des opérations repose sur le partage temporel d'une seule longueur d'onde entre plusieurs utilisateurs. Le principe du multiplexage temporel ou TDM PON est décrit dans le chapitre précédant. La simplicité du système et son caractère économique le motive pour des débits inférieurs à 10 Gb/s, néanmoins, le besoin en bande passante qui ne cesse à augmenter pousse ce type de réseau d'accès à souffrir de quelques limites :

- Un compromis subsiste entre la montée en débit et le caractère économique de cette solution. Par exemple, un débit de l'ordre de quelques Gbit/s par abonné serait nécessaire pour l'horizon 2020. Pour pouvoir atteindre ce débit, le système TDM PON devrait avoir une capacité totale de 40 Gbit/s ou 100 Gbit/s partagée entre plusieurs abonnés. Il s'ensuit que le coût des sous-systèmes émetteur-récepteur optiques devient très important.
- De plus, la limite en vitesse de l'électronique posera problème, notamment les récepteurs en mode rafale (ou en mode burst) à ce débit.
- Le multiplexage temporel TDM PON rencontre des limites au niveau de la synchronisation et des modules de réceptions à l'OLT.
- Le défi est de concilier la montée en débit et la réutilisation de l'infrastructure existante.

Pour toutes ces raisons, le TDM-PON pourrait être considéré comme une solution attractive uniquement pour un débit inférieur ou égal à 10 Gbit/s. Par conséquent, l'utilisation de multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing) est envisagée pour un débit agrégé de 40 Gb/s dans l'accès.

II.4 Le multiplexage en longueur d'onde (PON WDM)

II.4.1 Principe du PON WDM

L'utilisation du multiplexage en longueur d'onde dans les réseaux d'accès optique (WDM PON) est la prochaine génération de solution pour les réseaux d'accès. Ils peuvent offrir la plus grande largeur de bande.

La configuration PON WDM est semblable à l'architecture du PON, c'est du point à multipoint. La différence principale est qu'on affecte à chaque ONU une longueur d'onde, ce qui revient à faire du point à point virtuel en longueur d'onde. On cumule ainsi les avantages du point à point, par conséquent des taux de transmission plus hauts peuvent être réalisés. Mieux aussi, on peut utiliser des longueurs d'onde de capacités différentes pour des services différents suivant les demandes des utilisateurs: c'est le concept de multiservice/multi-débit.

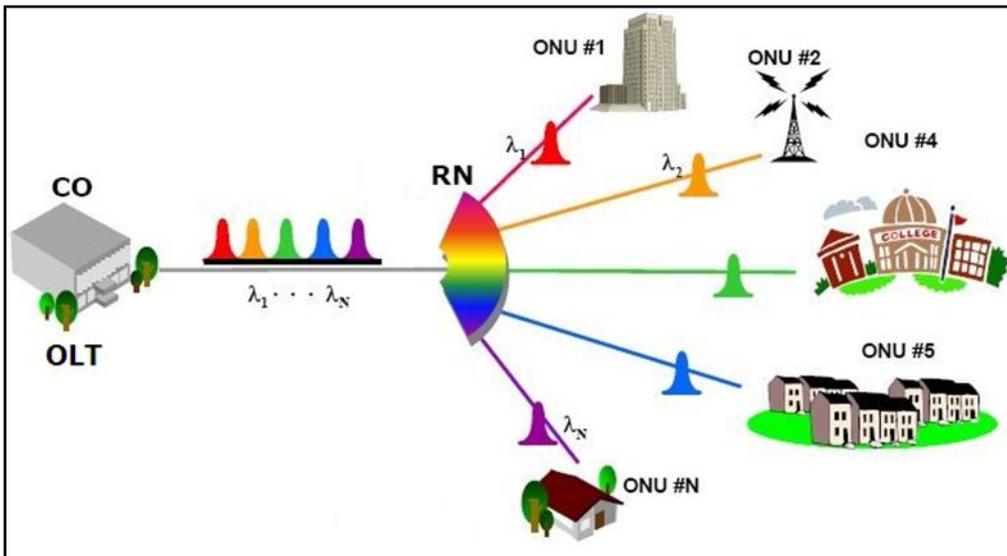


Figure II.1 : Architecture d'un PON WDM [23].

La capacité totale de la bande passante du système d'accès est multipliée par le nombre de longueurs d'onde multiplexées sur la fibre. Ces signaux optiques sont ensuite séparés (ou démultiplexés) dans des fibres différentes.

➤ Sens descendant

L'OLT émet toutes les longueurs d'onde sur la même fibre partagée. Dans le cas de l'utilisation d'un coupleur dans le point de répartition (RN), ce composant divise la puissance et distribue l'ensemble des longueurs d'onde vers chaque client connecté. Un filtre en longueur d'onde au niveau de l'ONU permet ensuite de sélectionner la longueur d'onde dédiée. Si on utilise un répartiteur de longueur d'onde ou un démultiplexeur de type AWG

(Arrayed Waveguide Grating) dans le RN, chaque ONU reçoit une longueur d'onde dédiée.

➤ **Sens montant**

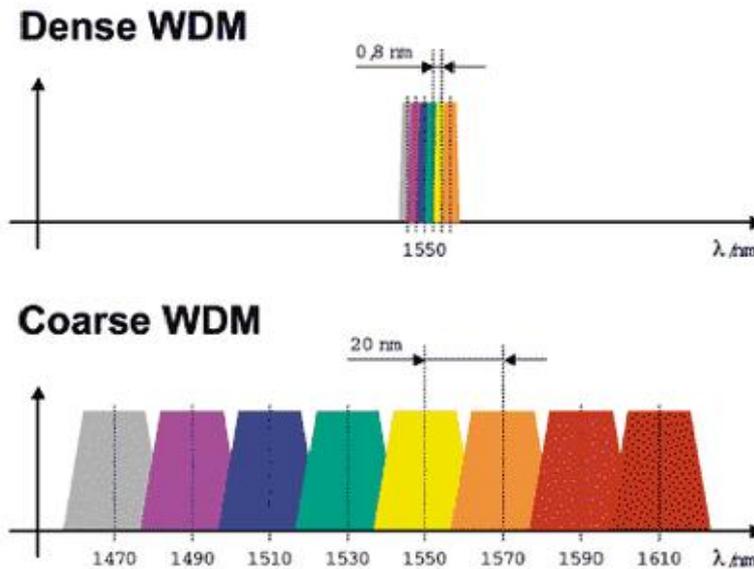
Dans le sens montant, l'OLT utilise un démultiplexeur WDM qui partage les signaux venant des différents ONUs. Chaque ONU est équipée avec un émetteur et un récepteur pour recevoir et transmettre dans sa propre longueur d'onde.

Les réseaux WDM-PON sont subdivisés en deux principales variantes le CWDM (Coarse WDM) et DWDM (Dense WDM). Il est prévu que jusqu'à 40 clients ou plus sont servis par une seule fibre d'accès dans la variante DWDM et 8 dans la variante CWDM.

➤ CWDM est une technologie WDM de faible densité en termes de longueurs d'onde. Dans cette technique, les informations sont regroupées en 18 canaux dans le 1271 nm à 1611 nm, avec une distance de 20 nm entre les canaux, suivant la recommandation IUT-T G.694.2 [25]. Actuellement les bandes de fréquences les plus utilisées dans les systèmes CWDM sont:

- Bande O (Original Band) - à partir de 1260 nm à 1360 nm;
- Bande E (Extended Band) - à partir de 1360 nm à 1460 nm;
- Bande C (Conventional Band) - de 1530 nm à 1570 nm.

Les émetteurs, les multiplexeurs optiques et démultiplexeurs sont définis à ces longueurs d'onde. Ils ne nécessitent pas un contrôle étroit en longueur d'onde, ce qui explique leur coût moins élevé par rapport aux équipements DWDM.



➤ La technologie DWDM définie par la recommandation ITU-T G.694.1 [26] diffère du CWDM par le nombre de longueurs d'onde transmis, qui est beaucoup plus grand, avec un espacement plus étroit. Actuellement, ces systèmes peuvent utiliser jusqu'à 80 canaux (longueurs d'onde), ce nombre peut encore augmenter à l'avenir. Cependant, étant donné la complexité de la technologie, parce qu'elle

requiert des lasers et des filtres très précis, elle n'est pas très utilisée dans le réseau d'accès. À l'heure actuelle, les bandes de fréquences les plus utilisées dans la plupart des systèmes DWDM sont:

- Bande S (Short Band) - à partir de 1450 nm à 1500 nm;
- Bande C (Conventional Band) - de 1530 nm à 1570 nm;
- Bande L (Long Band) - de 1570 nm à 1625 nm.

Le tableau II.1 résume les différences entre ces deux technologies, montrant les avantages et les inconvénients de chacun.

CWDM vs DWDM	Avantages	Désavantages
CWDM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consommation d'énergie réduite (-20%) ▪ Les fibres SMF ou MMF peuvent être utilisées. ▪ Peut utiliser des LED ou des Lasers ▪ Grande capacité de données par canal ▪ Utilise des filtres petits et économiques ▪ Le coût d'installation et d'exploitation du réseau est réduit. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capacité de transmission inférieure à DWDM ▪ La portée de transmission est limitée (100 km max) ▪ Nécessite la régénération du signal.
DWDM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Importante capacité disponible. ▪ Plus grande distance avec EDFA ▪ Facilité d'intégration de l'amplification optique ▪ Prend en charge des vitesses très élevées par ONT (jusqu'à 10 Gb/s) ▪ Plus de 80 chaînes 	Technologie complexe exige: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Plus d'espace ▪ Plus de puissance ▪ Lasers et des filtres très précis. ▪ Les coûts d'installation sont plus élevés que pour CWDM

Tableau II.1 : différences entre CDWM vs DWDM.

II.4.2 Intérêt du WDM dans les réseaux d'accès

L'introduction du multiplexage en longueur d'onde dans l'accès est d'abord la réponse à une augmentation des débits et du taux de partage dans le réseau d'accès. L'intérêt du WDM n'est plus le simple multiplexage des données sur les différentes longueurs d'onde, mais un accès multiple en longueur d'onde qui permet d'adresser des données à un utilisateur en sélectionnant la longueur d'onde adéquate. La propriété utilisée ici étant le fait que les signaux transportés sur différentes longueurs d'onde peuvent être totalement indépendants et de natures différentes sans impact de l'une sur l'autre. Cette souplesse de multiplexage permet de superposer des adressages différents en fonction du type de clients (FFTx), de services (voix, données, vidéo ...), de technologies finales (xDSL, Wireless, Ethernet...). Le WDM permet une transparence aux protocoles et au débit.

II.4.3 Types de WDM PON

Le PON WDM a généralement une architecture en arbre telle que présentée sur la figure II.1. Il existe des nuances et des variantes de PON WDM, en particulier au niveau du composant de répartition qui peut être un coupleur ou un multiplexeur, ce qui donne des propriétés différentes à l'architecture.

Il existe principalement deux techniques de PON WDM, l'une utilisant un coupleur comme composant de répartition et faisant ce qu'on appelle du "broadcast and select" (diffusion puis sélection), l'autre utilisant un multiplexeur et faisant appel à du démultiplexage spatial. Ces deux techniques sont détaillées ci-après.

II.4.3.1 PON WDM avec diffusion puis sélection

L'intérêt principal de cette architecture appelée généralement "broadcast and select" est qu'elle est une évolution aisée de l'architecture des PON actuels. Le composant principal qu'est le coupleur 1:N est conservé. Il permet de diffuser toutes les longueurs d'onde émises par le central à tous les clients ("broadcast"). Ensuite il s'agit à chaque ONU de filtrer correctement pour ne recevoir que les données qui lui sont destinées ("select"). L'inconvénient est qu'il faut autant de filtres différents que de clients raccordés au coupleur. Une solution plus souple est d'avoir un filtre accordable chez chaque client, et d'accorder la longueur d'onde de filtrage correctement à distance. Ceci permet d'avoir des modules identiques à l'ONU, ce qui est favorable à la production de masse et à une baisse des coûts.

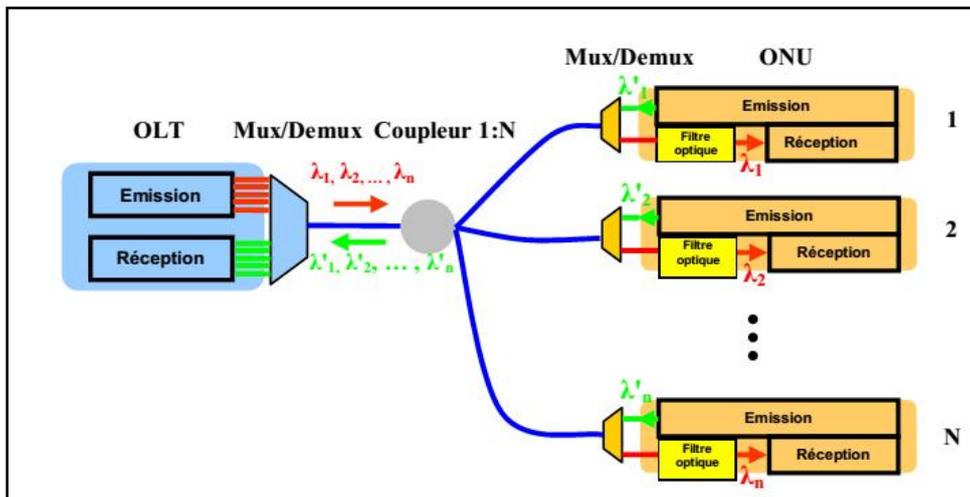


Figure II.3 : Un PON WDM utilisant le principe de « broadcast and select » [24].

Cette architecture « broadcast an select » avec un ODN à base de coupleur présente des points forts et des inconvénients.

Les avantages

- Le coupleur est un composant passif peu cher (par rapport à un multiplexeur) et est déjà le composant principal des autres alternatives PON, ce qui peut donc favoriser son utilisation dans les réseaux WDM
- L'architecture est très flexible et favorable à la reconfiguration.

- Compatible avec une migration à partir d'une architecture PON TDM
- L'intérêt de la diffusion en longueur d'onde est toujours présent.
- L'intérêt de réutiliser la même infrastructure pour les flux montants et descendants se comprend par l'économie réalisée en termes de composants et de fibres.

Les inconvénients

- Les pertes du coupleur sont proportionnelles au nombre de ports N: les pertes en décibel valent $10\log(N)$, ce qui donne le tableau suivant :

Coupleur	1x2	1x4	1x8	1x16	1x32	1x64	1x128
Pertes	3dB	6 dB	9 dB	12 dB	15 dB	18 dB	21 dB

Tableau II.2 : Pertes de coupleur en fonction du nombre de ports.

Il faut rajouter les pertes intrinsèques du coupleur, les pertes dues à la fibre (20 km équivalent environ à 5 dB), les pertes des filtres optiques (0,5 à 7 dB suivant la technologie employée, la forme du filtre, sa largeur à 3 dB, s'il est accordable ou non), les pertes des multiplexeurs à l'OLT ainsi que les pertes des soudures et connecteurs (1 à 2 dB). Ce budget de liaison fait qu'il est difficile de dépasser 64 ONU par PON comme dans les PONs TDM.

- Un autre inconvénient de l'architecture "broadcast and select" est qu'il faut autant de filtres en longueur d'onde différents que d'abonnés raccordés au coupleur. Une solution plus souple est d'avoir un filtre optique accordable chez chaque abonné et d'accorder la longueur d'onde de filtrage correctement à distance. Mais cette solution présente un coût assez élevé actuellement.
- La confidentialité des données n'est pas garantie, car tous les clients reçoivent les informations.

II.4.3.2 PON WDM avec démultiplexage spatial :

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 l'ONU correspondant.

Le principe de cette technique consiste d'abord à multiplexer les longueurs d'onde descendantes à l'OLT et à les faire se propager sur la fibre de distribution jusqu'au sous répartiteur (SR). Dans celui-ci, un démultiplexeur sépare les longueurs d'onde et envoie chacune d'elles vers l'ONU qui lui correspond, qui reçoit donc uniquement ses données. Il s'agit d'une architecture en arbre comme le révèle la figure II.3.

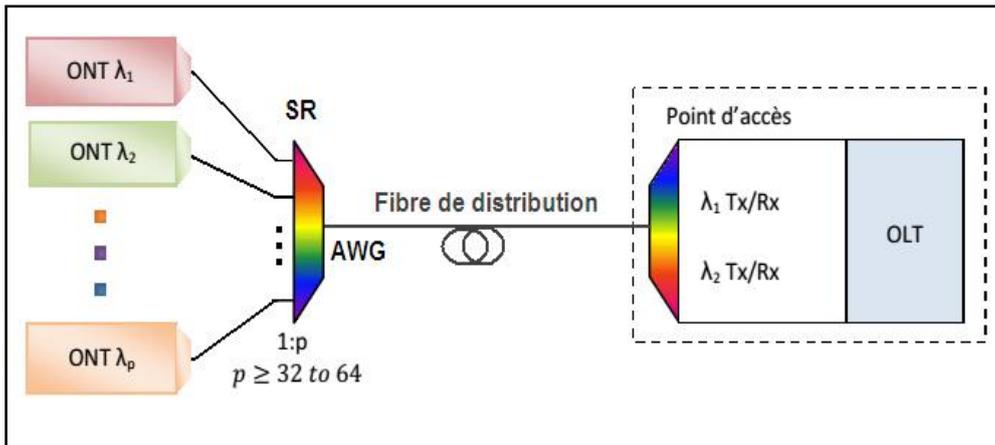


Figure II.4 : Un PON WDM utilisant un démultiplexeur en longueur d'ondes [24].

Le multiplexeur optique doit être un dispositif passif avec un ou plusieurs étages de multiplexage. Le nombre de ports optiques et l'espacement entre les longueurs d'onde se sont les paramètres clés.

Pour le sens montant, chaque ONU a un laser de longueur d'onde différente qui correspond au port du multiplexeur (au SR) sur lequel il est connecté. Tous les signaux montants sont multiplexés puis envoyés sur la fibre principale et démultiplexés à l'OLT.

Le démultiplexage spatial présente des avantages et des limites.

Les avantages

- Le récepteur est le même chez chaque abonné (un seul filtre large bande est nécessaire).
- La confidentialité des informations est élevée dans la mesure où l'abonné ne reçoit que les informations qui le concernent. Il faut cependant apporter une nuance, car il existe une diaphotie entre canaux WDM, donc un abonné reçoit une faible puissance de la longueur d'onde voisine, mais celle-ci est généralement (25 à 30 dB) inférieure à la puissance du canal principal. La récupération illicite de ces données est donc difficile.
- 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. Pour un AWG les pertes sont en général de l'ordre de 3,5 à 5 dB.

Les inconvénients

- La solution est figée, car lorsqu'un client est connecté à un port du multiplexeur, une longueur d'onde lui est attribuée physiquement et il est impossible d'en changer à moins de le brancher sur un autre port.
- Dans la solution WDM, le partage de la bande passante totale n'est pas flexible et efficace entre plusieurs abonnés. Cela peut amener à gaspiller les ressources disponibles.

- En ce qui concerne le nombre de clients par PON WDM, la principale limite de cette architecture est le nombre de longueurs d'onde disponibles contrairement à l'architecture "broadcast and select" où l'atténuation du coupleur est la principale limite physique. Si on considère une seule longueur d'onde par abonné, l'utilisation des bandes C et L (60 nm au total), et un espacement entre canaux de 50 GHz (0.4 nm), on arrive à 150 canaux (grille DWDM : norme G694.1).

II.4.4 Description de l'AWG

Une technologie très intéressante de multiplexage dans le WDM PON est l'AWG (Arrayed Waveguide Grating). L'AWG est un composant planaire (PLC : Planar Lightwave Circuit) principalement utilisé comme multiplexeurs et démultiplexeurs dans les systèmes de fibre WDM. Il est composé de cinq parties gravées sur une puce de silice comme le montre la figure II.5, on trouve les coupleurs d'entrée (1) / sortie (5), les régions de propagation libre (2), (4) et enfin, le réseau des guides d'ondes (3) de différentes longueurs (avec un incrément de longueur constante ΔL).

La lumière entrante (1) traverse un espace libre (2) et entre dans le faisceau des fibres optiques ou de guides d'ondes (3). Les guides ont des longueurs différentes et appliquent ainsi un déphasage entre les signaux à la sortie.

La lumière traverse ensuite un autre espace libre (4). Étant donné que les longueurs d'onde sont différentes, alors les retards de phase subis dans le réseau de guide d'onde sont différents, donc le spot d'interférence constructive diffère dans l'espace pour chaque longueur d'onde. De cette manière, on affecte chaque longueur d'onde sur le port de sortie dédié (5). Les lignes orange seulement illustrent le chemin de lumière. Le trajet de la lumière à partir de (1) à (5) est un démultiplexeur, et partir de (5) à (1) c'est le multiplexeur.

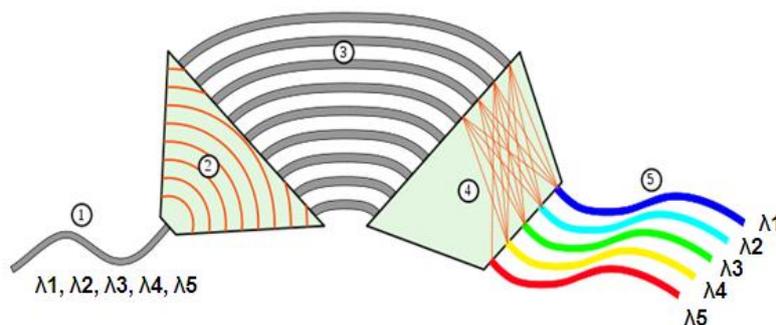


Figure II.5: Schéma d'un AWG.

II.5 L'architecture hybride ou WDM-TDM PON

Nous venons de montrer que la technologie TDM PON permet de partager de manière flexible et dynamique la bande passante totale disponible entre plusieurs abonnés. Cependant, pour un débit très élevé (quelques Gb/s par abonné), cette technologie ne serait plus certainement une solution aussi attractive et compatible alors que la technologie WDM PON est une excellente solution pour répondre à la demande d'un

débit très élevé. Par contre, pour cette dernière solution, le partage de la bande passante totale n'est pas flexible et efficace entre plusieurs abonnés. Cela peut gaspiller la ressource disponible. C'est pourquoi la technologie hybride WDM/TDM PON, qui combine ces deux techniques de multiplexage, permet d'obtenir un compromis entre les deux. Son architecture est montrée dans la figure II.6 ci-dessous. Cette topologie consiste en au moins deux niveaux de répartition : le premier pour le multiplexage/démultiplexage des canaux WDM à base d'un AWG et les autres pour la division de puissance de chaque longueur d'onde à base des coupleurs optiques. De cette manière, chaque branche fonctionnant sur une longueur d'onde du système hybride peut avoir le même principe d'un système TDM PON. Par exemple, la topologie illustrée dans la figure II.6 a deux niveaux de répartition: le premier 1:N par le multiplexage/ démultiplexage en longueurs d'onde et le deuxième 1:K par la division de puissance. Donc, le système hybride a un taux de partage de NxK dans ce cas.

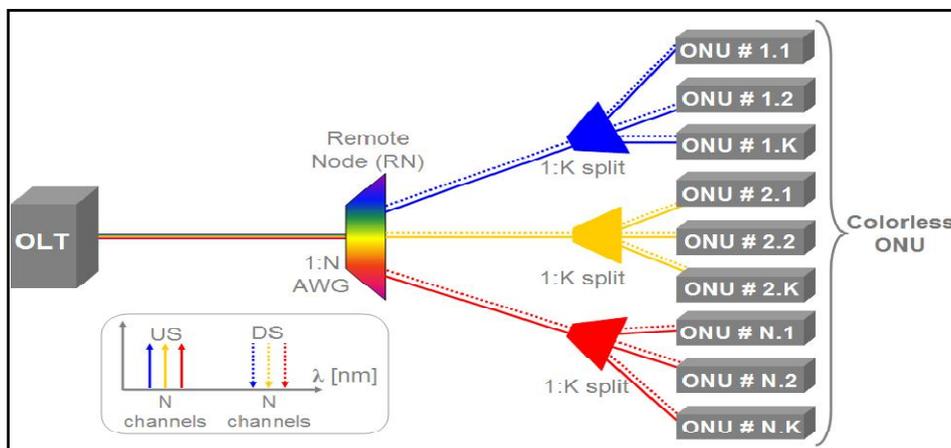


Figure II.6: Architecture hybrid WDM/TDM-PON [27].

Comme pour les autres architectures WDM, on présente ci-après les avantages et les inconvénients du PON WDM-TDM.

Les avantages

- Cette architecture WDM-TDM PON a pour intérêt de réutiliser l'infrastructure et les ressources déjà existantes comme :
 - Les coupleurs.
 - Les photodiodes large bande qui opèrent aussi bien à 1,3 μm qu'à 1,55 μm .
 - Les modules électroniques de synchronisation pour le TDM dans le sens descendant et le TDMA dans le sens remontant.
- Ce type d'architecture permet de mutualiser les kilomètres de fibres parcourues par plusieurs réseaux TDM ainsi que la concentration de tous les OLTs dans le même central.
- Pour ce système hybride, nous retrouvons les avantages de deux technologies PON discutées précédemment. Premièrement, c'est la bande passante totale disponible très élevée grâce à la technologie WDM, ainsi que la possibilité de

partager de manière flexible et efficace le débit porté par une longueur d'onde entre K abonnés dans une branche, grâce à la technologie TDM.

- Cette technologie hybride permet d'augmenter considérablement le nombre d'abonnés servis par un réseau PON.

Les inconvénients

- Le principal inconvénient est lié à la complexité de la mise en œuvre des récepteurs en mode rafale (« Burst ») pour le TDM et des émetteurs-récepteurs WDM pour le multiplexage en longueur d'onde. Donc, le coût global reste important.
- Il y a aussi le problème de la stabilisation du fonctionnement de l'AWG en température.
- Comme cette architecture hybride est une cascade de WDM PON et TDM PON, les pertes optiques totales du système comprenant celles de l'AWG et des coupleurs sont élevées.

II.6 Mise en œuvre du WDM PON

Le multiplexage en longueurs d'onde est une solution pour avoir des débits de l'ordre du Gigabit/s par ONU. Les technologies WDM restent coûteuses même si les prix sont en baisse du fait de l'augmentation des volumes de production. Néanmoins, le frein actuel pour l'introduction du WDM dans l'accès est le prix. Dans cette partie on traite des conditions de mise en œuvre du WDM afin d'avoir un réseau d'accès WDM bas coût, autrement dit, présenter les différentes solutions disponibles pour avoir des ONUs les moins coûteux possibles au sens d'installation, d'exploitation et de maintenance.

II.6.1 ONUs achromatiques

Comme nous l'avons vu précédemment, dans le WDM PON, chaque ONU utilise une longueur d'onde différente. Une des difficultés majeures que rencontrent les gestionnaires de réseaux WDM PON est sans aucun doute celle du stockage. En effet, lorsque les installateurs mettent en place un réseau de 10, 20 ou 30 canaux, cela signifie qu'ils doivent avoir un laser pour chaque longueur d'onde et que chaque laser doit être disponible en cas de défaillance technique, ceci implique d'avoir en stock d'inventaire un grand nombre de lasers différents à gérer. De plus lors de l'installation ou de la réparation de l'ONU, il est nécessaire de choisir le laser adapté parmi l'inventaire et ceci constitue un coût non négligeable.

La condition principale pour avoir un WDM PON bas coût est donc d'avoir un ONU achromatique, c'est-à-dire indépendant de la longueur d'onde ("colorless").

La Figure II.7 illustre un exemple de WDM PON avec des ONUs achromatiques.

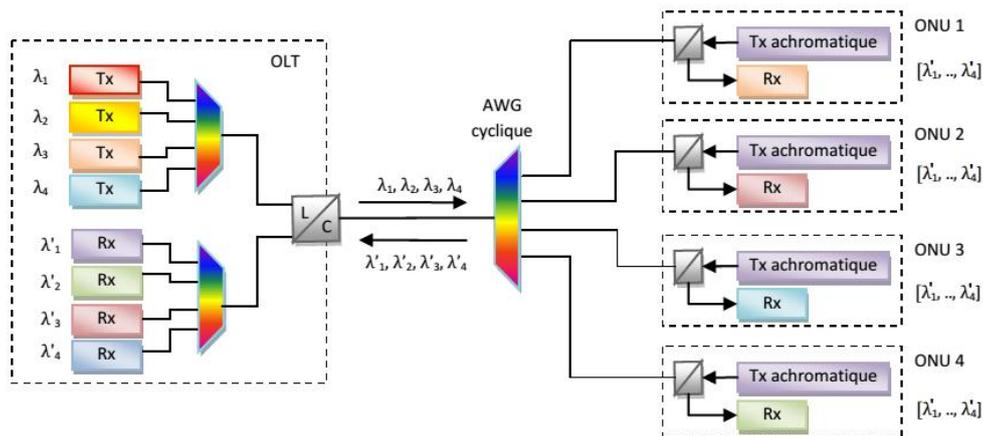


Figure II.7: un WDM PON utilise des ONUs achromatiques[24].

Comme on peut le constater sur cette figure II.7, les émetteurs à l'ONU sont tous identiques et indépendants en longueurs d'onde.

II.6.2 Les intérêts des ONUs achromatiques

L'architecture WDM PON intégrant des ONUs achromatiques présentent plusieurs avantages que je vais les citer par la suite :

- **La réduction du coût:** Le fait d'avoir des modules identiques à chaque ONU permet de profiter de la production de masse pour diminuer les coûts. De plus, cela réduit nettement la complexité de la maintenance en cas de problème de module puisqu'il suffit de le remplacer par n'importe quel autre module.
- **Augmentation de débit :** Pour satisfaire la demande future de fournir une capacité de bande passante de l'ordre du Gb/s à chaque abonné, le PON WDM flexible en longueur d'onde est un des candidats les plus prometteurs. La possibilité de superposer plusieurs canaux (plusieurs longueurs d'onde) permet d'obtenir une bande passante globale élevée et donc un débit agrégé total élevé.
- **Flexibilité:** Grâce à la propriété d'accordabilité en longueurs d'onde de l'émetteur et du récepteur à l'ONU et moyennant un programme de gestion de ressources à l'OLT, le réseau d'accès optique devient flexible en longueurs d'onde.
- **Protection du réseau :** Dans l'approche actuelle, si une interface PON TDM est défaillante, tous les clients raccordés à l'arborescence correspondante voient leurs services interrompus. Avec la solution PON WDM flexible, une réorganisation des longueurs d'onde des clients permet de résoudre ce problème comme l'illustre la figure II.8 ci-dessous.

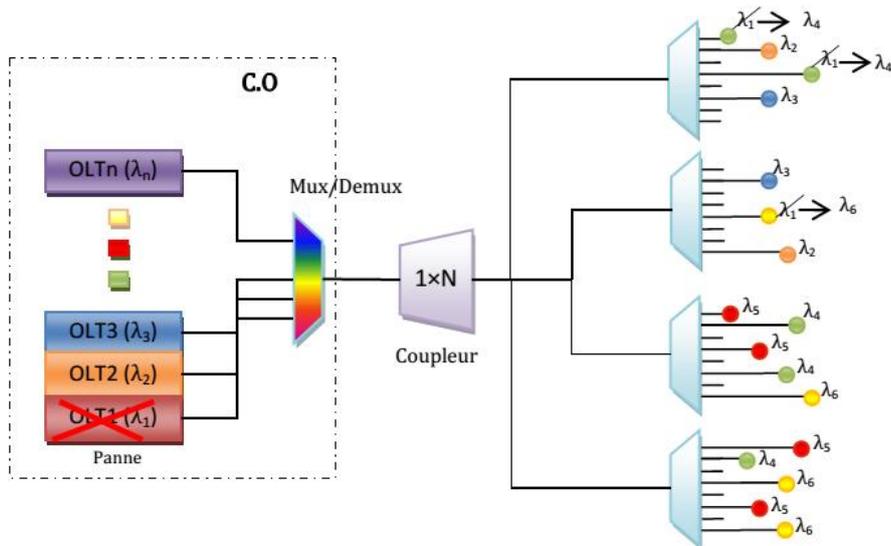


Figure II.8: Réarrangement des longueurs d'onde en cas de panne [24].

II.6.3 Émetteur pour ONU achromatique

Rappelons que le concept achromatique dans un système d'accès WDM signifie que tous les émetteurs sont identiques quelque soit la longueur d'onde émise. Comme nous l'avons déjà dit dans le paragraphe précédent, ce fonctionnement achromatique permet une flexibilité, une simplicité dans la gestion des équipements et des longueurs d'onde; cela permet aussi une fabrication et un déploiement de masse des composants d'accès. On distingue deux grandes techniques utilisées pour obtenir le fonctionnement achromatique : à base de composants à émission directe et celui à base de modulateurs réflectifs (modulation déportée).

- Le composant à émission directe "génère" la porteuse optique (la longueur d'onde cohérente ou incohérente) lui même sans besoin d'une source optique externe.
- Le modulateur réflectif joue le rôle d'un modulateur externe qui ne génère pas lui même la porteuse optique et donc nécessite une source externe qu'on appelle « générateur de longueurs d'onde », ou le "seeding wavelengths" en anglais. Contrairement à des modulateurs externes ordinaires de types Mach-Zehnder et EAM, le modulateur réflectif fonctionne en configuration "réflexion", c'est-à-dire que le signal optique entre dans le modulateur et sort par le même port optique grâce à la haute réflectivité de la facette arrière.

II.6.4 Composants à émission directe

II.6.4.1 Laser accordable

La solution la plus simple pour avoir un émetteur achromatique est d'utiliser un laser accordable parce qu'il offre de meilleures performances grâce à son faible largeur de raie, le faible bruit d'intensité, la capacité de moduler à haut débit et avec de fortes puissances d'émission grâce à l'absence de l'atténuation due aux pertes de découpage spectral comme dans les solutions large bande (voire plus loin).

Néanmoins, l'utilisation du laser accordable reste encore une solution très couteuse pour le réseau d'accès. Donc, ces technologies de lasers accordables sont considérées comme une solution ultime pour le réseau d'accès WDM quand leur coût sera significativement optimisé.

Des solutions économiques sont envisagées, aujourd'hui, telles que :

- Laser DFB (Distributed Feedback Laser) contrôlé en température.
- Laser DBR (Distributed Bragg Reflector) accordable en longueur d'onde.
- Le laser VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) accordable.
- Le laser à cavité externe ECL (External Cavity Laser) à coût optimisé pour les applications dans le réseau d'accès.

A. Lasers à rétroaction distribuée (DFB)

Contrairement aux lasers FP où la rétroaction provient de la réflexion aux facettes, les lasers DFB, comme le nom l'indique, ont une rétroaction qui n'est pas localisée, mais distribuée tout au long de la cavité. Comme l'illustre la figure II.9, cela se traduit par l'utilisation d'un réseau gravé dans une couche de semi-conducteur.

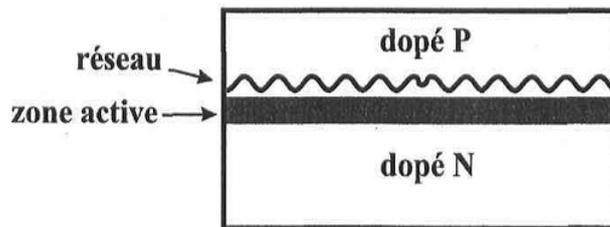


Figure II.9 : Structure d'un laser DFB [38].

Cette perturbation périodique de l'indice de réfraction a alors pour effet de coupler les ondes électromagnétiques contre-propagatives. La sélectivité de la cavité du DFB provient alors de la condition de Bragg [29] qui énonce que le couplage cohérent ne se fait qu'à la longueur d'onde de Bragg λ_b , telle que la période Λ du réseau respecte l'équation où $m \in \mathbb{Z}$ est l'ordre de diffraction Eq. 2.1.

$$\Lambda = \frac{m \times \lambda_b}{2n} \quad (2.1)$$

Par contre, les lasers DFB sont très stables et difficiles à accorder. En général, ils sont accordés en température à raison de $0.08\text{nm}/^\circ\text{C}$ ce qui nécessite donc 10°C pour changer de canal sur la grille ITU¹. Cette solution accordable est très intéressante en termes de coût parce qu'elle est toujours basée sur la technologie DFB bien maîtrisée aujourd'hui. Évidemment, cela ne leur procure qu'une très faible plage d'accordabilité, étant donné qu'un changement de 4 canaux nécessite 40°C changement de température [30]. Aussi, le débit de transmission offert par ce composant est seulement de $1,25\text{ Gbit/s}$ à cause de la bande passante de modulation du laser DFB. La figure II.10 présente un module d'émission à base de laser DFB accordable en longueur d'onde contrôlé en température développé par NTT [31].

¹ Dans la bande C, les canaux sont espacés de 100 GHz, ce qui correspond approximativement à 0.8 nm.

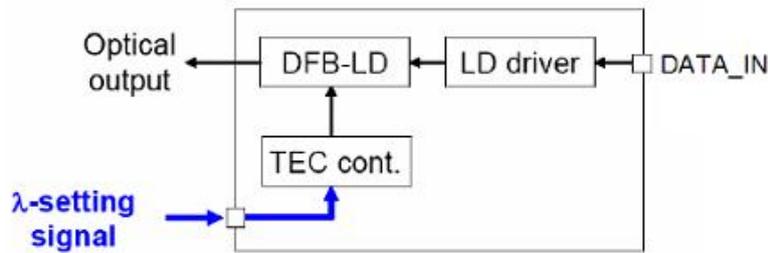


Figure II.10 : Laser DFB accordable par l'ajustement de la température [31].

Les DFB ne pouvant pas être accordés sur de grandes plages de longueur d'onde, l'enjeu des lasers accordables a donc orienté bon nombre de chercheurs à développer des matrices de DFB pouvant délivrer 10 canaux différents [25], tirant avantage de leur fiabilité.

Cependant, bien que cette solution ait comme problème l'approche lithographique de haute précision et le recouplage des guides d'onde dans une unique fibre optique, elle a suscité de nombreuses démonstrations [32] [33] [34], dont certaines ont pu éliminer le problème du recouplage en plaçant les DFB en cascade [35]. En combinant des DFB en cascade, des plages d'accordabilité de 22 canaux ont pu être atteintes [36], des travaux ont montré la possibilité d'obtenir 135 canaux [37]. Il suffit ensuite de sélectionner électriquement le bon DFB (et d'éteindre les autres) et la bonne température pour obtenir la longueur d'onde désirée en sortie.

B. Lasers à réflecteurs de Bragg distribués (DBR)

Les lasers DBR sont vraisemblablement un des types de laser ayant le plus attiré l'attention pour les lasers accordables. Leur technologie est si proche de celle des DFB qu'ils sont parfois confondus [39] et l'on parle souvent d'approche DFB pour nommer les lasers DBR.

La différence avec la technologie DFB, dans un laser DBR, le guide actif et le réseau de Bragg sont séparés sur deux sections différentes. La différence avec la technologie DFB est que les réflecteurs ne sont pas dans le milieu de gain (couche active). Ainsi, les DBR sont plus proches des cavités laser habituelles constituées d'un milieu de gain et de réflecteurs. La figure II.11 représente une structure de laser au réseau de Bragg super-structuré SSG-DBR accordable en longueur d'onde [40].

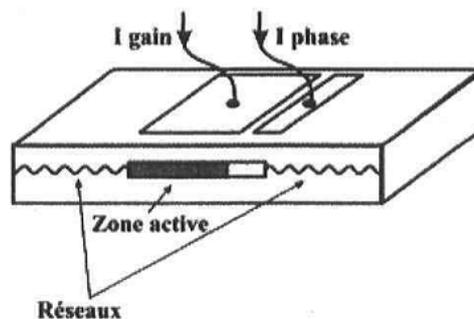


Figure II.11 : Cavité typique d'un laser SSG-DBR [40].

Cette structure SSG-DBR est composée de 4 sections dont : une section active, une section de phase pour ajuster la longueur d'onde, puis les 2 réseaux réflecteurs avant et arrière à chaque extrémité. L'ajustement en longueur d'onde se fait soit par changement de température, soit en ajustant la phase dans la cavité par injection de courant. Le contrôle électrique permet un contrôle grossier de la longueur d'onde grâce au courant injecté dans le réseau de Bragg et un contrôle fin grâce au courant injecté dans la zone de phase.

Ces lasers complexes permettent d'obtenir de très bonnes performances en termes de plage spectrale d'accordabilité puisqu'elle atteint 72 nm soit 180 canaux ITU espacés de 50 GHz. Généralement permet un débit de l'ordre de 1,25 Gb/s en modulation directe. Il est difficile de monter le débit jusqu'à 10 Gb/s, car ces technologies sont basées sur la modulation directe pour laquelle la faible bande passante de modulation, le faible taux d'extinction et le chirp sont des facteurs limitants.

C. Diodes laser à cavité externe (ECDL : External Cavity Diode Laser)

Une autre approche très répandue fait appel à une accordabilité mécanique. Malgré l'utilisation de pièces mobiles, cette méthode d'accordabilité a pour avantage: de couvrir continûment de très grandes plages de longueur d'onde sur 40 nm, de supporter de fortes puissances de sortie de 20 mW [28], d'être précise en longueur d'onde, d'émettre des raies fines et d'avoir une bonne suppression des modes indésirables. D'une manière générale, le laser à cavité externe [42] est composé d'un miroir, d'un milieu présentant du gain (une diode laser) et d'un réseau de diffraction dont l'angle d'incidence varie pour réaliser l'accordabilité. Le schéma de figure II.12 ci-dessous illustre le principe d'un ECL.

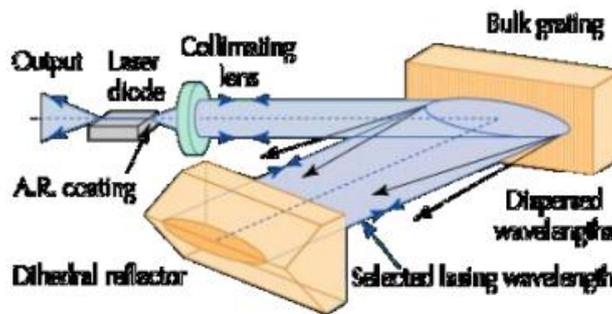


Figure II.12: Laser à cavité externe (EDL).

À cause de son importante longueur de cavité laser (quelques centimètres) il est incompatible avec une modulation directe rapide : le temps d'aller-retour dans la cavité n'est pas compatible avec la stabilité de l'effet laser lors de la variation de courant de la diode laser. Un modulateur externe est alors nécessaire pour les applications aux télécommunications.

Toutefois, il est récemment apparu une structure de laser à cavité externe compatible avec une modulation directe à 2,5 Gbit/s comme nous le voyons sur la figure II.13 [41]. Cette solution a pour particularité de réduire la taille de la cavité en introduisant un réseau de Bragg inscrit dans un guide en polymère couplé à la diode laser.

La simplicité de cette structure laser permet d'envisager un coût faible. Des performances en accordabilité sur une plage de 26 nm sont obtenues à l'aide d'une électronique de contrôle de la température (TEC : Thermo-Electric Cooler), ceci est obtenu en ajustant la température appliquée au guide polymère (le réseau de Bragg) via le "heater".

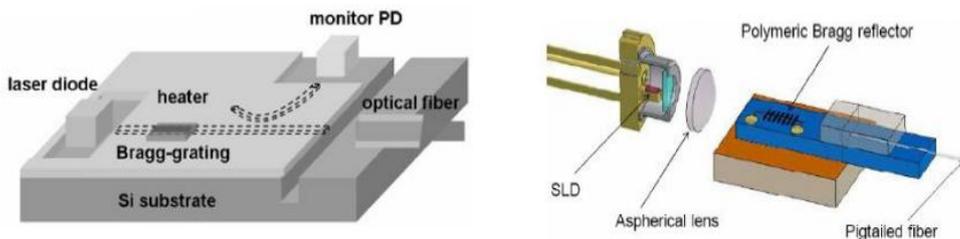


Figure II.13 : ECL compatible avec un débit de 2,5 Gbit/s [41].

D. Lasers à cavité verticale (VECSEL)

Depuis les années 1990, les lasers VECSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) sont une alternative aux lasers conventionnels émettant latéralement et sont comparables aux lasers DBR. En effet, au lieu d'avoir des couches réfléchissantes sur le côté du dispositif, les miroirs d'un VECSEL sont situés au-dessus et en dessous du semi-conducteur. L'émission laser est alors verticale, comme le nom l'indique, plutôt qu'horizontale. Son principe est décrit dans la figure II.14.

Le laser VCSEL peut lui aussi être utilisé comme un émetteur accordable facilement modulé directement à des taux supérieurs à 10 Gbit/s [43]. Cette solution accordable est aussi moins coûteuse grâce à la réalisation moins complexe, la simplicité de couplage optique et la faible consommation électrique (faible courant).

Malheureusement, étant donné que la cavité laser d'un VECSEL ne contient qu'une très fine couche de semi-conducteur et donc un très petit milieu de gain, la puissance de sortie est très faible pour des dispositifs à 1550 nm, de l'ordre de 100-200 uW pour le laser développé par Bandwidth9.

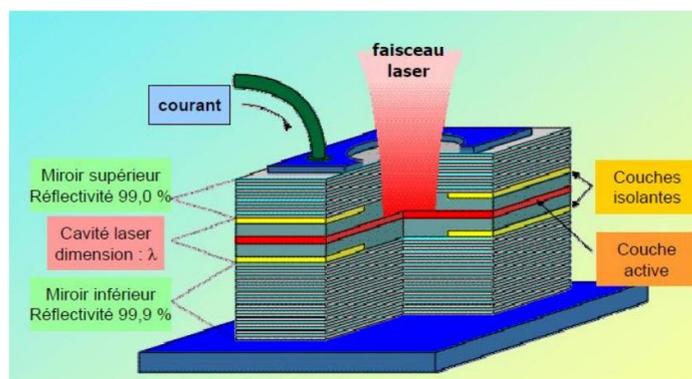


Figure II.14: Structure du laser VECSEL.

II.6.4.2 Les sources large bande et le découpage spectral

Parmi les autres solutions abordées dans les réseaux WDM PON est l'utilisation de source large bande comme émetteur à chaque ONU afin de préserver la notion d'achromatique. Chaque ONU émet donc le même spectre, mais seule une partie du spectre est filtrée par le multiplexeur, et la partie filtrée dépend du port sur lequel est connecté l'ONU.

Ces sources large bande bas coût peuvent être modulées en direct (modulation du courant), sans recours à un modulateur externe, les plus utilisées dans les WDM PON sont :

- SLD ou SLED : Superluminescent Light Emitting Diode.
- Les amplificateurs optiques à semiconducteur (SOA).
- La diode laser Fabry-Perot multimode.

A. Les diodes superluminescentes (SLED)

Les diodes superluminescentes sont des LED (Light Emitting Diode) avec un spectre d'émission plus large et une puissance de sortie beaucoup plus importante. Elles sont destinées à l'origine au secteur médical (tomographie optique cohérente). De plus en plus de fabricants sont désormais sur le marché des télécommunications optiques [46]. Les SLED sont de plus en plus puissantes et peuvent occuper toutes les plages spectrales entre 1260 nm et 1640 nm. DenseLight Semiconductor [47] commercialise des SLED en boîtier Butterfly avec une puissance de sortie de 18 dBm, sur la bande C (1525nm-1565nm). Le spectre n'est pas plat et ces sources ne sont pas modulables.

Par contre, une autre famille de SLED commercialisée toujours par DenseLight est moins puissante (jusque 25 mW), mais modulable à une fréquence maximale de 600 MHz voire 1 GHz est a priori possible. On rappelle ici que la consommation en courant des SLED est importante : c'est au minimum 300 mA pour avoir les puissances optiques maximum (15 à 25 mW), mais le prix d'une SLED est faible (équivalent à un SOA) et va certainement chuter avec l'augmentation des volumes de production.

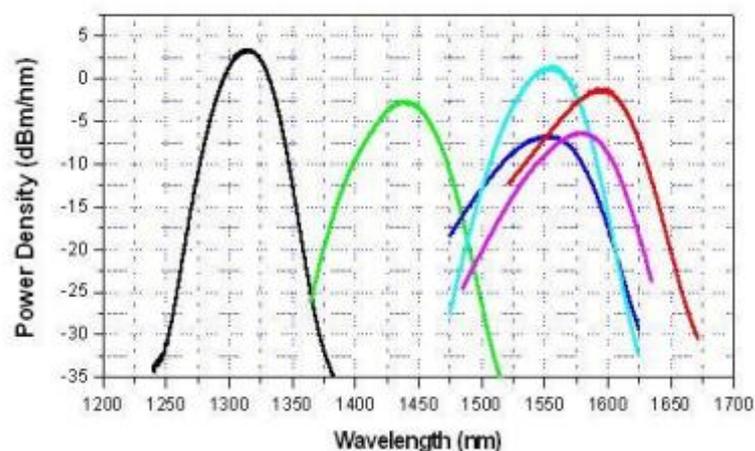


Figure II.15: SLED offrant une plage spectrale large entre 1260 nm et 1640 nm [47].

L'utilisation d'une source large bande de type SLED à modulation directe a été démontrée pour un débit de 1,25 Gb/s sur 10 km de fibre standard SMF, mais la longueur d'onde d'émission est à 1,31 μm pour laquelle la dispersion chromatique est quasi-négligeable [44]. À la longueur d'onde de 1,55 μm , il a été démontré qu'un débit jusqu'à 1 Gb/s est obtenu grâce à la technique de modulation multi-porteuse OFDM, mais le budget optique supporté est encore limité [45].

B. Les amplificateurs optiques à semiconducteur SOA

Le SOA est généralement utilisé comme amplificateur lorsqu'un signal optique lui est injecté en entrée. Mais sans injection optique en entrée, le SOA se comporte comme une source large bande par émission spontanée amplifiée (ASE). La largeur du spectre est environ 30 nm, mais peut être centrée sur n'importe quelle longueur d'onde entre 1300 nm et 1600 nm selon la composition du SOA. Il y a un compromis entre la puissance de sortie d'un SOA et la vitesse de modulation: il faut une cavité de longueur importante pour avoir une puissance de sortie importante et une cavité courte pour pouvoir moduler rapidement. La puissance de sortie du SOA dépend aussi du courant électrique qui lui est injecté: avec un SOA dédié à l'amplification, 250 mA permettent de sortir 10 à 14 dBm de puissance optique [43]. Il existe des SOA modulables par le courant, cependant cette modulation est réalisable avec des puissances de sortie plus faibles (environ 2dBm).

Dans le réseau d'accès, depuis plus de 10 ans, le SOA a attiré beaucoup l'attention de plusieurs chercheurs en tant que source ONU achromatique et rentable pour les applications WDM-PON. L'auteur de [49] a présenté des systèmes WDM PON utilisent le SOA comme générateur de la porteuse de la voie montante modulée à des débits de 2,5 Gb/s et 5 Gb/s. Par ailleurs, un débit remontant aussi élevé que 10 Gbit/s a été démontré avec l'aide de l'égalisation électrique ou en utilisant le format de modulation avancé [50].

C. Le laser Fabry-Perot multimode (FP)

Un laser Fabry-Perot est un oscillateur laser constitué seulement d'un milieu de gain (semiconducteur, par exemple) et de deux miroirs (espacés d'une distance L), dont l'un est semi-réfléchissant afin d'évacuer la puissance laser.

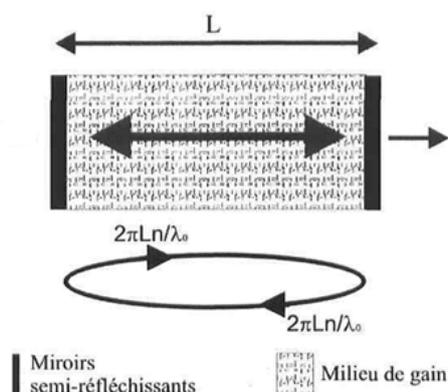


Figure II.16 : Cavité laser FP [51].

La cavité laser en tant que telle ne permet pas à toutes les ondes électromagnétiques d'osciller. Le milieu de gain doit tout d'abord être efficace à la longueur d'onde de l'onde, et l'onde doit remplir la condition de phase de la cavité Eq. 2.2.

$$\lambda = \frac{2nL}{N} \quad (2.2)$$

Où L: la distance entre les miroirs.

N : un nombre entier.

Mais ce résonateur supporte aussi des longueurs d'onde égales à :

$$2nL / (N \pm 1), 2nL / (N \pm 2), 2nL / (N \pm 3), \dots$$

Autrement dit, toutes les longueurs d'onde dont la différence de marche est un multiple entier relatif de la longueur d'onde peuvent exister. Mais, le milieu actif ne peut amplifier qu'une petite gamme de longueurs d'onde satisfaisant la condition de l'énergie-gap ($\lambda < hc/E_g$). Donc, le résonateur ne peut maintenir seulement que quelques longueurs d'onde résonantes appelées les modes longitudinaux du laser, ceci est montré dans la figure II.17.

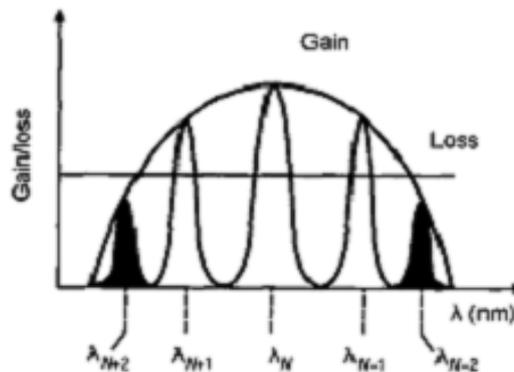


Figure II.17: Modes longitudinaux dans un laser FP.

L'article [52] a démontré que seulement un débit de 155 Mbit/s a été obtenu sur une distance de transmission de 20 km quand le laser Fabry-Perot est utilisé comme source large bande. Cette limitation est due au bruit de battement de la source large bande qui peut être contournée en utilisant des lasers Fabry-Perot à boîtes quantiques QD (Quantum Dot), qui sont très développés aujourd'hui [27].

D. Découpage spectral (spectrum slicing)

Le « découpage spectral » appelé communément « Spectrum Slicing » son principe consiste à utiliser une source large bande comme émetteur à chaque ONU. Chaque ONU émet donc le même spectre, mais seule une partie du spectre est filtrée par le multiplexeur optique ou un AWG (N vers 1). N sources larges bandes sont connectées sur N ports de l'AWG pour obtenir N longueurs d'onde à la sortie. Ces longueurs d'onde ont une largeur spectrale fixée par le filtre de l'AWG et dépend du port sur lequel est connecté l'ONU. C'est une solution bas-coût car elle ne requiert qu'un type de source large. Le hachage est obtenu par l'AWG existant dans le PON WDM.

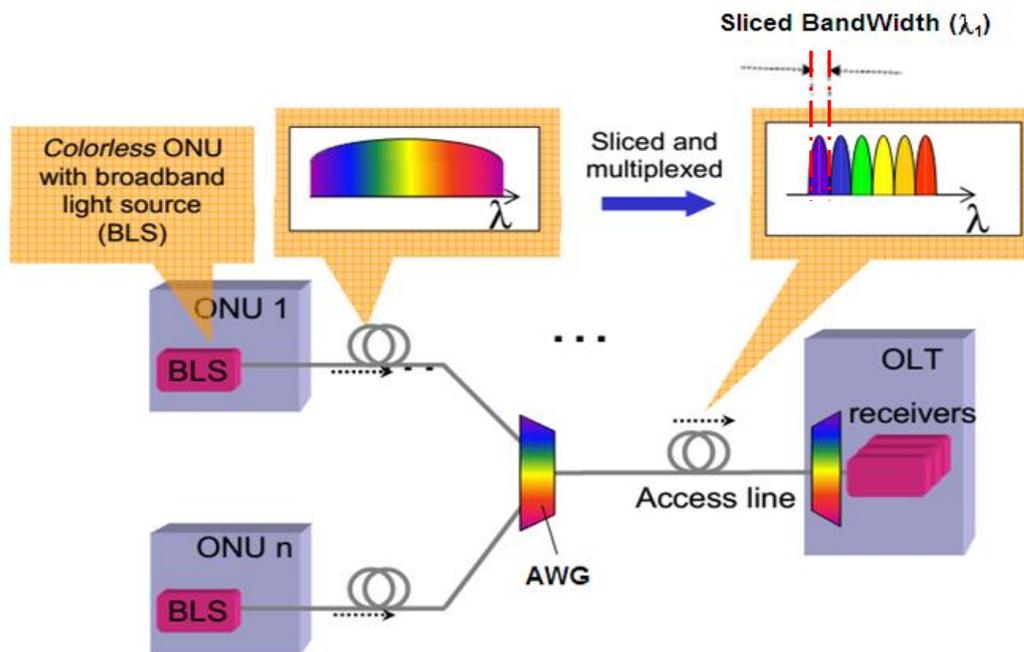


Figure II.18: Principe « Spectrum Slicing » d'une source large bande.

Cette technique de « Spectrum Slicing » est intéressante, car :

- elle est simple à réaliser
- son coût d'implémentation est très faible
- les composants à semi-conducteur de types SLED, SOA ou laser Fabry-Perot ne sont pas coûteux
- le contrôle en température n'est pas nécessaire.

D'autre part, cette solution fondée sur l'utilisation des sources large bande découpées spectralement est confrontée à certaines difficultés telles que :

- les très grandes pertes optiques liées au découpage spectral
- la faible bande passante électrique de la source large bande
- la très grande largeur spectrale de la porteuse optique incohérente
- le bruit de battement important de la source large bande.

II.6.5 Émission à base de modulateurs réfléchifs (Modulation déportée)

L'idée de la modulation déportée est de remplacer l'émetteur par un modulateur à l'ONU. Le principe est d'envoyer une longueur d'onde non modulée à partir du OLT, qui va être routée par le réseau jusqu'à l'ONU, de moduler cette longueur d'onde avec les données montantes, et de renvoyer ce signal modulé vers le central. Il suffit de choisir un composant qui permet de moduler la longueur d'onde sur une large plage spectrale pour obtenir un ONU achromatique. Ce concept achromatique a été largement étudié, développé, voire commercialisé par certains fabricants. La figure II.19 résume l'architecture d'un WDM PON à base de modulateurs réfléchifs.

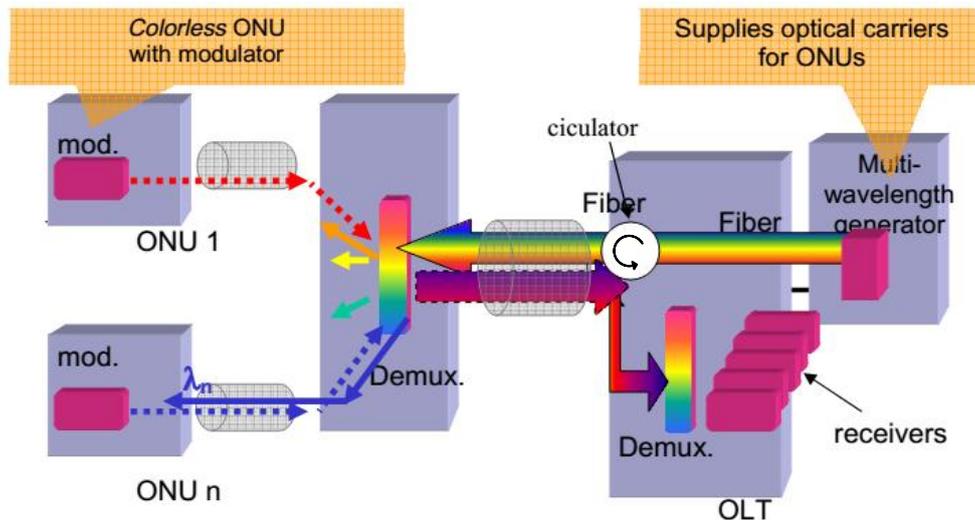


Figure II.19: WDM PON utilise le principe de modulation déportée.

Il existe plusieurs composants possibles pour effectuer cette modulation déportée: les modulateurs à électro-absorption en réflexion (R-EAM), les lasers Fabry-Pérot à verrouillage par injection optique (IL-FP: Injection locked Fabry-Pérot) et les amplificateurs optiques à semiconducteur en réflexion (R-SOA).

II.6.5.1 Laser Fabry-Perot verrouillé par injection optique (IL-FP)

On a vu dans la partie II.6.4.2.C que le laser Fabry-Perot génère plusieurs modes séparés en fréquence. Ce caractère multimodal interdit toute utilisation comme émetteur à modulation directe pour la transmission à haut débit sur une portée typique du réseau d'accès, à cause de la dispersion chromatique de la fibre. Cependant, grâce à au phénomène optique le "verrouillage par injection optique" [53], qui consiste à injecter optiquement une source externe mono-fréquentielle dans le laser Fabry Perot, on force le laser à osciller en régime monomode. On obtient ainsi un laser Fabry Pérot verrouillé par injection ou IL-FP (Injection-Locked Fabry-Perot).

Ce composant est constitué d'une diode laser traitée anti reflet d'un côté, d'un miroir pour fabriquer un Fabry-Pérot et d'un cristal photo-réfractif à l'intérieur de la cavité.

Avec la modulation du courant électrique injecté dans la cavité Fabry Perot, on applique la modulation sur le gain d'amplification du laser IL-FP, de cette manière on obtient un émetteur monomode modulable optiquement, pourrait être utilisé à l'ONU avec un adressage optique à partir de l'OLT, cette technique peut être très intéressante dans le cadre du réseau d'accès WDM.

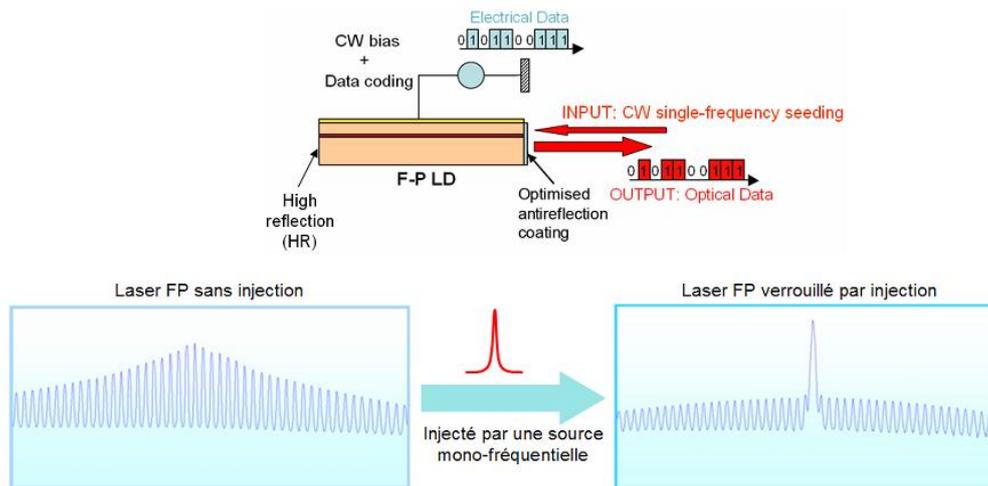


Figure II.20 : Principe de fonctionnement d'un laser IL-FP et un exemple de spectre optique [54].

Généralement, les ONU achromatiques fondés sur les lasers IL-FP utilisent des sources d'injection incohérente à base de SLED [55] ou OSA [56]. Cette solution basse coût a été fortement développée [55] [57] [58], voire commercialisée par LG-Nortel Novera, à des débits de 125 Mb/s et 1,25 Gb/s [59]. Il y a eu récemment une démonstration à 2,5 Gbit/s, mais uniquement en voie descendante [60].

Un fonctionnement est possible à 10 Gbit/s en utilisant l'injection cohérente [61], mais la puissance nécessaire pour l'injection ainsi que la forte dépendance à la polarisation rend l'implémentation dans le réseau d'accès limitée.

II.6.5.2 Amplificateur optique à semi-conducteur en réflexion (RSOA)

Un RSOA est en fait 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 réflexions et qu'il peut être modulé. La modulation est appliquée sur le gain d'amplification du RSOA via le courant de polarisation. Le RSOA permet donc de moduler le signal qui lui est injecté, de l'amplifier et de le réfléchir.

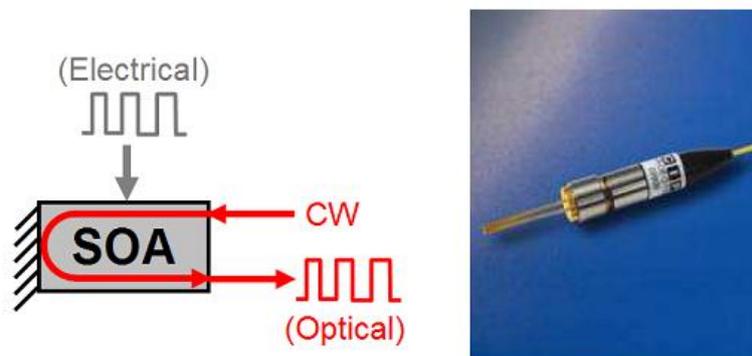


Figure II.21 : Principe de fonctionnement d'un RSOA et composant packagé réalisé par CIP [62].

Contrairement à un IL-FP, le RSOA fonctionne en régime d'amplification alors que l'IL-FP fonctionne en régime laser. Donc, le RSOA peut éviter la forte dépendance en fréquence du signal injecté. Aussi, le RSOA permet un fonctionnement insensible à la polarisation [63]. De plus, RSOA permet une forte puissance d'émission jusqu'à 11 dBm et un très grand gain d'amplification jusqu'à 30 dB ont été rapportés dans [64] pour le RSOA à base de du matériau InGaAsP.

Comme pour le cas d'un IL-FP, l'utilisation des RSOA injectés par une source large bande incohérente est considérée comme une solution très économique [65]. Mais à cause du fort bruit d'intensité de la source large bande, le débit est généralement limité à 1,25 Gb/s. Il y a eu une démonstration à 2,5 Gb/s [66], mais avec des performances très limitées : très forte puissance optique injectée, portée limitée à 10 km et plancher d'erreurs important à cause du bruit.

Avec l'injection cohérente, le RSOA est un candidat favori pour une architecture hybride WDM/TDM-PON à longue portée grâce à son gain d'amplification élevé, en plus peut fonctionner simplement à 2,5 Gb/s. Le fonctionnement à 10 Gb/s d'un RSOA a été récemment démontré en utilisant la structure à une seule section [67]. Aussi, l'utilisation de techniques de traitement électronique telles que l'égalisation et le code correcteur d'erreur permet un fonctionnement du RSOA à 10 Gb/s [68].

II.6.5.3 Modulateur électro-absorbant en réflexion R-EAM (R-EAM-SOA)

Comme on a cité dans les paragraphes précédents, la montée à 10 Gb/s sans assistance des techniques de traitement électronique est encore difficile pour les composants IL-FP et RSOA. Pour cela, le modulateur électro-absorbant en réflexion ou R-EAM (Reflectif ElectroAbsorption Modulator) [62] [63] [64] a été proposé pour les applications aux réseaux d'accès WDM. Les performances en modulation de ce composant sont supérieures à celles d'un IL-FP et d'un RSOA grâce à l'effet électro-absorbant. Il présente une large plage de fonctionnement en longueur d'onde de 30 nm et que son fonctionnement est indépendant de la polarisation du signal injecté. Il permet donc une très grande bande passante de modulation (> 10 GHz), un taux d'extinction très important (> 10 dB à 10 Gb/s) ainsi qu'un très faible chirp.

Le principe de fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un semi-conducteur soumis à un champ électrique [69].

La limite de cette technique vient des pertes d'insertion du modulateur (10 dB au minimum); or le signal doit faire un aller-retour OLT-ONU-OLT, ce qui fait un budget de liaison difficile, voire impossible à tenir. Un SOA est donc généralement associé au R-EAM pour compenser ces pertes. Des dispositifs sont en cours d'élaboration chez certains fabricants [69] [70], intégrant sur le même substrat un R-EAM avec un SOA pour but de réaliser le modulateur électro-absorbant amplifié en réflexion R-EAM-SOA afin d'avoir un composant minimisant les pertes de couplage et pouvant donc avoir du gain optique.

Le principe de fonctionnement de ce composant est schématisé dans la figure II.22. La section EAM avec la facette en arrière à haute réflectivité joue le même rôle qu'un R-EAM, tandis que le SOA double l'amplification et donc compenser les fortes pertes

de la section EAM car il sert à la fois de préamplificateur du signal injecté et de post-amplificateur du signal modulé.

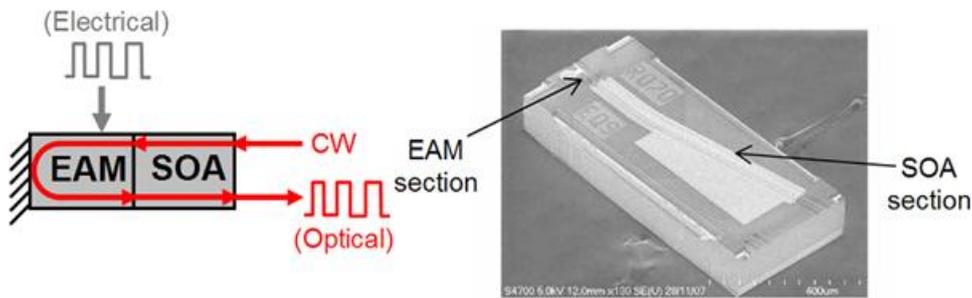


Figure II.22 : Principe de fonctionnement d'un R-EAM-SOA et une structure réalisée par CIP [62].

L'utilisation de R-EAM-SOA pour un fonctionnement à 10 Gb/s nécessite une source d'injection cohérente à base de lasers DFB. Pour une source d'injection large bande à découpage spectral, à cause du bruit d'intensité et de la dispersion chromatique, le débit sera très limité et c'est difficile d'atteindre les 10 Gb/s.

II.7 Principales architectures de mise en œuvre du réseau WDM PON

Ce paragraphe regroupe les techniques les plus avancées ayant permis de démontrer des architectures de PON WDM avec un débit allant jusqu'au Gigabit/s. On y retrouve les techniques de découpage spectral et de modulation déportées avec IL-FP et RSOA. Ces différentes architectures utilisent la notion d'ONU achromatique.

II.7.1 Architecture à base de découpage spectral (spectrum slicing)

Le réseau WDM PON basé sur le découpage spectral est largement étudié par NTT [92]. Les études théoriques et les résultats ont permis d'évaluer les limites de cette technique:

- La vitesse de modulation est limitée à cause des sources large bande utilisées
- La dispersion chromatique de la fibre limite la portée de transmission.

Les travaux menés par le cadre des références [71] et [72] proposent un PON WDM bidirectionnel basé sur le spectrum slicing. L'architecture fonctionne sur une distance de 10 km avec des SLED modulées à 622Mbit/s dans le sens descendant et des LED modulées à 125 Mbit/s pour le sens montant. Les résultats montrent que cette technique est sérieusement limitée par la dispersion. Pour minimiser le problème, la bande de longueurs d'onde autour de 1,3 μm est utilisée, associée à de la pré-compensation électronique de dispersion.

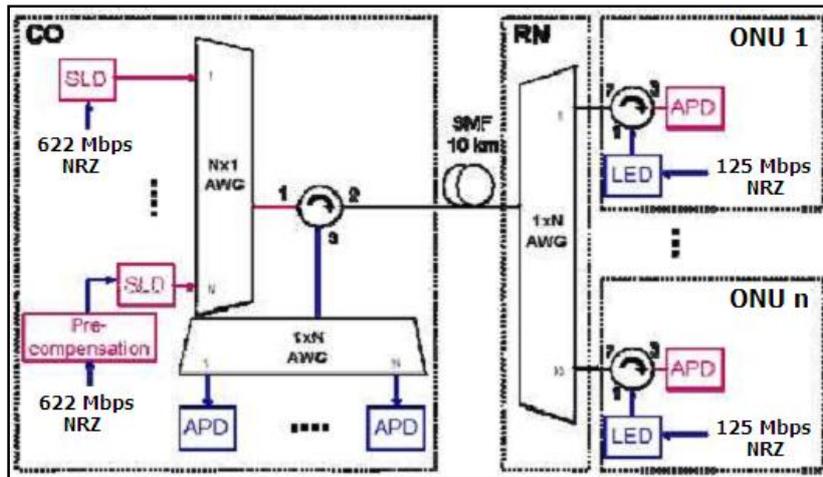


Figure II.23 : WDM PON utilise le découpage spectral optique [71].

II.7.2 Architecture à base de modulation déportée avec IL-FP

Dans cette solution, les IL-FP sont utilisés à la fois dans les ONUs et à l'OLT. Deux bandes de longueurs d'onde sont utilisées, l'une pour les signaux montants l'autre pour les signaux descendants. Certains utilisent la bande C et la bande S avec des sources larges à base de SOA spécialement conçus pour avoir un seuil de saturation très haut (~15 dbm) [73].

Les études montrent que la montée en débit dans le Fabry-Pérot est liée principalement à la puissance optique injectée nécessaire pour le verrouiller. Cette puissance est importante, d'autant plus que l'injection se fait généralement par une source large incohérente. Le fonctionnement à 155Mbit/s nécessite selon les publications [74, 75] un niveau d'injection de l'ordre de -15 dBm à -10 dBm. En effet le fait que la vitesse de modulation dépende du niveau de puissance optique injecté fait qu'il n'est pas possible d'augmenter à la fois la distance de propagation et la vitesse de modulation. Pour augmenter le débit de 100 Mbit/s à 1 Gbit/s, il faut injecter plus de puissance. Il est possible de garder la même distance entre OLT et ONU, c-à-d. 20 km, en prenant une source large plus puissante et en augmentant la largeur spectrale des canaux WDM, par conséquent le nombre de longueurs d'onde diminue, donc moins d'ONUs sont connectés.

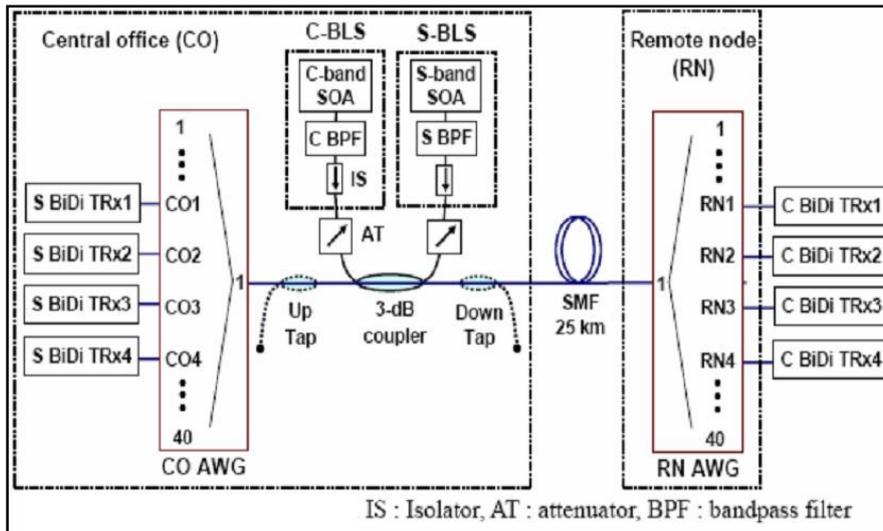


Figure II.24: Architecture d'un WDM PON à base d'IL-FP [73].

II.7.3 Architecture à base de RSOA

Cette architecture repose sur l'utilisation de RSOA sur l'ONU pour moduler les données montantes sur une porteuse générée au niveau de l'OLT. Un second laser à l'OLT est utilisé pour moduler les données descendantes.

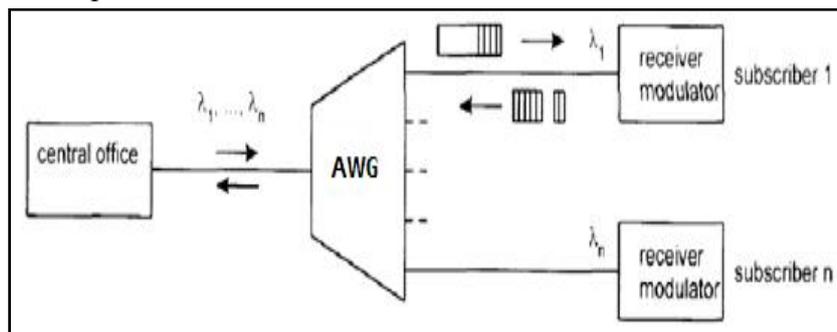


Figure II.25: WDM PON basé sur des RSOA à l'ONU [76].

Cette technique est très proche de la modulation déportée avec les lasers FP verrouillés par injection. L'avantage des RSOA est sa propriété d'amplification et ses capacités en vitesse de modulation potentiellement supérieures.

II.7.4 Architectures avec re-modulation du signal descendant

Les solutions basées sur le principe d'utiliser des ONUs achromatiques décrites précédemment impliquent généralement d'utiliser deux longueurs d'onde par utilisateur: une pour le sens montant et l'autre pour le sens descendant afin de bien séparer chaque flux.

Des études ont donc été menées pour trouver des solutions permettant d'utiliser une seule longueur d'onde par ONU au lieu de deux. L'idée est donc de réutiliser la longueur d'onde transportant le signal descendant pour générer le signal montant. Plusieurs techniques ont donc été proposées ayant généralement pour principe d'utiliser un format de modulation particulier sur le signal descendant afin que ce

signal puisse être re-modulé avec une modulation d'amplitude de façon classique pour le sens montant.

Le principe de cette technique est d'utiliser un modulateur au niveau de chaque ONU, pour moduler les données montantes en récupérant une partie du signal optique descendant et le réinjecter dans le modulateur EAM ou MZM.

Cette architecture sera utilisée dans la suite de ce document, car elle permet de minimiser le coût des ONUs en évitant d'utiliser des sources optiques au niveau des ONUs.

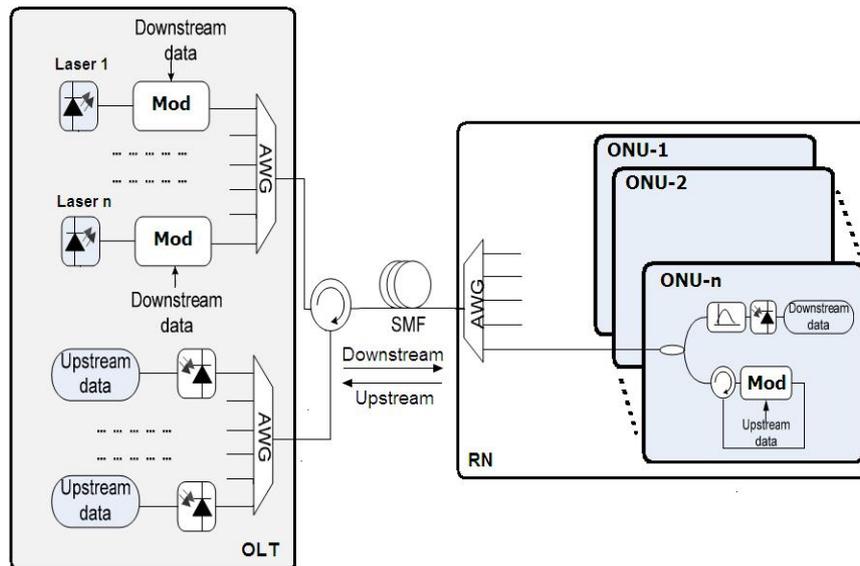


Figure II.26: WDM PON bidirectionnel basé sur le principe de re-modulation à l'ONU.

II.7.4.1 Modulation de phase sur le signal descendant :

La solution décrite dans la publication [77] consiste à utiliser une modulation de phase pour le flux descendant, ce qui a comme intérêt de garder une intensité constante sur la longueur d'onde et de permettre de remoduler celle-ci ensuite en amplitude. Le système de réception consiste en un coupleur 3dB dont l'un des bras va vers le modulateur d'amplitude et l'autre vers le récepteur ONU.

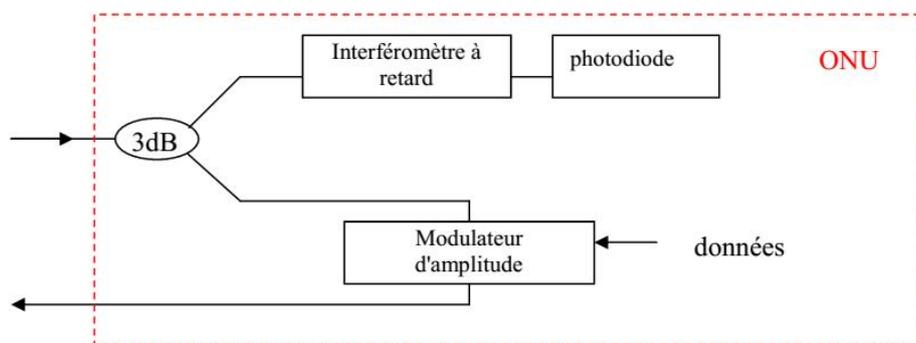


Figure II.27: ONU avec démodulation en phase et remodulation en OOK

Les résultats de cette étude ont montré la possibilité de transmission d'un flux montant remodulé à 2.5 Gbit/s sans erreur sur une distance de 20 km sans compensation de dispersion. Le signal descendant initial est modulé à 10 Gbit/s.

Idéalement le signal descendant PSK ne donne pas de pénalité sur le signal montant grâce à son intensité constante. Néanmoins la dispersion chromatique convertit la modulation de phase en fluctuation d'intensité, ce qui résulte en un crosstalk entre le flux descendant et le flux montant, comme le montre le schéma de la Figure II.28.

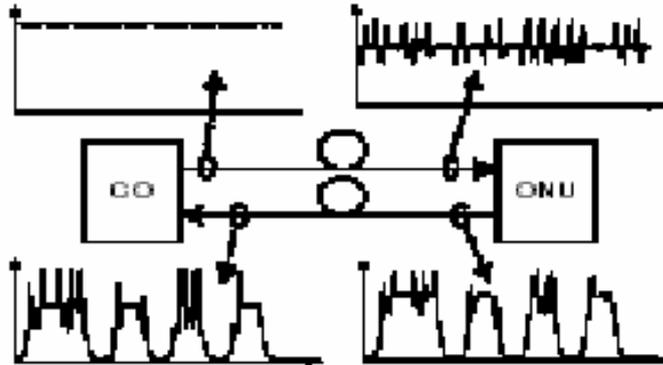


Figure II.28: Impact du signal descendant modulé en phase sur le signal montant.

L'inconvénient de cette solution réside dans le démodulateur PSK qui est un composant non accordable qui est réglé pour un débit bien précis (retard de phase équivalent à la durée d'un symbole), ce qui ne donne pas une architecture évolutive à moins d'imaginer un démodulateur de phase accordable, ainsi son coût, mais les auteurs de [77] proposent d'utiliser des démodulateurs à base d'interféromètre à fibres fusionnées (fused fibre) et des filtres optiques à bandes étroites qui peuvent être bas coûts.

II.7.4.2 Porteuse RF sur le signal descendant :

Cette solution [78] consiste à transporter le signal descendant avec une porteuse RF sur la longueur d'onde et de réutiliser celle-ci pour le flux montant en remodulant le signal en bande de base en OOK par l'intermédiaire d'un laser FP verrouillé par injection. Pour ce faire, il faut d'abord mettre les données sur la porteuse RF grâce à un mélangeur électrique et un oscillateur local à la fréquence voulue. Ensuite il suffit de moduler directement le laser avec ce signal RF.

Des débits de 2.5 Gbit/s en sens descendant et 1.25 Gbit/s en sens montant ont été obtenus avec des fréquences RF entre 6 GHz et 11 GHz. Cette solution est attrayante car elle permet de réutiliser la longueur d'onde descendante avec des performances très bonnes en termes de taux d'erreur. Ces résultats ont été prouvés pour le cas d'une liaison bi-fibre. Des pénalités sont donc à prévoir dans le cas d'une architecture mono-fibre. Mais le plus gros inconvénient réside dans l'utilisation de nombreux composants électriques de réception chez le client, on cite un amplificateur électrique adapté, des filtres électriques supplémentaires et surtout un oscillateur local, qui ne sont pas forcément bas coûts.

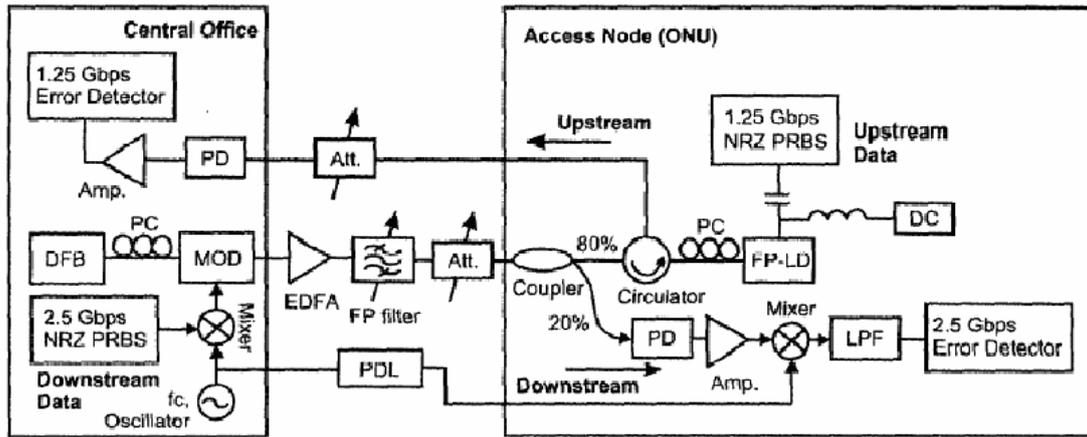


Figure II.29: Montage expérimental de l'architecture avec le signal descendant sur une porteuse RF sur une longueur d'onde qui est remodulée ensuite en OOK.

II.7.4.3 Remodulation avec deux niveaux de taux d'extinction :

Cette architecture montre la possibilité de garder le même format de modulation pour les deux sens de transmission, qu'est l'ASK. La solution a été proposée dans [79] et consiste à moduler le signal descendant avec un faible taux d'extinction et de remoduler au niveau de l'ONU avec un grand taux d'extinction (grâce à un RSOA) et avec un débit moins important.

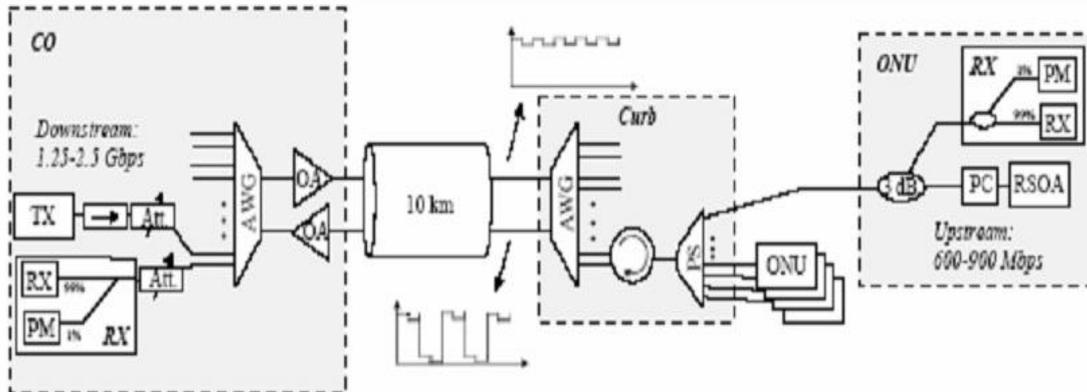


Figure II.30: Architecture avec deux niveaux de taux d'extinction.

Les résultats montrent pour une transmission bi-fibre de 10 km avec un taux de partage de 16 par longueur d'onde, un débit descendant jusqu'à 2.5 Gbit/s et une remodulation à 622 MHz avec un RSOA. Ces résultats ont été prouvés par l'utilisation de codes correcteurs d'erreurs. Cette architecture est très intéressante car très simple, mais des pénalités dues à la bidirectionnalité sont donc à prévoir.

La même technique est utilisée dans [80] où les résultats montrent la possibilité d'atteindre un débit de 2.5 Gb/s en sens descendant et 1.25 Gb/s pour les données montantes. Cette amélioration est due à l'augmentation de la puissance injectée dans le RSOA. Contrairement à l'expérience précédente, dans ce cas, il n'y a pas de partage de la longueur d'onde entre les ONU, c'est-à-dire sans coupleur, donc amélioration du budget optique.

II.7.4.4 Effacement du signal descendant :

La solution proposée dans [81] et [82] consiste à utiliser un SOA en fonctionnement de saturation pour effacer le signal descendant et le moduler avec de nouvelles données.

D'une manière générale, cette solution nécessite d'abord d'avoir un signal descendant modulé avec un faible taux d'extinction. Ensuite, ce signal optique est amplifié par un amplificateur linéaire chez le client pour permettre une bonne détection et également pour amener la puissance dans la région de saturation du SOA. L'injection dans le SOA permet de réduire considérablement l'écart entre les "0" et les "1", ce qui veut dire que les données descendantes sont quasiment effacées (Figure II.31). Par la suite ce signal optique est remodulé en intensité avec les données montantes.

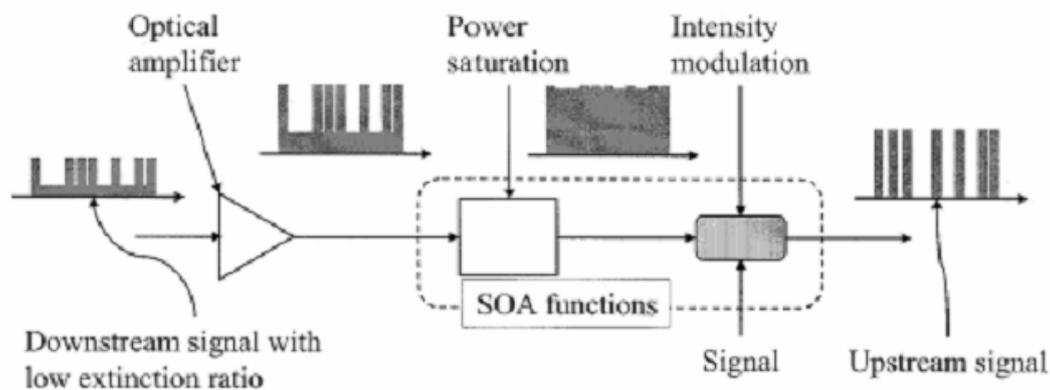


Figure II.31: Principe de la réécriture de données sur une longueur d'onde.

Les résultats présentés dans [81] ont démontré la fonctionnalité du système de remodulation pour des signaux descendants et montants à 622 Mbit/s sur une distance de 40 km entre le central et le client tandis que le module d'effacement présenté dans [82] fonctionnait à 2.5 Gbit/s.

Cette solution technique présente l'avantage de pouvoir être intégrée, mais l'inconvénient pour le moment réside dans le SOA qui nécessite une puissance importante pour un bon fonctionnement à la saturation: la solution nécessite un amplificateur optique linéaire, un SOA pour effacer les données et un second SOA pour moduler, ce qui fait beaucoup pour un ONU. Néanmoins, des améliorations sont à attendre au niveau des SOA pour avoir des puissances de saturation en entrée beaucoup plus faibles, ce qui permettrait de supprimer l'amplificateur optique linéaire.

II.7.4.5 Autres techniques utilisées :

L'étude présentée dans [83] utilise la modulation de fréquence FSK sur le signal descendant et la re-modulation OOK en signal montant. Les résultats montrent la possibilité de transmettre des signaux modulés à 10 Gbit/s dans le sens descendant et une remodulation à 2.5 Gbit/s sur une architecture bi-fibre.

Dans les publications [84] et [85] un composant particulier est utilisé pour générer la modulation FSK qui est en plus un laser accordable: le GCSR (grating-assisted codirectional coupler with rear sampled Reflector). L'architecture est cette fois

monofibre, ce qui apporte des pénalités dues à la bidirectionnalité dans la fibre et en particulier à cause de la rétrodiffusion Rayleigh. Des résultats à 1,25 Gbit/s symétriques ont été obtenus.

Cette solution paraît intéressante à première vue, mais quelques interrogations subsistent, en particulier à cause du filtre de démodulation. En effet cette démodulation apparaît très simple, mais le filtre utilisé doit avoir un front très raide pour pouvoir séparer correctement deux longueurs d'ondes très proches (utiliser pour la modulation FSK), et de plus il doit être différent pour chaque ONU ou bien être accordable. Ces points font que cette solution devient beaucoup moins bas coût que prévu. Le prix du laser pour le FSK, qui paraissait poser problème dans les publications, est aussi sujet à discussion.

II.8 Avantages et limites de l'architecture WDM-PON bidirectionnelle

Pour une implémentation pratique du système WDM-PON dans le réseau d'accès, une architecture bidirectionnelle mono-fibre est toujours souhaitée pour une raison économique. C'est-à-dire que la liaison entre l'OLT et le point d'éclatement RN utilise une seule fibre de transport ainsi que la liaison entre le RN et chaque ONU. Le signal modulé en voie descendante, et le signal modulé en voie montante sont donc transmis sur la même fibre.

II.8.1 Avantages :

L'intérêt d'avoir une architecture mono-fibre est d'économiser 50% sur la matière première qu'est la fibre. L'intérêt d'une architecture mono-fibre n'est pas que l'économie de fibre, mais surtout la facilité de maintenance: il est plus facile de n'avoir à agir que sur une seule fibre dans un câble en cas de réparation. En plus, au niveau des nœuds de connexions RN les branchements à effectuer sont bien plus simples lorsqu'une seule fibre arrive de chaque ONU. De même, à l'OLT l'encombrement peut devenir un problème en cas de déploiement de grande envergure, et avoir deux fois moins d'arrivées de fibres peut se révéler être très avantageux. Économiser 50% des connexions est donc un réel avantage pour les coûts de maintenance.

II.8.2 Inconvénients :

Pourtant, le fait de n'avoir qu'une seule fibre bidirectionnelle (full duplex) a des inconvénients: nécessité éventuelle de composants supplémentaires et effets physiques limitants.

- **Composants supplémentaires :** Le fait d'avoir une seule fibre par client au lieu de deux oblige à avoir à l'ONU un démultiplexeur, un circulateur ou un ensemble coupleur-isolateur pour séparer les signaux montants et descendants. Ceci va engendrer une augmentation dans le coût global du système.
- **Effets limitants :** la transmission simultanée sur la même fibre dans les deux directions opposées induit un risque de dégradation de la qualité de transmission. En effet les multiples réflexions sur les composants optiques

(NEXT (paradiaphotie) correspond à la puissance lumineuse réfléchie de l'émetteur vers le récepteur adjacent, FEXT (télédiaphotie) correspond à la puissance lumineuse réfléchie aux niveaux des composants et connecteurs sur la ligne de transmission ainsi qu'au niveau des éléments qui se situent de l'autre coté du réseau, la rétrodiffusion Rayleigh et les effets non linéaires (la rétrodiffusion de Brillouin (SBS: stimulated brillouin scattering) ou le mélange à quatre ondes (FWM: four wave mixing)) peuvent éventuellement être une source de bruit pénalisante pour le signal.

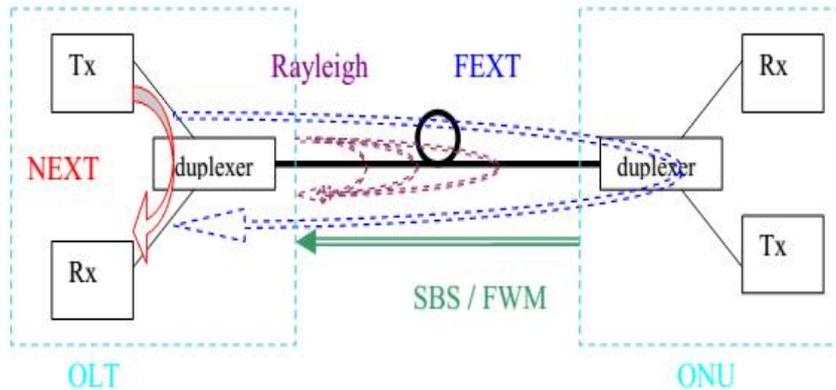


Figure II.32: Effets limitants dans une liaison bidirectionnelle [86].

II.8.3 Bruit des effets non linéaires :

Les effets non linéaires tels que la rétrodiffusion de Brillouin (SBS: stimulated brillouin scattering) ou le mélange à quatre ondes (FWM: four wave mixing) sont susceptibles d'apparaître pour de fortes puissances et peuvent éventuellement venir perturber la transmission des autres signaux. La rétrodiffusion Brillouin crée une longueur d'onde de retour espacée de 11GHz par rapport à la longueur d'onde transmise. Le seuil d'apparition est +6dBm lorsque le signal est continu et >+9 dBm lorsqu'il est modulé. Le mélange à 4 ondes intervient lorsque les longueurs d'onde sont proche les unes des autres (espacement < 50 GHz) avec des puissances importantes (le seuil estimé est supérieur à 8dBm). Cet effet peut intervenir plus rapidement si des composants tels que des amplificateurs optiques sont sur le chemin de transmission. Les puissances raisonnables utilisées dans le réseau d'accès (émission < 5 dBm) laissent présager une faible importance des effets non linéaires.

II.8.4 Rétrodiffusion de Rayleigh

La rétro diffusion de Rayleigh dans la fibre optique a été connue et largement étudiée depuis les années quatre-vingts [87, 88, 89]. L'origine de cet effet provient de l'impureté du matériau en verre constituant la fibre optique. Donc, il provoque plusieurs réflexions dans toutes les directions et tout au long de la fibre optique d'une partie de la lumière quand le signal optique se propage. Nous appellerons ce processus diffusion. Dans la lumière diffusée, il y a une fraction qui se propage dans le sens inverse du signal. Nous l'appelons signal rétro diffusé ; au global, cet effet est appelé la rétro diffusion de Rayleigh. La figure II.33 schématise le principe de la rétro

diffusion de Rayleigh. Dans cette figure, E_S est le champ électrique du signal optique et E_{RB} est le champ électrique de la lumière rétrodiffusée.

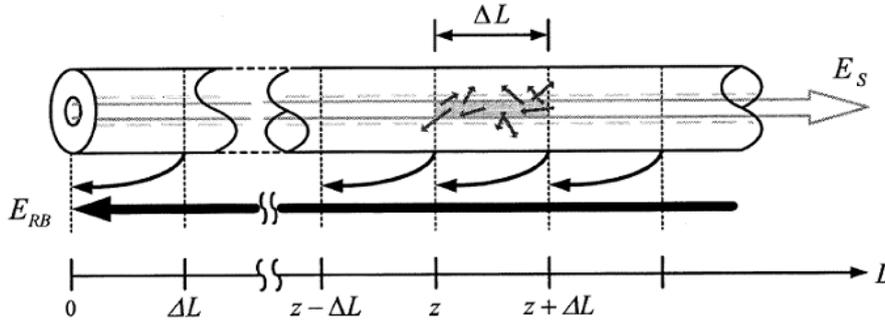


Figure II.33: Principe de la rétrodiffusion de Rayleigh [27].

L'analyse théorique dans [90] a montré que l'intensité moyenne de la lumière rétrodiffusée reçue au bout de la fibre est calculée par la formule suivante :

$$\langle I_{RB} \rangle = \frac{\alpha_S S I_S (1 - e^{-2\alpha L})}{2\alpha} \quad (2.3)$$

avec α le coefficient d'atténuation de la fibre, L la longueur de la fibre, I_S l'intensité du signal optique injectée dans la fibre, S la fraction de puissance optique totale diffusée qui se propage dans le sens inverse de celui de E_S et α_S le coefficient d'atténuation dû à la rétrodiffusion de Rayleigh. Compte-tenu de cette formule, nous remarquons que l'intensité moyenne de la lumière rétrodiffusée reçue au bout de la fibre augmente avec la longueur, mais cette intensité tend vers une valeur maximale $\frac{\alpha_S S I_S}{2\alpha}$ pour une grande longueur de la fibre. C'est-à-dire que la puissance totale de la lumière rétrodiffusée a pour contribution principale les premiers tronçons de la fibre. Par exemple, les résultats théoriques donnés dans [86] par Seimetz montrent que le rapport de la puissance rétrodiffusée sur la puissance injectée à 1550 nm est d'environ -41 dB pour 1 km, -33 dB pour 10 km, -32 dB pour 25 km et ne dépasse pas -31 dB pour une longueur plus grande.

II.8.5 Influence sur le taux d'erreur binaire :

La rétrodiffusion est considérée comme un bruit. Ce bruit est appelé cohérent lorsque le signal rétrodiffusé et le signal considéré sont issus du même laser. Lorsque le signal rétrodiffusé provient d'un autre laser de longueur d'onde différente, il s'agit d'un bruit incohérent. Notre travail consiste à étudier le système WDM PON bidirectionnel à remodulation de porteuse descendante alors nous s'intéressons qu'au bruit cohérent. Lorsque ces signaux sont détectés par la photodiode, le photocourant qui en résulte est donné par:

$$I_P = E_S^2 + 2E_S E_R \cos(\theta_S(t) - \theta_R(t)) + E_R^2 \quad (2.4)$$

Le premier terme est la puissance du signal reçu et le dernier terme est la puissance du signal rétrodiffusé par Rayleigh. Le second terme est le bruit de battement entre le signal et la rétrodiffusion.

Les bruits électriques de la photodiode, bruit de grenaille et bruit thermique, ne sont pas pris en compte ici.

La variance du bruit de battement entre signal et Rayleigh est [91]:

$$\sigma_{S-R}^2 = (2E_S E_R)^2 \cdot \frac{1}{2} = \frac{2I_{signal}^2}{R_{S-R}} \quad (2.5)$$

Avec R_{S-R} (ou $R_{Signal-Rayleigh}$) le rapport de la puissance du signal sur la puissance de rétrodiffusion.

La composante par polarisation du champ du signal rétrodiffusé E_R est une gaussienne. Il faut donc considérer pour la variance, la somme des carrés de deux gaussiennes.

La variance obtenue est

$$\sigma_R^2 = \frac{I_{signal}^2}{R_{S-R}} \quad (2.6)$$

Sous la condition de l'approximation du bruit gaussien, la probabilité d'erreur est donnée par $TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}}$, expression qui peut être approchée, lorsque Q est assez grand ($Q > 4$) par

$$TEB \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \text{ avec } Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.7)$$

La Figure II.34 représente la pénalité de transmission prise pour un taux d'erreur de 10^{-9} en fonction de R_{S-R} [15]. La pénalité augmente de façon exponentielle en dessous de 22 dB. Elle est de 2 dB pour $R_{S-R} = 22$ dB et déjà de 14 dB pour $R_{S-R} = 19$ dB. Un rapport entre puissance de signal et bruit de rétrodiffusion de 20 dB paraît donc être un minimum pour avoir des pénalités raisonnables (< 4 dB).

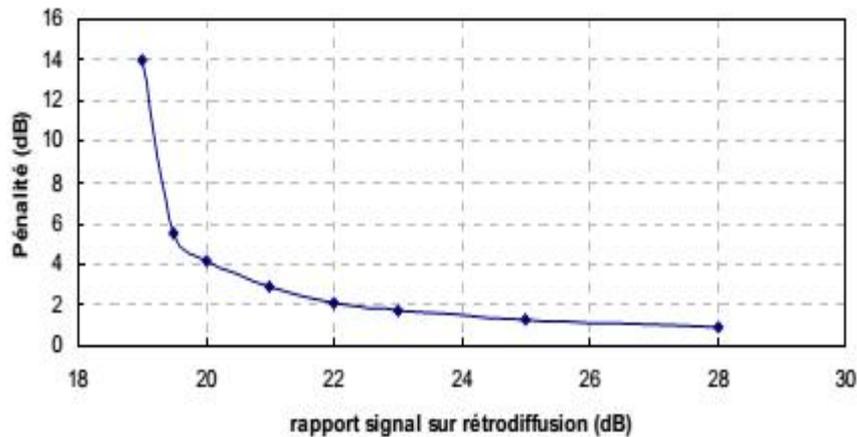


Figure II.34: Pénalité théorique de la transmission en dB pour un TEB de 10^{-9} en fonction du R_{S-R} . [15].

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a essayé de présenter les différentes technologies du réseau d'accès optique de nouvelle génération permettant d'offrir aux utilisateurs des débits supérieurs à 1 Gb/s.

En premier lieu, les différentes versions du NG-PON TDM ont été présentées. L'adoption de la méthode de multiplexage optique WDM dans les réseaux d'accès et son intérêt qu'elle apporte dans le cadre d'augmenter les débits, ainsi les différents types de réseau WDM PON font l'objet de la deuxième partie.

En deuxième partie, on a essayé de donner un panorama de solutions des technologies de composants d'émetteurs utilisées dans les réseaux WDM PON afin de préserver la notion d'ONU achromatique permettant de minimiser le coût des équipements clients. Enfin, on a présenté les différentes architectures utilisées pour la mise en œuvre de réseau WDM-PON basées sur le concept d'ONU achromatique, en dévoilant les avantages et les limites de chaque architecture.

Chapitre III :

Formats de modulations utilisés dans le réseau WDM PON

III.1 Introduction :

En télécommunications, le signal transportant une information doit passer par un moyen de transmission entre un émetteur et un récepteur. Le signal est rarement adapté à la transmission directe par le canal de communication choisi, hertzien, filaire, ou optique, pour cela on doit passer par une opération qui permet de surpasser cette situation, donc on fait appel à la modulation de signal d'information.

III.1.1 Définition :

La modulation peut être définie comme le processus par lequel le signal est transformé de sa forme originale en une forme adaptée au canal de transmission, par exemple en faisant varier les paramètres d'amplitude et d'argument (intensité/phase) d'une onde sinusoïdale appelée porteuse.

Le dispositif qui effectue cette modulation, en général électronique, est le modulateur, l'opération inverse permettant d'extraire le signal de la porteuse est la démodulation.

Le but de la modulation est d'adapter le signal à transmettre au canal de communication entre la source et le destinataire.

III.1.2 Principe de la modulation optique :

La modulation de la lumière est une fonction essentielle pour la transmission des données par fibre optique. Elle assure la conversion des signaux électriques en signaux optiques par variation d'un des paramètres de la lumière, tels que sa phase, son intensité, sa fréquence, ou sa polarisation parfois.

Les systèmes de transmission par fibres optiques sont conçus pour, faire propager par voie optique des données binaires « 0 » et « 1 ». Il convient donc de déterminer un code permettant de traduire ces signaux dans le domaine optique par une modulation adéquate d'un signal optique continu. Le code utilisé pour la traduction en optique des signaux binaires est appelé format de modulation.

La méthode de modulation la plus intuitive consiste à coder l'information de la manière suivante : « 0 » = pas de lumière transmise, ou à faible puissance et « 1 » = de la lumière transmise, à puissance plus forte. C'est le principe du codage en intensité, appelé OOK (pour On/Off Keying), et parfois ASK (Amplitude Shift Keying) ou IMDD (IntensityModulated Direct Detection). Ce codage OOK regroupe plusieurs formats de modulation, ayant tous en commun le codage de l'information binaire par le biais de l'intensité de l'onde lumineuse. Nous le détaillerons par la suite. Une onde lumineuse, comme toutes les ondes, est certes caractérisée par son intensité, que l'on peut moduler pour transporter l'information, mais elle est aussi caractérisée par sa phase, qui est un degré de liberté que l'on peut aussi exploiter pour moduler l'information binaire à transporter. De nombreux formats de modulation basés sur la modulation de phase (PSK pour Phase-Shift Keying) existent et sont à l'étude [93]. Nous nous détaillerons le principe et l'intérêt de cette modulation au paragraphe III.5. La fréquence de l'onde, quant à elle, définie par la source lumineuse utilisée, peut aussi être modulée [94].

Dans ce chapitre, nous passerons d'abord en revue les différents modes de modulation optique, en exposant ensuite les différentes familles de modulateurs optiques. Enfin, nous introduisons les formats de modulation avancés utilisés dans les réseaux d'accès optiques actuels pour surmonter les limitations et également pour améliorer le débit global de tels systèmes.

III.1.3 Intérêt du choix du format de modulation :

Chaque format de modulation est caractérisé à la fois par son comportement temporel en amplitude, visualisable par exemple sur un diagramme de l'œil, son comportement en phase, pouvant être visualisé sur une constellation, et son spectre. Un signal lumineux se propageant dans une fibre optique subit des effets de propagation (atténuation, dispersion, effets non-linéaires, accumulation du bruit d'ASE,...). Or ces effets dépendent de la nature temporelle et spectrale du signal, et donc de la manière avec laquelle il est modulé. Les formats de modulation vont donc réagir à ces effets d'une manière qui leur est propre. Certains formats seront donc naturellement plus tolérants que d'autres à un effet ou à un autre, ils seront moins pénalisés que d'autres par une accumulation de ces effets. Mais les formats les plus tolérants aux différents effets seront aussi bien souvent les plus difficiles ou les plus coûteux à générer et/ou à détecter. La méthode de génération du format est donc aussi un paramètre à prendre en compte pour choisir tel ou tel format.

III.2 Modes de modulation optiques :

Une chaîne de transmission par fibre optique de base est constituée d'un module d'émission et d'un module de réception placés aux extrémités d'une fibre optique.

Le rôle d'un émetteur optique est de convertir un signal du domaine électrique vers le domaine optique. Il y a deux méthodes distinctes pour moduler les ondes optiques: la modulation directe d'un laser et la modulation externe. La figure III.1 montre le schéma synoptique de ces deux types d'émetteurs optiques. Nous allons dans la suite

de cette section passer en revue les différents types d'émetteurs, leur principe de fonctionnement et leurs principales caractéristiques du point de vue des systèmes de transmission.

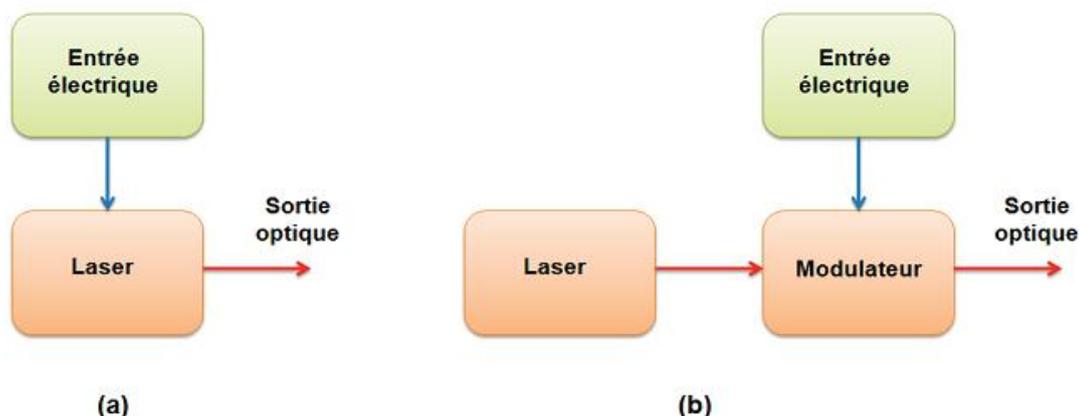


Figure III.1: Synoptique d'un module d'émission avec (a) une modulation directe et (b) une modulation externe.

III.2.1 Modulation directe :

La modulation directe laser, seule source optique consiste à faire varier le courant d'alimentation de la diode permettant une vitesse de modulation compatible avec les applications en télécommunications haut-débit à longue distance et avec les systèmes hyperfréquences, pour obtenir une onde lumineuse modulée en intensité en sortie. Cette solution requiert peu de composants (figure III.1 (a)) et présente un faible coût de mise en œuvre. En plus de la source optique, seuls un générateur de courant et un circuit de commande (driver) sont nécessaires. Bien que simple, ce type de modulation n'est pas adapté aux applications exigeantes en termes de monochromaticité de la lumière. En effet la modulation du courant d'alimentation d'une diode laser provoque en général une variation de la fréquence de la lumière accompagnant la modulation de son intensité. Ce phénomène, appelé « chirp » en termes anglo-saxons, est dû à la modification de l'indice de réfraction du milieu actif par la variation de la densité de porteurs injectés [95] [96]. Le chirp élargit le spectre du signal optique, ce qui augmente l'effet de la dispersion chromatique dans la fibre optique. Il limite en conséquence le débit maximal des données que nous pouvons transmettre pour un BER donné.

En outre, la bande passante de la modulation directe est limitée par la fréquence de relaxation liée à la durée de vie des porteurs dans la diode laser. On peut l'améliorer en augmentant le courant de polarisation, mais cela au détriment de l'indice de modulation [97]. On trouve sur le marché des VCSEL à 850 nm mis en boîtier et connectés à des fibres multimodes dont la bande passante atteint une dizaine de GHz [98]. Des lasers DFB à puits quantiques à 1550 nm optimisés et polarisés à 150 mA arrivent à des bandes passantes de 20 GHz [99]. Une bande passante de 30 GHz a été démontrée en laboratoire avec des lasers DFB à puits quantiques bi-électrode [100].

III.2.2 Modulation externe :

La modulation externe consiste à modifier un paramètre de l'onde lumineuse à l'aide d'un modulateur externe à la source lumineuse. C'est la technique de modulation privilégiée des télécommunications haut débit à longue distance, car elle permet de limiter ou de contrôler le phénomène de « chirp », étant donné que la densité de porteurs dans le milieu actif est constante avec un courant de polarisation du laser maintenu constant (figure III.1 (b)).

Elle offre en général une bande passante plus importante et un indice de modulation bien plus élevé que la modulation directe en dédiant la fonction d'émission à la source laser et celle de modulation au modulateur et en les optimisant chacun pour leur fonction.

Selon la nature de leur signal de commande, on peut classer les modulateurs de lumière en plusieurs grandes catégories : acousto-optiques, magnéto-optiques et électro-optiques. Parmi ces modulateurs, seuls les modulateurs à commande électrique permettent d'atteindre des débits (≥ 10 Gb/s) ou des fréquences de modulation (≥ 10 GHz) compatibles avec les applications visées en télécommunications optiques et dans les systèmes hyperfréquences, pour cela on s'intéresse dans cette thèse aux modulateurs à commande électrique.

III.3 Modulateurs à commande électrique :

Il existe deux principaux types de modulateurs dans cette famille : modulateurs à électro-absorption (EAM) et modulateurs électro-optiques Mach-Zehnder (MZM). Ils présentent chacun des avantages et limites spécifiques. Dans ce paragraphe, nous expliquerons leur principe de fonctionnement et définirons leurs paramètres caractéristiques mesurant leurs performances.

III.3.1 Modulateurs à électro-absorption (EAM):

Le modulateur EAM est un guide d'ondes planaire à base de semi-conducteurs et est composé d'une superposition d'une couche dopée p et d'une couche dopée n, formant une jonction p-n (figure III.2).

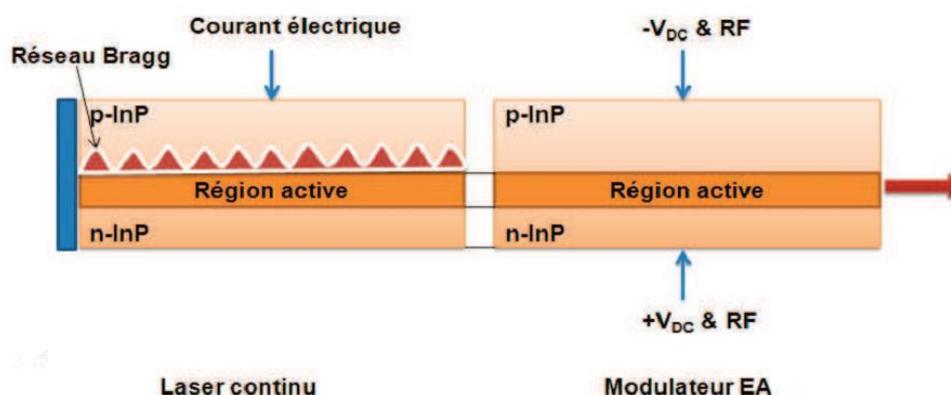


Figure III.2 : Schéma d'un émetteur optique à base d'un modulateur à électro-absorption (EAM).

Le fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption de matériaux semi-conducteurs soumis à un champ électrique. L'effet électro-absorption est connu sous différents noms selon le type de matériau utilisé : effet Franz-Keldysh dans les matériaux semi-conducteurs massifs et effet Stark confiné quantiquement dans les structures à puits quantiques [101-104]. Sans tension de polarisation sur la jonction p-n, la bande interdite de la région active est assez large pour être transparente à la longueur d'onde de la lumière laser. Cependant, lorsqu'une polarisation inverse suffisamment grande est appliquée sur la jonction p-n, la bande interdite effective est réduite au point que la région active commence à absorber la lumière laser et devient donc opaque.

En pratique, dans les EAM, la région active est généralement structurée comme un multi-puits quantique, fournissant un effet plus fort d'absorption en fonction du champ. La relation entre la puissance de sortie optique P_{out} et la tension inverse V_m appliquée sur un EAM est décrite par une courbe de commutation telle que celle présentée sur la figure III.3.

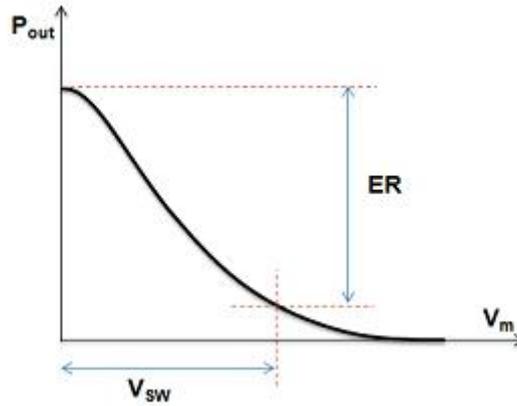


Figure III.3: Courbe de commutation d'un modulateur à électro-absorption.

V_{sw} : tension de commutation ; ER : taux d'extinction.

Le taux d'extinction réalisable (ER) pour une tension de commutation V_{sw} donnée peut être écrit comme suit :

$$ER = \frac{P_{out}(V_m=0)}{P_{out}(V_m=V_{sw})} = \frac{e^{-\alpha_a(0)L}}{e^{-\alpha_a(V_{sw})L}} \quad (3.1)$$

où α_a est le coefficient d'absorption induit par un champ optique, L la longueur d'interaction électro-optique.

Les modulateurs à électro-absorption sont beaucoup plus compacts que les modulateurs électro-optiques Mach-Zehnder sur LiNbO₃ à bande passante équivalente. Ils se prêtent bien à intégration avec des diodes laser et sont peu sensibles à la polarisation de la lumière. Ils ont en outre l'avantage de ne nécessiter qu'une faible tension de commande. Par contre, en tant que concurrents aux modulateurs électro-optiques Mach-Zehnder pour les applications à 40 Gb/s, ils présentent plusieurs inconvénients : chirp plus important, plage de longueur d'onde plus réduite, faible puissance optique admissible et dérive thermique [105] [106].

III.3.2 Modulateur Mach-Zehnder (MZM) :

Les modulateurs de Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques que l'on place directement en sortie du laser. En réalité, les effets électro-optiques sont à la base de ce type de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique [107].

Grâce à ce modulateur, on peut obtenir une modulation d'amplitude à travers une modulation de phase à l'intérieur du composant.

- **Modulation de phase:** Le champ électrique appliqué change l'indice de réfraction du matériau, ce qui a pour conséquence de faire varier la phase de l'onde guidée et d'engendrer un retard variable de l'onde optique. Un déphasage dépendant de la tension électrique est ainsi créé (modulation de phase en alternatif).
- **Modulation d'amplitude:** Cela consiste à réaliser un interféromètre [108] dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras par l'application d'une tension contrôlée sur le matériau électro-optique.

La figure III.4 montre l'architecture d'un modulateur de type Mach-Zehnder. Il est composé d'une jonction Y en entrée permettant de séparer le faisceau incident en deux ondes de puissances égales sur les deux bras du modulateur. Sur l'un des bras de l'interféromètre, l'électrode permet d'appliquer un champ électrique modifiant ainsi la phase de l'onde lumineuse dans ce bras. A la sortie de l'interféromètre, une autre jonction Y combine les deux ondes déphasées. Celles-ci interférant en fonction du déphasage optique introduit, l'amplitude de l'onde optique en sortie est alors modulée.

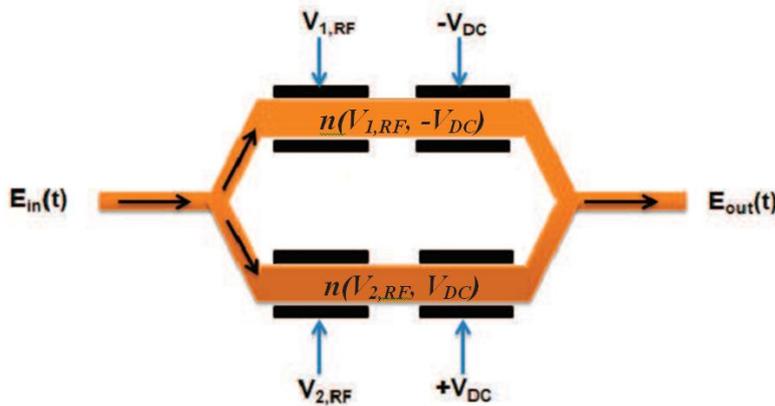


Figure III.4 : Schéma simplifié d'un modulateur Mach-Zehnder.

L'application d'une tension de polarisation V sur ses électrodes change l'indice de réfraction n du matériau utilisé, par exemple $LiNbO_3$ (Niobate de Lithium). Le changement d'indice Δn conduit à changer la phase optique $\Delta\phi$ suivant la relation:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L = \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (3.2)$$

où λ est la longueur d'onde de la lumière, L est la longueur de l'électrode et V_π représente la tension de polarisation qui entraîne un déphasage de π rad.

Si nous appliquons deux tensions de polarisation $V_{1,RF}$ et $V_{2,RF}$ sur les deux électrodes du modulateur conformément à la figure III.4, le champ optique de sortie $E_{out}(t)$ peut être lié au champ optique d'entrée $E_{in}(t)$ comme suit :

$$E_{out}(t) = \frac{1}{2} [e^{i\Delta\phi_1} + e^{i\Delta\phi_2}] E_{in}(t) \quad (3.3)$$

$$= \frac{1}{2} \left[e^{i\left(\frac{\pi}{2} \frac{V_{1,RF}-V_{DC}}{V_{\pi}}\right)} + e^{i\left(\frac{\pi}{2} \frac{V_{2,RF}+V_{DC}}{V_{\pi}}\right)} \right] E_{in}(t)$$

Si $V_{2,RF} = -V_{1,RF} = V_{RF}$ l'équation (3.3) devient :

$$E_{out}(t) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{V_{RF}-V_{DC}}{V_{\pi}}\right) E_{in}(t) \quad (3.4)$$

Le modulateur MZM fabriqué sur $LiNbO_3$ peut fonctionner de façon satisfaisante sur une plage de longueur d'onde de 1300 à 1550 nm; il est largement utilisé dans les communications optiques numériques actuelles à haut débit.

En conclusion, la modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc de transmettre des débits plus élevés. Le bruit, le chirp ... ne sont pas inexistantes dans les modulateurs de Mach-zehnder mais leurs valeurs sont nettement plus faibles que dans les lasers. Les limites de capacité de transmission sont donc repoussées vers des fréquences plus importantes. Enfin, l'utilisation de modulateurs externe offre la possibilité d'avoir des modulations optiques avancées autres que les modulations d'intensité classiques tels que *binary phase shift keying (BPSK)*, *quaternary phase-shift keying (QPSK)*, etc.

III.4 Modulations en intensité (OOK)

III.4.1 Le format NRZ (Non Return-to-Zero) :

C'est le format le plus simple et le plus intuitif qui existe. Un signal optique codé en NRZ est la copie conforme du signal binaire électrique : un « 0 » est codé par un signal à faible puissance (idéalement nulle), et un « 1 » par un signal à forte puissance. Pour le générer au moyen d'un modulateur Mach-Zehnder, il suffit de moduler sa tension de commande par un signal proportionnel au signal binaire initial et variant entre un minimum et un maximum de la fonction de transfert en intensité du Mach-Zehnder, décrite sur la figure III.5.

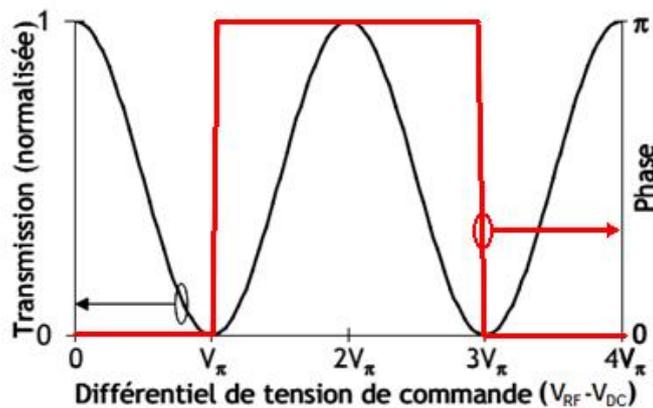


Figure III.5: La fonction de transfert en intensité et en phase du Mach-Zehnder.

Cependant, une puissance résiduelle pour le codage du « 0 » est souvent observée du fait des imperfections de la modulation. Nous parlerons alors du taux d'extinction (ou ER pour Extinction Ratio) du format, ayant alors une valeur finie. Le taux d'extinction d'un format de modulation OOK est défini par le rapport entre les puissances moyennes du niveau 1 et du niveau 0 :

$$ER = \frac{P_1}{P_0} \text{ ou } ER_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \quad (3.5)$$

Typiquement, un taux d'extinction expérimental est de l'ordre de 13 dB pour un signal NRZ.

Le schéma fonctionnel d'un émetteur de NRZ est montré dans la figure III.6, où le signal électrique est modulé avec un modulateur externe d'intensité (nous donnerons plus de détail dans qui ce suit). Le modulateur d'intensité peut être type de Mach-Zehnder ou type d'électro-absorption, qui convertit un signal électrique NRZ en signal optique NRZ au même débit.

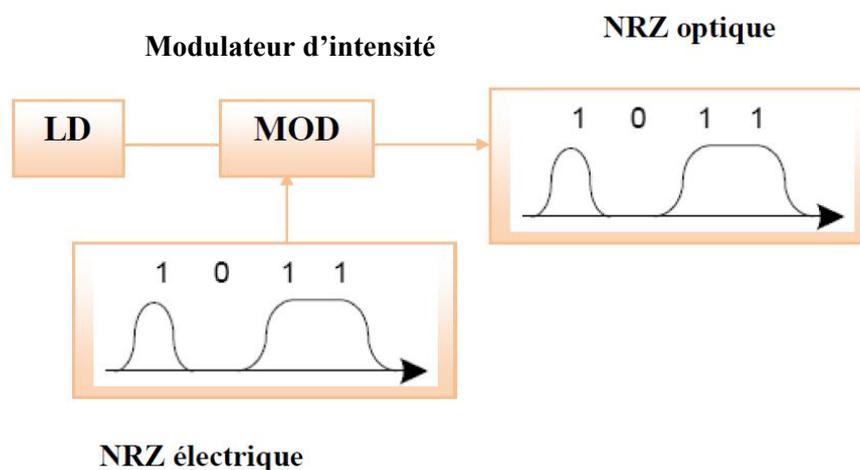


Figure III.6 : Diagramme d'un transmetteur NRZ.

La Figure III.7 montre un exemple de trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format NRZ présentant un taux d'extinction de 13 dB.

Le spectre de ce format comporte, comme celui de la plupart des formats de modulation, un lobe principal et des lobes secondaires deux fois plus étroits. Le lobe principal du spectre du format NRZ a une largeur égale à deux fois la fréquence d'information du signal optique. De plus, le spectre d'un format NRZ est facilement reconnaissable à son onde porteuse unique située au centre de son spectre. Celle-ci comporte des harmoniques aux multiples entiers de la fréquence d'information, mais dans le cas du NRZ, elles coïncident avec les annulations de puissance entre les lobes.

Le format NRZ est incontestablement le format le plus simple à générer. Par contre, sa sensibilité en back-to-back et sa tolérance aux effets non-linéaires sont parmi les pires de celles de tous les formats étudiés, particulièrement au débit de 40 Gbit/s.

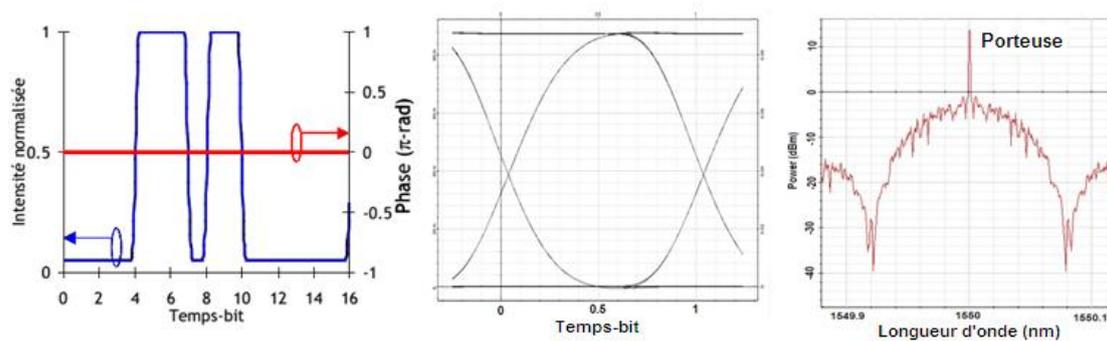


Figure III.7: Trace temporelle, diagramme de l'œil et spectre du format NRZ.

III.4.2 Le format RZ (Return-to-Zero):

Le format de modulation utilisant le codage RZ est un autre format OOK, dérivé du format NRZ. Comme son nom l'indique, à chaque temps-bit, un retour à zéro systématique est opéré. Ainsi, le symbole codant un « 0 » en RZ sera quasi-similaire à celui codant un « 0 » d'un format NRZ, c'est-à-dire un signal à faible puissance, mais le symbole codant un « 1 » en RZ sera une impulsion lumineuse de durée totale 1 temps-bit et de largeur à mi-hauteur dépendant de sa méthode de génération. Ainsi, une succession de « 1 » sera codée, en RZ, par une succession d'impulsions, et non par un signal continu comme en NRZ.

Pour générer le format RZ, on doit d'abord passer par le signal optique NRZ produit par le modulateur externe d'intensité comme nous avons décrit au préalable ; puis, il est modulé par un train d'impulsions synchronisé avec le même débit que le signal électrique en utilisant un autre modulateur d'intensité comme est présenté dans la figure III.8.

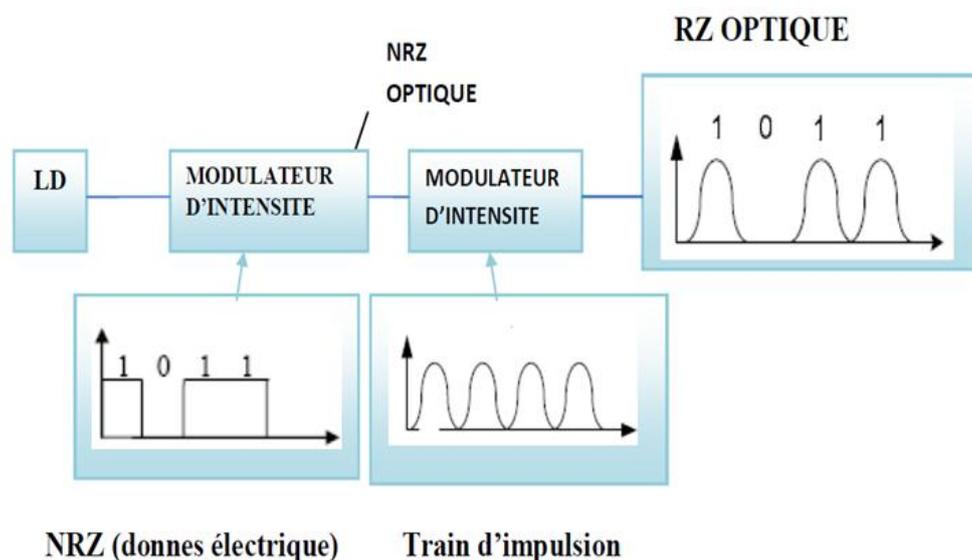


Figure III.8 : Diagramme d'un transmetteur RZ.

Cette sur-modulation RZ induit une augmentation de la largeur spectrale du signal RZ par rapport à celle du signal NRZ, mais elle induit aussi une plus grande ouverture de

l'œil pour une même puissance moyenne. De plus, comme la largeur des impulsions du signal RZ est moins importante que celles du NRZ, les différentes impulsions d'un signal RZ ont moins tendance à se chevaucher et à interférer entre elles par le biais de la dispersion, que les différents symboles d'un signal NRZ affectés par la même dispersion. De même, le signal optique du format RZ s'est avéré plus tolérant à la non-linéarité que le signal optique de NRZ. La figure III.9 montre un exemple de trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format RZ.

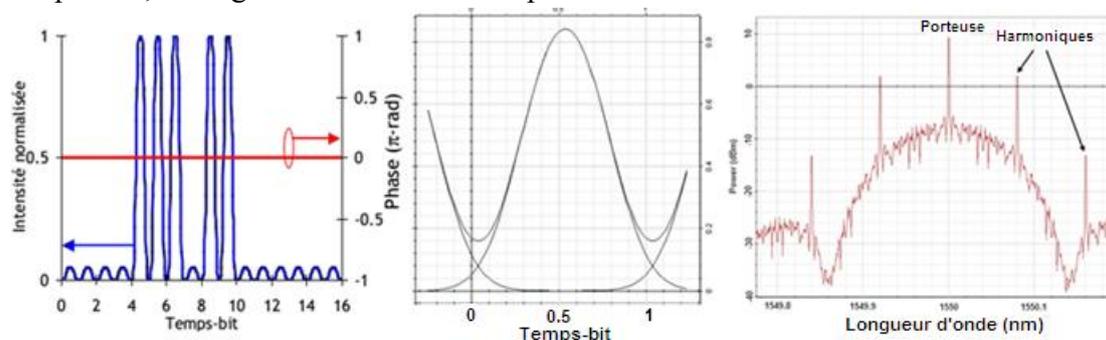


Figure III.9: trace temporelle, diagramme de l'œil et spectre du format RZ- 50%.

Du fait de la sur-modulation RZ, le lobe principal du spectre du format RZ est plus large que celui du spectre NRZ. Nous pouvons aussi y observer l'apparition des harmoniques de l'onde porteuse situées entre les lobes du spectre, invisibles dans le cas du format NRZ.

La sur-modulation RZ est aussi caractérisée par son rapport cyclique ou « duty cycle ». Il correspond au rapport de la largeur à mi-hauteur des impulsions sur le temps-bit. Un format RZ généré comme expliqué ci-dessus a un rapport cyclique de 50 %, et est nommé, si nécessaire, RZ-50% ou RZ-50. Mais il est possible de modifier ce rapport cyclique en changeant les caractéristiques de la sur-modulation sinusoïdale. On trouve par exemple, le rapport cyclique 33%, ce format est alors noté RZ-33% ou RZ-33, et comporte un spectre plus large.

III.4.3 Le format CS-RZ (Carrier Suppressed Return-to-Zero):

Le format CS-RZ est une variante du format RZ. La différence principale entre le CS-RZ et le RZ conventionnel est que le signal optique de CS-RZ a un déphasage de π entre les bits adjacents.

Généralement la génération d'un signal optique de CS-RZ exige deux modulateurs électro-optiques suivant les indications de figure III.10. Dans cette configuration, le premier modulateur d'intensité code les données de NRZ. Alors, le signal optique produit de NRZ est modulé par le deuxième modulateur d'intensité pour produire d'un signal optique de CS-RZ.

La sur-modulation RZ sinusoïdale appliquée est très similaire à celle du format RZ-33, c'est-à-dire amplitude de $2V\pi$ et fréquence égale à la moitié de la fréquence d'information, mais elle est centrée sur un minimum de la fonction de transfert en intensité du MZM, donc elle va osciller entre deux de ses maxima comme est montré dans la figure III.12. Notons que pour les tensions supérieures au minimum de la

fonction de transfert en intensité, la fonction de transfert du MZM en amplitude est négative, ce qui équivaut à une application d'un déphasage de π au signal à chaque temps-bit, alors que pour les tensions inférieures, la fonction de transfert est positive.

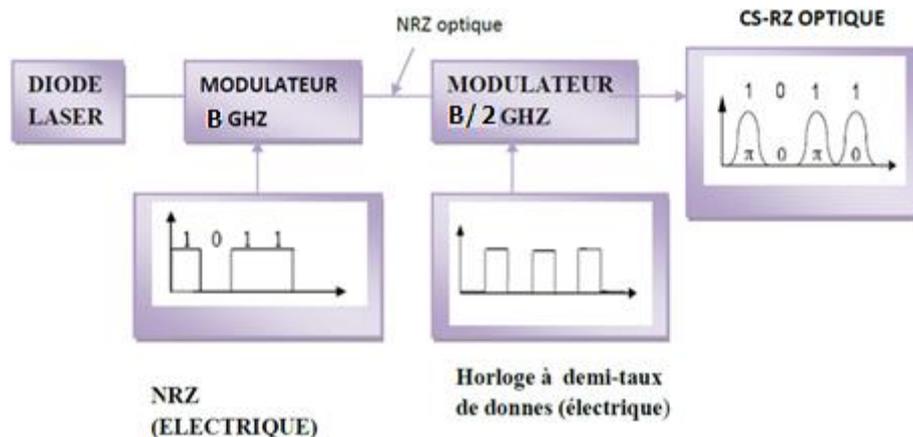


Figure III.10: diagramme d'un transmetteur CS-RZ.

Les propriétés spectrales d'un signal CS-RZ sont semblables à celui d'un signal RZ, sauf que les harmoniques (espacées toujours d'une bande de fréquence B égale au débit d'information) sont décalés de $B/2$ par rapport au RZ, de sorte qu'aucun pic n'est présent à la fréquence porteuse d'où le nom « Carrier-Suppressed ». La Figure III.11 représente la trace temporelle en amplitude et en phase, le diagramme de l'œil et le spectre du format CSRZ.

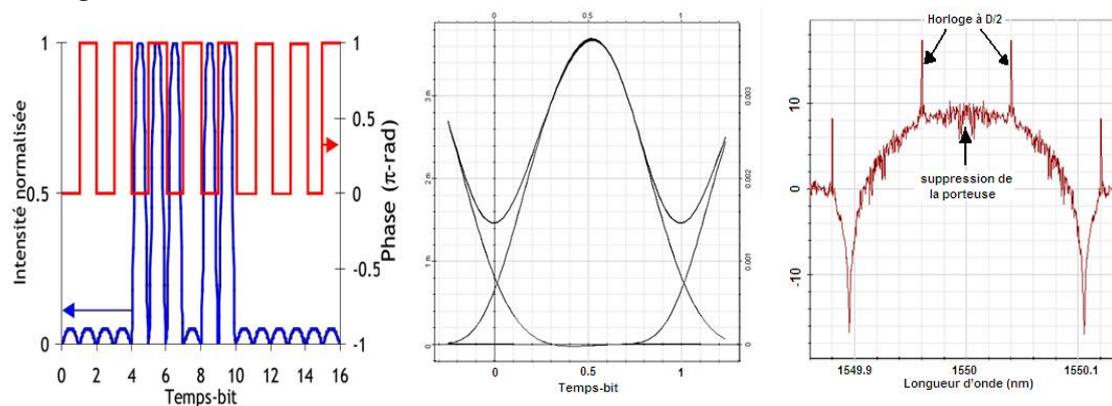


Figure III.11 : trace temporelle, diagramme de l'œil et spectre du format CS-RZ.

La Figure III.12 récapitule les plages d'évolution nécessaire à tous les signaux électriques qui doivent être appliqués aux MZM pour générer les formats de modulation évoqués ci-dessus.

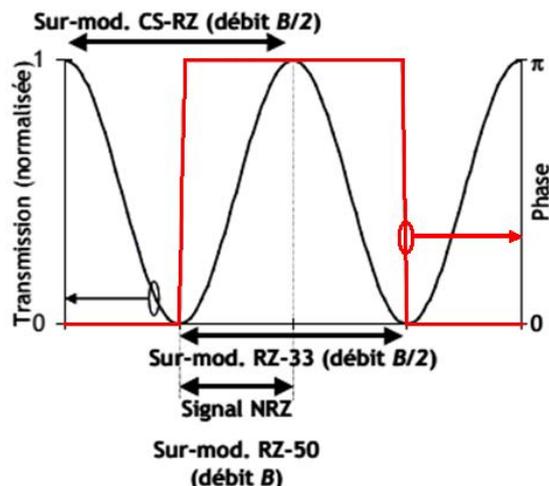


Figure III.12 : récapitulation des plages d'évolution des différents signaux à appliquer à un MZM.

III.4.4 Autres formats OOK :

D'autres formats OOK existent et peuvent être utilisés pour transmettre une information binaire. Ils sont dérivés des formats NRZ ou RZ et dans la plupart des cas sont obtenus grâce à l'ajout d'une nouvelle sur-modulation de phase. Les formats AP-RZ (Alternate-Phase RZ), sont des formats RZ dotés d'une sur-modulation de phase carrée, comme pour le CS-RZ, mais avec une profondeur de modulation, c'est-à-dire une amplitude de la modulation de phase, pouvant être différente.

Il existe aussi les formats PAP-RZ (Pairwise AP-RZ), qui sont des formats RZ sur-modulés en phase au quart de la fréquence d'information, soit une alternance de phase tous les deux temps-bits. Le C-RZ (Chirped-RZ) est un format RZ doté quant à lui d'une sur-modulation en phase sinusoïdale. Tous ces formats nécessitent l'utilisation d'un modulateur de phase.

Il existe aussi le format RZ sur-modulé en polarisation, l'APol-RZ (Alternate Polarization RZ). La polarisation du signal est modulée de telle sorte que deux impulsions successives soient polarisées orthogonalement.

III.4.5 Modulation d'amplitude Multi-niveaux (M-ary ASK) :

Les différentes modulations citées précédemment utilisent deux niveaux de puissance optique pour moduler l'information binaire à transmettre.

Par contre dans les systèmes de communication de pointe, au lieu de transmettre un seul bit par symbole, plusieurs bits par symbole peuvent être transmis en utilisant des signaux à plusieurs niveaux, d'où il résulte une capacité de transmission plus élevée. Cette technique est appelée la modulation multi-niveaux ou la modulation *M-aire* (*M-ary modulation*) où M est le nombre de niveaux du signal ($M=2^b$ avec b est le nombre de bits par symbole).

Par exemple, en *4-ary ASK*, la valeur de $M=4$ est surtout utilisée pour doubler la capacité de transmission tout en maintenant la largeur spectrale constante.

L'amélioration de la capacité du canal est dans ce cas obtenue au prix d'une pénalité de puissance dans l'OSNR (*optical signal to noise ratio*) et de sensibilité du récepteur du système.

III.5 Les modulations de phase optique:

Dans le domaine de la radio, nous savons tous que la modulation en fréquence est plus performante que la modulation en amplitude, car l'amplitude du signal est plus affectée que sa fréquence par les perturbations subies par l'onde radio pendant sa propagation. Nous pouvons donc penser que les signaux optiques se comportent de manière analogue au cours de leur propagation dans la fibre optique. C'est une des raisons pour laquelle le codage de l'information binaire dans la phase de l'onde lumineuse, plutôt que dans son amplitude, a été envisagé.

III.5.1 Modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying):

III.5.1.1 Principe de génération:

En modulation de phase, des données binaires sont modulées sur la porteuse optique se référant à sa phase, il s'agit alors d'associer aux deux symboles à transmettre (0 et 1) deux états de phase. Cette technique est appelée PSK ou BPSK pour une PSK binaire [93].

La PSK différentielle (DPSK: Differential PSK) est souvent préférée à la modulation PSK en raison de la complexité de démodulation de cette dernière. Dans DPSK en effet, la tension appliquée au modulateur ne correspond pas directement aux données binaires. Mais, les données sont d'abord encodées de façon différentielle à l'aide d'un précodeur logique différentiel (Tableau III.1) comme montré sur la figure III.13. Les données codées sont ensuite modulées sur une porteuse optique en utilisant un modulateur MZM, qui change la phase optique de la porteuse initiale d'un décalage de phase relatif de π .

s(t)	p(t-1)	p(t)
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tableau III.1 : Table de vérité du précodage DPSK.

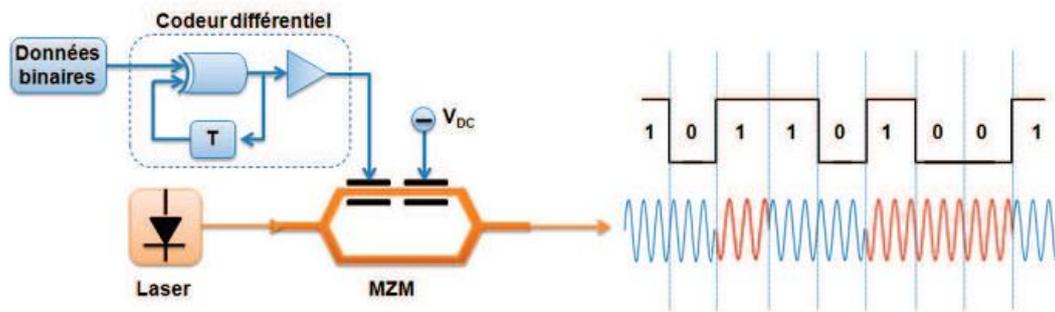


Figure III.13: Émetteur DPSK et une trace d'une modulation DPSK.

Dans le cas d'une modulation DPSK par MZM, la tension de commande est centrée sur un minimum de la fonction de transfert en intensité du MZM, et évolue entre ses deux maxima adjacents avec une amplitude de $2V\pi$, comme la sur-modulation CS-RZ (voir la figure III.12). Mais évidemment, elle évolue à la fréquence d'information du signal, et non à sa moitié.

Lorsqu'aucune tension n'est appliquée au MZM, le signal optique modulé conserve sa phase nulle. Lorsqu'un différentiel de tension de $2V\pi$ est appliqué, une phase de π est appliquée au signal optique modulé. À noter que lors d'un changement de phase du signal optique, lorsque la tension de commande passe d'une valeur extrême à une autre, elle doit transiter par la valeur qui correspond au minimum de la fonction de transfert du MZM. De ce fait, à chaque changement de phase, un signal DPSK voit son intensité s'annuler avant de revenir à sa valeur plateau.

La figure III.14 représente la trace temporelle en amplitude et en phase, le diagramme de l'œil et le spectre du format DPSK. Le spectre d'un signal DPSK a une largeur similaire à celle du spectre d'un signal NRZ-OOK. Mais dans un spectre DPSK, la fréquence de l'onde porteuse, ainsi que ses harmoniques, ne sont pas apparentes.

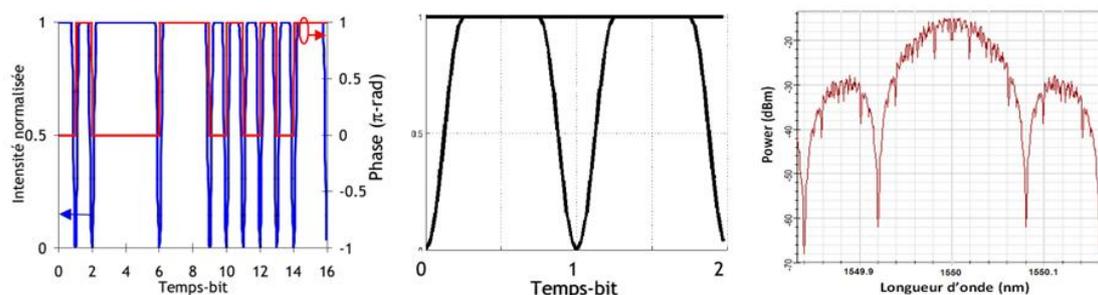


Figure III.14 : trace temporelle, diagramme de l'œil et spectre du format DPSK.

III.5.1.2 Démodulation et détection différentielle :

Nous savons que les détecteurs optiques ne sont sensibles qu'à l'intensité du signal et non à sa phase. Pour récupérer l'information contenue dans la phase, il faut faire interférer le signal avec un signal de référence. Pour ce faire, nous pouvons penser à un montage où le signal interfère avec un oscillateur local stabilisé en fréquence et en phase. C'est le principe de la détection cohérente. Mais un montage de détection cohé-

rente représente un lourd investissement, tant sur le plan technique que financier. Des études à ce sujet sont en cours [109] [110], mais ne sont pas l'objet de ce mémoire.

Nous allons aborder ici une technique bien plus simple, *la détection différentielle*. L'idée de la détection différentielle est de faire interférer le signal optique transmis avec lui-même, mais décalé.

Pour cela, le signal optique est injecté dans un interféromètre à retard (*DI : delay interferometer*), dont le retard correspond à la durée d'un bit, placé juste avant deux photodiodes en topologie équilibrée pour convertir la modulation de phase différentielle en une modulation d'intensité, comme le montre la figure III.15. Le maintien d'une bonne interférence est l'aspect le plus critique dans la conception des récepteurs DPSK [112].

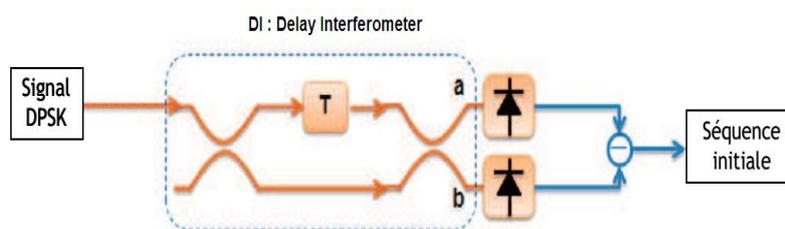


Figure III.15 : Schéma d'un détecteur différentiel pour DPSK (T : retard d'un temps-bit).

Ainsi, pour la détection différentielle, si deux impulsions successives sont en phase, elles interféreront constructivement au niveau du port constructif, et destructivement au niveau du port destructif. Si elles sont en opposition de phase, alors ce sera le contraire.

Un premier avantage apporté par la détection différentielle est qu'elle permet une tolérance accrue du format DPSK aux effets non-linéaires, et en particulier à la SPM (Self-Phase Modulation). Un signal affecté par la SPM subit une rotation de phase proportionnelle à sa puissance. Or comme la puissance du signal est la même quelle que soit la valeur du symbole, chaque symbole subit la même phase non-linéaire, et donc le différentiel de phase entre eux symboles consécutifs est inchangé, même si en absolu la phase a évolué. Ceci n'est malgré tout pas toujours vrai si le signal est affecté par la dispersion, mais quoi qu'il en soit, la tolérance de la DPSK à la SPM est exaltée par rapport à celle du NRZ-OOK.

Le signal DPSK peut être détecté individuellement sur l'un de deux ports du détecteur différentiel (détection dite simple), ou bien sur les deux ports à la fois, auquel cas le signal électrique récupéré est obtenu par soustraction au signal reçu sur le port constructif du signal reçu sur le port destructif. Nous parlons alors de détection équilibrée. Le signal reçu après une détection équilibrée peut donc être positif ou négatif, et la valeur logique « 1 » ou « 0 » récupérée est fonction de ce signe.

Dans le cas d'une détection équilibrée, un autre avantage déterminant du codage DPSK apparaît, qui est que sa sensibilité en back-to-back est améliorée d'environ 3 dB par rapport à une détection simple, mais aussi par rapport au format OOK équivalent.

Pour comprendre cette amélioration de sensibilité, on va étudier les constellations des formats NRZ-OOK et NRZ-DPSK, telles qu'elles sont représentées sur la figure III.16 pour des signaux optiques de même puissance moyenne.

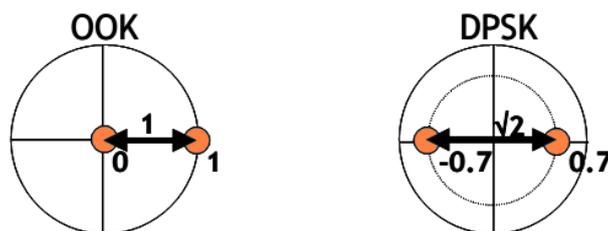


Figure III.16 : Constellations d'un signal NRZ-OOK et NRZ-DPSK.

Dans une constellation, les symboles OOK peuvent être placés, pour l'un à l'origine du plan complexe, et pour l'autre sur le cercle unité. La distance entre ces symboles est donc de 1. Lorsque du bruit d'ASE (bruit dû à l'amplificateur optique) est rajouté au signal, ces symboles deviennent des taches isotropes dans le plan complexe. Pour que ce bruit soit à l'origine d'une erreur, il faut que le signal bruité soit supérieur, en amplitude, à 0.5 pour « 0 », ou y soit inférieur pour « 1 ». Cela correspond à un seuil de 0.5 pour le signal en intensité.

En ce qui concerne la DPSK, les symboles sont placés tous les deux sur un même diamètre du cercle de rayon $\sqrt{2}/2$, pour garantir la même puissance moyenne que le signal OOK précédemment évoqué. Ils sont donc distants de $\sqrt{2}$ l'un de l'autre, et donc peuvent tolérer une amplitude de bruit $\sqrt{2}$ fois plus grande que pour le signal OOK avant de générer une erreur. Donc, une puissance de bruit 2 fois supérieure pour une même puissance de signal, soit un OSNR 3 dB plus faible.

III.5.2 Modulation DQPSK (Differential Quaternary PSK):

III.5.2.1 Principe:

La modulation différentielle en quadrature de phase (DQPSK) [112] est directement inspirée de la DPSK, modulation en phase sur deux niveaux. La différence principale entre ces deux formats est le nombre de valeurs de phase que peut prendre le signal optique modulé. La DQPSK en comporte 4 différentes valeurs, alors que la DPSK n'en comporte que 2. Tout comme pour la DPSK, l'intensité du signal codé en DQPSK reste constante au cours du temps.

La DQPSK fournit une alternative prometteuse à la DPSK puisqu'elle transmet 2 bits/Symbole et présente une complexité réduite du système comparé à un système de QPSK. En plus, elle est tolérante à la dispersion chromatique (CD), dispersion modale de polarisation (PMD), et a une efficacité spectrale élevée, comme le montre la figure suivante.

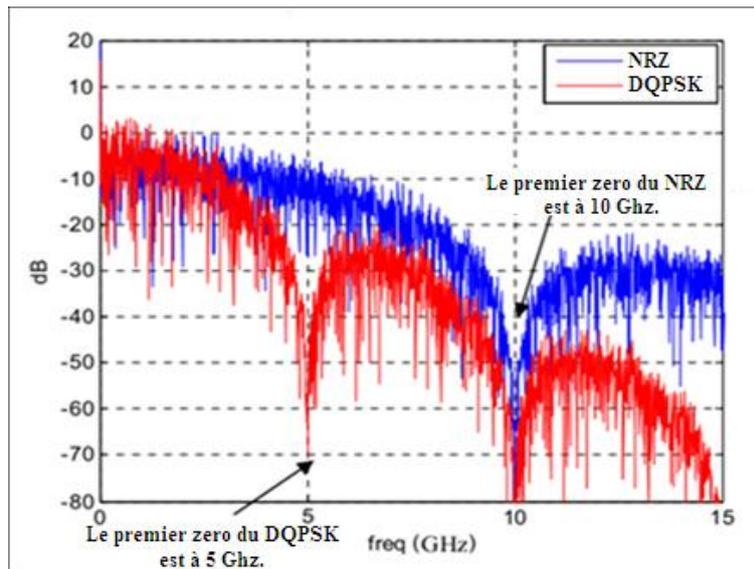


Figure III.17: Présentation spectrale des signaux NRZ et DQPSK pour un débit de 10 Gb/s.

Dans la DQPSK, on code le changement de phase d'un symbole à l'autre et non la valeur de la phase comme la QPSK. Dans ce cas, le récepteur doit détecter des changements de phase et pas les valeurs absolues de phases, ce qui permet d'éviter la synchronisation au récepteur. Le signal transmis est comme suite :

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta(k)) \quad (3.6)$$

avec $kT \leq t \leq (k+1)T$
et

$$\theta(k) - \theta(k-1) = \begin{cases} \pi & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,0) \\ \frac{3\pi}{2} & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,0) \\ 0 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,1) \\ \frac{\pi}{2} & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,1) \end{cases} \quad (3.7)$$

Où f_c est la fréquence porteuse, $\theta(t)$ est la phase dans l'intervalle de temps $[kT, (k+1)T]$, et $(I(k), Q(k))$ est le $k^{\text{ème}}$ symbole à transmettre. La valeur T_b est le temps d'un bit et donc $T = 2T_b$ est la période de symbole.

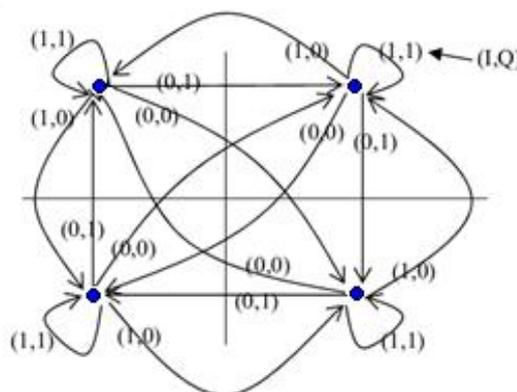


Figure III.18 : La constellation de la modulation DQPSK.

La figure III.18 montre la constellation d'un signal DQPSK où on présente le changement de phase et non pas la phase elle-même.

A la différence de la QPSK, dans la DQPSK avant de moduler les symboles à transmettre $(X(k), Y(k))$ on doit passer par un précodage qui permet de créer les symboles $(I(k), Q(k))$ comme le montre la figure III.19. La fonction du codeur est donnée par les équations logiques suivantes :

$$I(k) = \overline{X(k)} \overline{Y(k)} \overline{I(k-1)} + \overline{X(k)} Y(k) \overline{Q(k-1)} + X(k) \overline{Y(k)} I(k-1) + X(k) Y(k) Q(k-1) \quad (3.8)$$

$$Q(k) = \overline{X(k)} \overline{Y(k)} Q(k-1) + \overline{X(k)} Y(k) Q(k) + X(k) \overline{Y(k)} \overline{Q(k-1)} + X(k) Y(k) \overline{Q(k-1)} \quad (3.9)$$

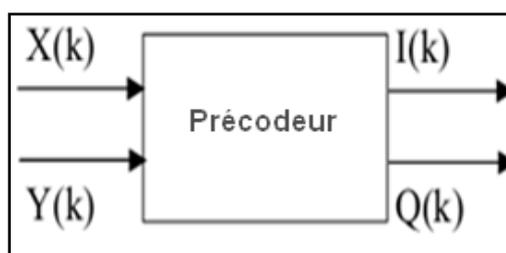


Figure III.19: Schéma bloc du précodeur DQPSK.

III.5.2.2 Méthodes de génération :

Il existe principalement deux méthodes de génération de la DQPSK, consistant chacune en une combinaison de deux modulations de phase [111]. Chaque modulation de phase est commandée par la séquence binaire pré-codée I ou la séquence Q, modulée au débit binaire moitié du débit binaire initial, soit 20 Gbit/s dans le cas d'une transmission de 40 Gbit/s. La combinaison de ces deux modulations correspond à la modulation DQPSK au débit optique de 20 Gbaud/s.

a) Génération « en série » :

Dans le schéma de génération de la DQPSK dit en série, le signal continu issu de la source laser subit une première modulation de phase DPSK de la séquence issue de la séquence I entre 0 et π , au moyen d'un modulateur Mach-Zehnder (MZM). Puis ce signal DPSK est à nouveau modulé en phase par la séquence issue de la séquence Q, entre 0 et $\pi/2$ (d'où la dénomination « Quadrature » de la séquence correspondante). Cette sur-modulation peut être effectuée qu'à l'aide d'un modulateur de phase simple. Après ces deux modulations de phase en série, la phase du signal peut prendre ainsi les 4 valeurs 0, $\pi/2$, π , ou $3\pi/2$, comme leurs différentiels selon le tableau III.2.

Symbole (I,Q)	I	Q	La phase du signal		
			MZM1	MZM2	Sortie finale
(0,0)	0	0	π	$\pi/2$	$3\pi/2$
(0,1)	0	1	π	0	π
(1,0)	1	0	0	$\pi/2$	$\pi/2$
(1,1)	1	1	0	0	0

Tableau III.2 : correspondance entre les symboles transmis et leurs phases.

La figure III.20 montre le schéma de la génération de la DQPSK en série, ainsi que les constellations (idéales) du signal optique modulé, après le premier et le second modulateur.

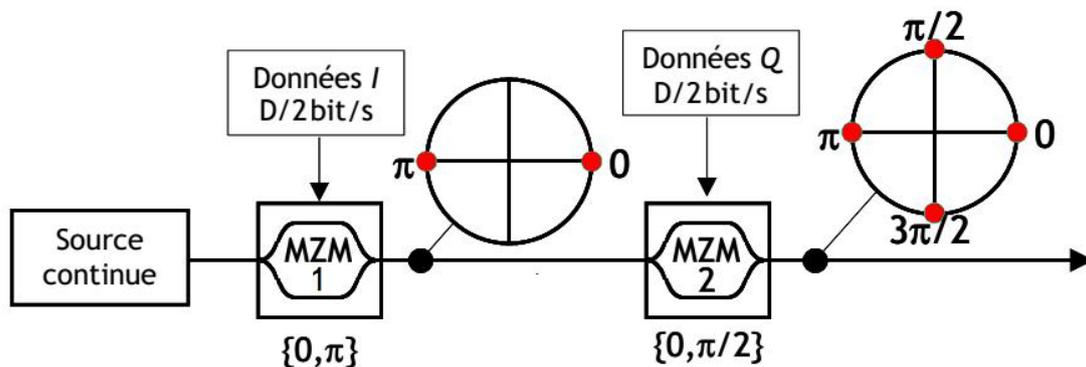


Figure III.20 : Génération de la DQPSK par deux modulateurs MZM en série, et constellations correspondantes du signal optique modulé.

b) Génération « en parallèle » :

Dans ce type d'architecture dite en parallèle, le modulateur DQPSK optique est constitué de deux dual modulateur MZM en parallèle avec une différence de phase de $\pi/2$ entre eux [113].

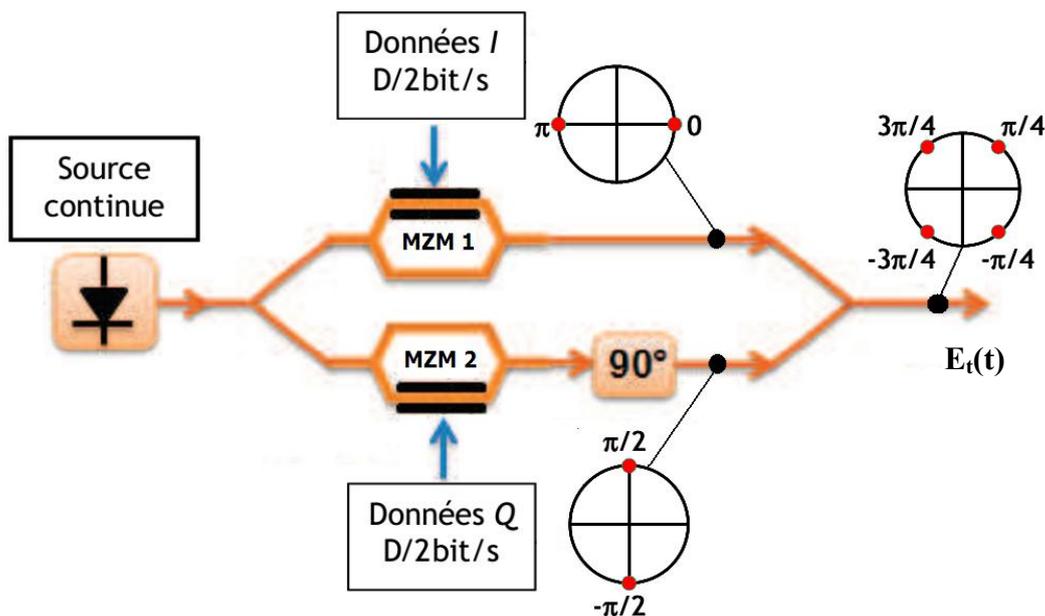


Figure III.21: génération de la DQPSK par deux modulateurs MZM en parallèle, et constellations correspondantes du signal optique modulé.

La figure III.21 montre l'architecture de modulateur DQPSK, constitué de deux voies en parallèle. Sur chaque voie est effectuée une modulation DPSK par MZM, codant pour l'une la séquence issue de la séquence I et pour l'autre la séquence issue de la séquence Q, en attribuant au bit '1' la phase 0 et au bit '0' la phase π .

Le faisceau optique issu de deuxième modulateur (donnée Q) est remodulé une autre fois par un modulateur de phase PM pour créer le déphasage de $\pi/2$, ce qui justifie à nouveau le terme de Quadrature pour désigner cette séquence, ce qui permet d'attribuer au bit '1' la phase $\frac{\pi}{2}$ et le bit '0' la phase $-\frac{\pi}{2}$.

Les signaux issus des deux voies interfèrent ensuite ensemble et donnent ainsi, sur le port constructif, le signal DQPSK. Le signal DQPSK obtenu selon cette méthode présente des niveaux de phase de $\pi/4$, $3\pi/4$, $-3\pi/4$ et $-\pi/4$, mais les différentiels entre ces différents niveaux sont toujours des multiples de $\pi/2$.

Le signal optique à la sortie du modulateur optique DQPSK est [114] :

$$E_t(t) = A \cos\left(\frac{\pi I(t) + V_{DC}}{2 V_\pi}\right) e^{j(\omega_c t + \varphi_c)} + A \cos\left(\frac{\pi Q(t) + V_{DC}}{2 V_\pi}\right) e^{j(\omega_c t + \varphi_c + \frac{\pi}{2})} \quad (3.10)$$

où A est une constante de proportionnalité. $I(t)$ et $Q(t)$ sont les parties réelle et imaginaire du signal électrique complexe $e(t)$ appliquées respectivement sur les deux MZMs. V_{DC} est la tension continue de polarisation et V_π est la tension de commutation demi-onde. ω_c et φ_c sont respectivement la pulsation et la phase de la porteuse.

Dans la condition de polarisation au point d'intensité nulle ($V_{DC} = V_\pi$) et en supposant que $I(t)$ et $Q(t)$ sont petites afin de satisfaire la condition de linéarité nous avons :

$$\begin{aligned} E_t(t) &= A \cos\left(\frac{\pi I(t)}{2 V_\pi} + \frac{\pi}{2}\right) e^{j(\omega_c t + \varphi_c)} \\ &\quad + A \cos\left(\frac{\pi Q(t)}{2 V_\pi} + \frac{\pi}{2}\right) e^{j(\omega_c t + \varphi_c + \frac{\pi}{2})} \\ &= -A \sin\left(\frac{\pi I(t)}{2 V_\pi}\right) e^{j(\omega_c t + \varphi_c)} \\ &\quad - A \sin\left(\frac{\pi Q(t)}{2 V_\pi}\right) e^{j(\omega_c t + \varphi_c + \frac{\pi}{2})} \\ &\approx -\frac{A\pi}{2V_\pi} (I(t) + j Q(t)) e^{j(\omega_c t + \varphi_c)} \\ &= -\frac{A\pi}{2V_\pi} e(t) e^{j(\omega_c t + \varphi_c)} \\ &= -\sqrt{P_t} e(t) e^{j(\omega_c t + \varphi_c)} \end{aligned} \quad (3.11)$$

où P_t est la puissance moyenne transmise.

On peut alors constater que le champ optique à la sortie du modulateur $E_t(t)$ est essentiellement une réplique linéaire du signal de bande de base $e(t)$ converti vers la fréquence optique angulaire ω_c .

La Figure III.22 montre l'évolution temporelle, en intensité et en phase, d'un signal DQPSK issu d'une génération en parallèle. Concernant l'évolution temporelle de la phase, nous reconnaissons les quatre niveaux différents $[-3\pi/4, -\pi/4, \pi/4$ et $3\pi/4]$.

Concernant l'évolution d'intensité on remarque que sa valeur est constante ceci par le fait que la modulation se fait sur la phase est non pas sur l'amplitude de la porteuse.

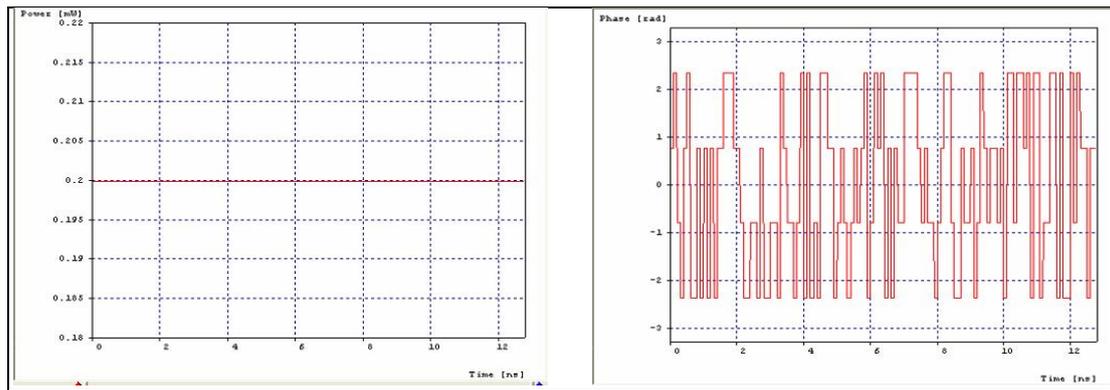


Figure III.22 : (a) La variation temporelle d'amplitude d'un signal optique DQPSK, (b) La variation temporelle de la phase du signal optique NRZ-QPSK.

c) Autres méthodes de génération :

Une troisième méthode pour générer la DQPSK consiste à utiliser un seul modulateur de phase qui code directement les quatre niveaux de phase. Mais la DQPSK générée selon cette technique est moins tolérante aux différents effets de propagation que celle générée selon les deux autres techniques [111], à cause notamment du fait que tous les défauts d'amplitude des signaux électriques incidents sont intégralement reportés dans la phase du signal optique. Nous n'aborderons pas cette méthode ici. De plus, il est bien sûr possible, comme pour les autres formats OOK et DPSK évoqués à la partie III.4.2, de sur-moduler le signal DQPSK, pour obtenir par exemple un signal RZ-DQPSK ou CS-RZ-DQPSK, en vue d'améliorer ses performances en termes de sensibilité ou de tolérance aux effets de propagation.

III.5.2.3 Détection différentielle de la DQPSK :

Tout comme la DPSK, la DQPSK nécessite un procédé de détection différentielle pour retrouver l'information binaire initiale sous forme de signal électrique. Le procédé global de détection différentielle d'un signal DQPSK est présenté en Figure III.23.

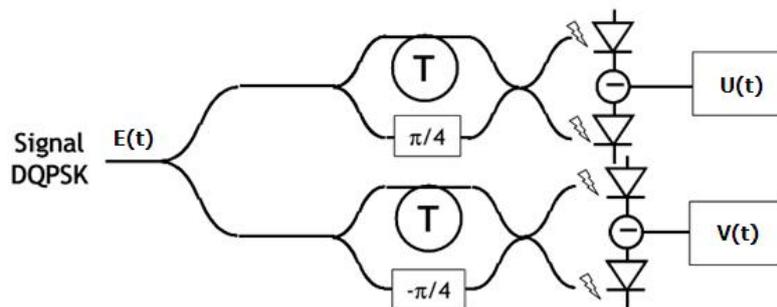


Figure III.23 : Récepteur DQPSK.

Au premier temps, le signal DQPSK est d'abord divisé en deux composantes I et Q à travers le premier coupleur et chaque composante est ensuite détectée par deux récepteurs équilibrés.

À la différence des démodulateurs DPSK, d'une part chaque démodulateur différentiel DQPSK comporte un retard T équivalent au temps-symbole, soit 2 temps-bits, et non

au temps-bit, et d'autre part chacun crée en plus un déphasage supplémentaire entre les signaux de ses deux bras. Il est de $\pi/4$ dans l'un des deux démodulateurs, et de $-\pi/4$ dans l'autre. À un déphasage donné correspond la détection de l'une des deux demi-séquences codées.

Sachant que $E(t)$ est le champ électrique reçu à la forme de (3.11) est modulé en phase. Le coupleur optique fournit la somme et la différence des signaux d'entrée à ses deux sorties. Les sorties $U(t)$ et $V(t)$ sont en fonction de la différence de phase du signal d'entrée $E(t)$ et sont définies comme suite [115]:

$$U(t) = \cos\left(\frac{\pi}{4} + \Delta\phi(t)\right) \quad (3.12)$$

$$V(t) = \sin\left(\frac{\pi}{4} + \Delta\phi(t)\right) \quad (3.13)$$

Les valeurs d' $U(t)$ et de $V(t)$ peuvent alors être employées pour estimer les symboles transmis (X, Y) comme le montre le tableau III.3.

$\Delta\phi$	U	V	Logique (U)= X	Logique (V)= Y
0	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	1	1
$\pi/2$	$-1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	0	1
π	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0	0
$3\pi/2$	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	1	0

Tableau III.3 : Affectation des symboles reçus pour différentes valeurs de phase détectées.

III.6 La modulation OFDM optique (O-OFDM) :

III.6.1 Introduction :

Apparue dans les années 1960, l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de transmission multi-porteuse basée sur la distribution des symboles codés sur plusieurs porteuses dont l'objectif est de limiter les effets du bruit pour une exploitation optimale de la plage de fréquence allouée, et en réduisant la fréquence d'horloge du symbole, lutter contre l'écho dans des canaux sélectifs en fréquence qui comportent des trajets multiples. Une des spécificités de l'OFDM vient du recouvrement mutuel des différentes sous-porteuses, d'une manière dite orthogonale et c'est cette orthogonalité qui permet une utilisation optimale des ressources spectrales et qui facilite l'implémentation numérique.

C'est une ancienne technologie de multiplexage qui trouve aujourd'hui son application dans les systèmes numériques à haut débit suite à l'évolution récente des DAC et ADC combinée au progrès des DSP. Cette modulation est largement utilisée dans les systèmes de télécommunications tels que : la diffusion numérique du son, de données ou de vidéo (DAB : Digital Audio Broadcasting, DVB-T : Digital Video Broadcasting Terrestrial), les systèmes de communication sans fil WiFi (802.11a, 802.11g, 802.16),

la téléphonie cellulaire (3G, 4G) et récemment dans les systèmes optique très longue distance [116] [117].

III.6.2 Principe de fonctionnement de l'OFDM

III.6.2.1 Principe de fonctionnement de la modulation multi-porteuses:

Contrairement aux systèmes mono-porteuses qui modulent sur une porteuse unique à un débit R_s , le principe de la modulation multi-porteuse consiste à transmettre les données de manière simultanée sur N porteuses modulées à un débit de R_s/N .

La bande passante est entièrement occupée par une seule source de données mais chaque sous-porteuse ne porte qu'une partie de ces données, réduisant ainsi le débit par sous-porteuse et donc les interférences inter symboles.

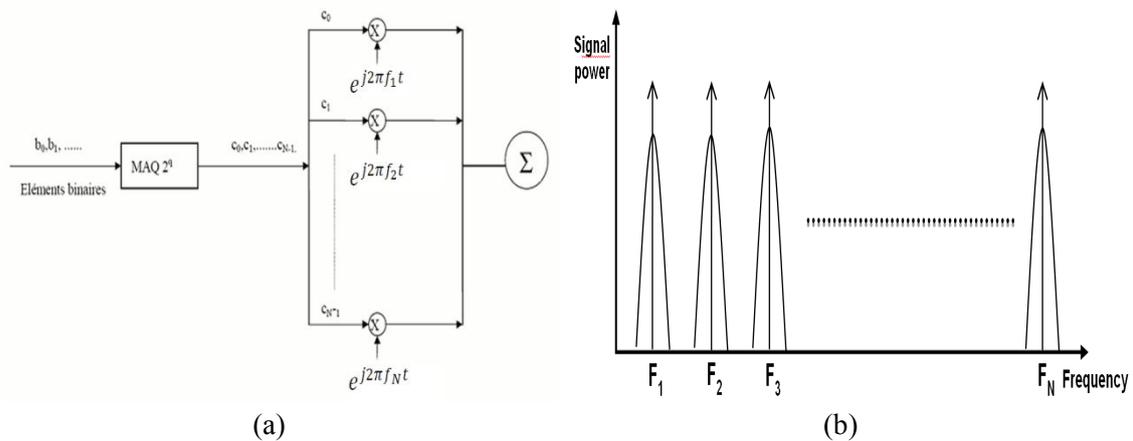


Figure III.24: Modulation multi porteuses, principe de génération (a), répartition des sous-porteuses (b).

Il est important dans la conception des systèmes basés sur l'OFDM, que la bande passante occupée soit plus grande que la bande passante de corrélation du canal d'évanouissement [118]. Quoique certaines sous-porteuses soient dégradées par les trajets multiples, la majorité des sous-porteuses seront bien reçues; et au lieu d'être complètement détruits, les symboles ne sont que légèrement distordus. La réponse en fréquence de chaque sous-canal est relativement constante. Comme chaque sous-canal n'occupe qu'une petite fraction de la bande passante, l'égalisation est relativement plus simple et les algorithmes utilisés permettent une restitution fidèle de la majorité des symboles.

III.6.2.2 Orthogonalité du signal multi porteuses OFDM :

Dans un système de modulation multi-porteuses classique de type FDM (Frequency Division Multiplexing), les porteuses sont espacées de telle manière que les signaux peuvent être reçus en utilisant des filtres et démodulateurs convenables (Figure III.24b), ceci va engendrer une bande très grande et donc le système devient inefficace au point de vue spectrale, pour cela il faut minimiser l'espace entre les sous porteuses. Il est cependant possible de disposer les porteuses dans un signal OFDM pour que se chevauchent leurs bandes de fréquence, et que le signal puisse être reçu sans interfé-

rence entre les bandes. Afin de réaliser cela, les porteuses doivent être orthogonales du point de vue mathématique.

Deux impulsions sont toujours orthogonales si elles ne se chevauchent ni dans le domaine temporel, ni dans le domaine fréquentiel (figure III.25), et que l'impulsion ne peut être strictement limitée en bande et dans le temps [119]. En plus, les porteuses sont linéairement indépendantes (c-à-d orthogonales) si leur espacement est un multiple de $1/T_s$, ou T_s et le temps d'un symbole.

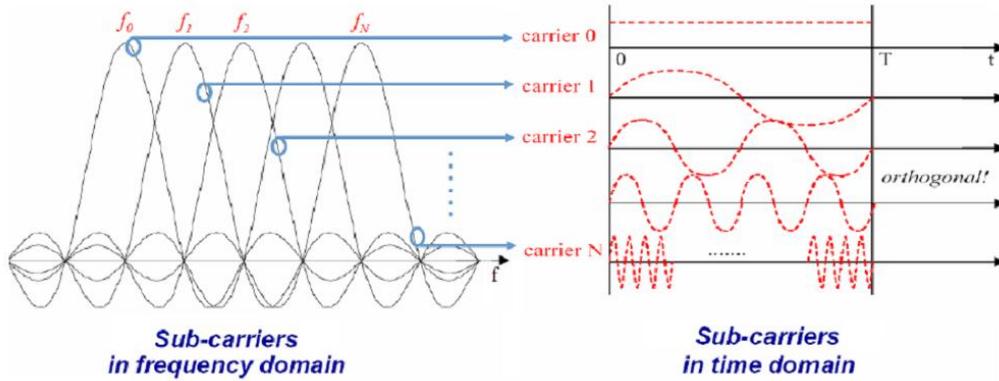


Figure III.25: Superposition des spectres de N porteuses orthogonales.

III.6.2.3 Modulation et démodulation

Afin de transmettre les données sur un nombre N_{sc} de sous-porteuses, les symboles c_k (nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation de modulation QAM à 2^q états) sont regroupés par paquets de N symboles qu'on appellera symbole OFDM.

Soit une séquence de N symboles C_0, C_1, \dots, C_{N-1} , chaque symbole c_k module un signal à la fréquence f_k pour donner un signal représenté par [118]:

$$S_c(t) = C_k e^{j2\pi f_k t} \quad (3.14)$$

La somme des signaux correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est donnée par la relation suivante :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi f_k t} \quad (3.15)$$

La condition d'orthogonalité étant satisfaite, alors :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}, \Rightarrow S(t) = e^{j2\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi \frac{k}{T_s} t} \quad (3.16)$$

Un symbole est en effet modulé par une porteuse pendant une fenêtre rectangulaire de durée T_s , et le spectre en fréquence du signal est représenté par la figure III.25a.

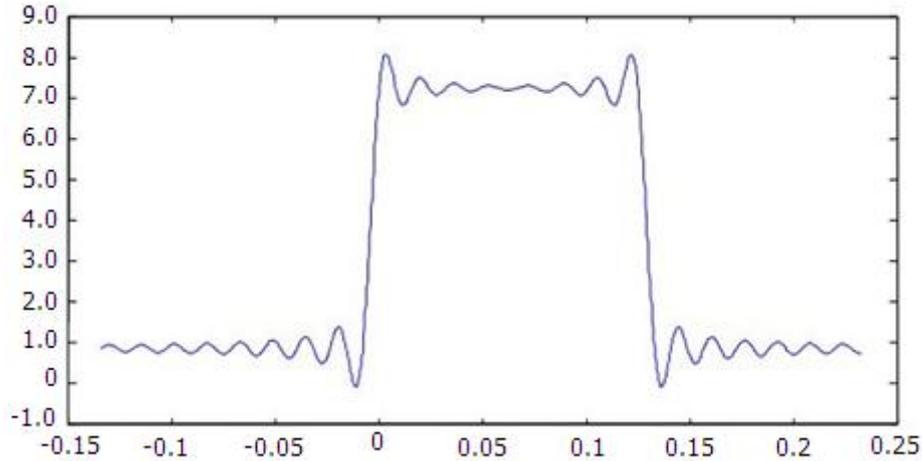


Figure III.26 : Spectre du signal OFDM.

La figure III.26, montre que, la bande en fréquence est occupée de façon optimum par rapport aux autres modulations multi-porteuses, puisque le spectre est presque plat dans cette bande.

La bande occupée est à peu près $B=N/T_s$. (En excluant les lobes secondaires de part et d'autre de la bande), chaque sous-porteuse occupant à peu près $1/T_s$.

Le signal parvenant au récepteur s'écrit, sur une durée symbole « T_s »:

$$y(t) = \sum_{K=0}^{N-1} C_K H_K(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{K}{T_s})t} \quad (3.17)$$

La fonction de transfert du canal représentée par $H_k(t)$ varie lentement, et est presque constante sur la durée T_s .

La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses suivant le schéma classique, en multipliant par le signal de l'oscillateur local $e^{-j2\pi f_0 t}$.

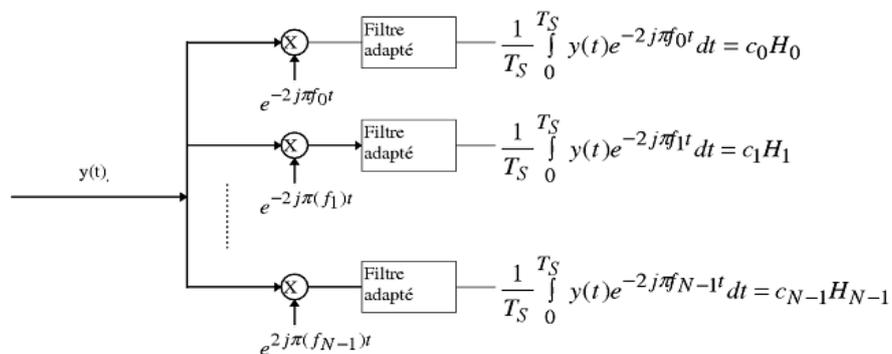


Figure III.27: Schéma de principe du démodulateur.

III.6.2.4 Implantation numérique du modulateur :

La complexité de concevoir plusieurs émetteurs et récepteur et leurs mises en œuvre pour la transmission de type OFDM à obliger les chercheurs d'abandonner cette technique, mais la transformée de fourrier à permis de surpasser ce problème. L'analyse algébrique indique que le signal de sortie $s(t)$ est sous la forme (3.16).

En discrétisant ce signal et en le ramenant en bande de base ($f_0=0$) pour l'étude numérique on obtient une sortie $s(n)$ sous la forme :

$$s_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (3.18)$$

Les $s(n)$ sont donc obtenus par une transformée de Fourier inverse discrète des $c(k)$. En choisissant le nombre de porteuses N tel que $N = 2^n$, le calcul de la transformée de Fourier inverse se simplifie et peut se calculer par une simple IFFT nous conduisant au schéma numérique suivant :

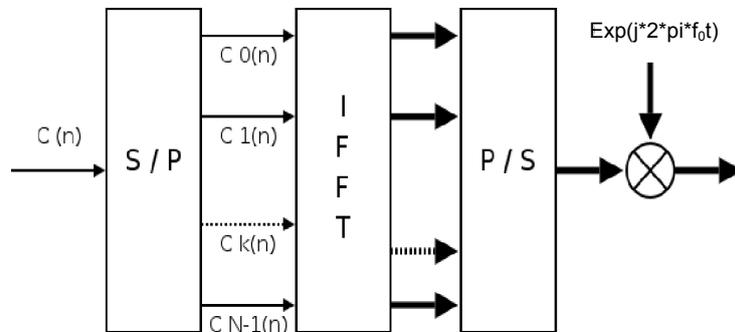


Figure III.28: Schéma du modulateur OFDM numérique.

L'implémentation de cette modulation est très simple puisqu'il suffit de paralléliser les symboles issus d'une constellation (symboles C_n), d'appliquer une IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) et de les sérialiser. Les symboles OFDM subissent une conversion analogique, et un filtrage passe-bas avant d'être transmis sur une porteuse après transposition. Le récepteur exécute les processus inverses.

III.6.2.5 Implantation numérique du démodulateur :

L'analyse théorique définit le signal discrétisé reçu au niveau du démodulateur sous la forme.

$$z(t_n) = z_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (3.19)$$

Z_n est la transformée de Fourier discrète des $c_k H_k$, la démodulation consiste donc à effectuer une transformée de Fourier directe discrète du signal reçu. Le nombre de porteuses ayant été choisi tel que $N = 2^n$, on peut réaliser ce calcul à l'aide d'une FFT. On obtient alors le schéma de principe suivant :

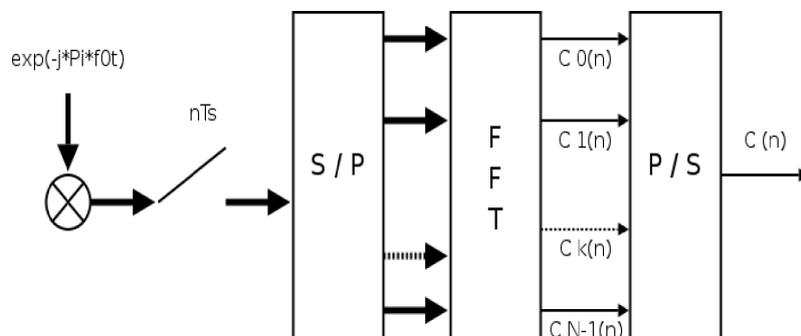


Figure III.29: Schéma du démodulateur OFDM numérique.

III.6.2.6 Avantages et inconvénients de l'OFDM

Avantages :

Les techniques de modulation OFDM ont été longtemps étudiées et mises en application pour combattre des affaiblissements de canal de transmission et leurs applications ont été étendues à des communications radio à haute fréquence aux réseaux téléphoniques, radiodiffusion numérique (audio et télévision), jusqu'aux communications optiques.

Les principaux avantages sont :

- L'utilisation efficace de la bande passante disponible puisque les sous-canaux se recouvrent.
- L'étalement de la fréquence sur plusieurs symboles. Ceci randomise effectivement les erreurs provoquées par les évanouissements de Rayleigh, de sorte qu'au lieu que plusieurs symboles adjacents soient complètement détruits, des symboles en parallèle sont légèrement distordus.
- Augmentation de la période du symbole et ainsi la réduction de la sensibilité du système au délai d'étalement.

Inconvénients :

Cependant, loin d'être idéale, la modulation (OFDM) présente aussi des inconvénients qui sont :

- Le signal OFDM est affecté par les distorsions non linéaires des amplificateurs de puissance des émetteurs (parce que c'est une modulation amplitude et de fréquence).
- L'OFDM est très sensible au décalage de fréquence porteuse provoqué par l'instabilité de l'onde porteuse et de l'effet Doppler.
- Les difficultés de décision sur le temps de démarrage de transmission des symboles de la (FFT) à la réception.

III.6.2.7 L'intervalle de garde

Le maintien de l'orthogonalité des sous-canaux dans l'OFDM, la séparation complète de chaque sous-canal par la FFT à la réception n'est possible que lorsqu'il n'y a ni ISI (intersymbol interference), ni ICI (intercarrier interference) introduits par les distorsions du canal de transmission. Ces conditions ne sont pas réalisables dans la pratique, de plus le spectre d'un signal OFDM n'est pas strictement limité en bande, les distorsions linéaires tels que les trajets multiples provoquent l'étalement de l'énergie d'un canal dans les canaux qui lui sont adjacents et par conséquent cause les ISI.

La solution serait d'introduire un intervalle de garde, parfois appelé préfixe cyclique, de telle sorte que le symbole OFDM soit périodiquement étendu à partir de l'onde harmonique initiale de période T_s (fenêtre d'analyse de Fourier) par un intervalle de longueur Δ pour avoir une harmonique de mêmes période et phase mais d'une durée $T = T_s + \Delta$.

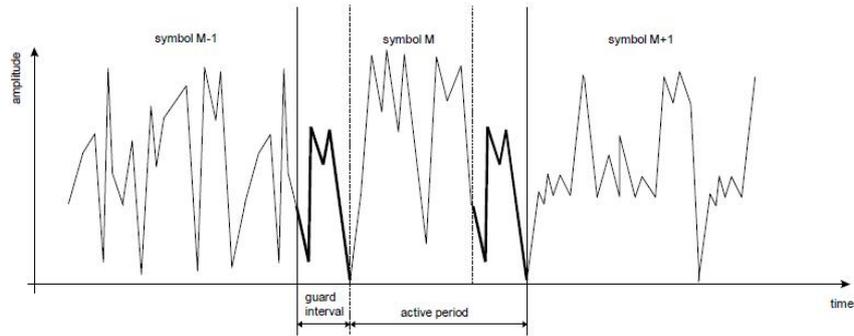


Figure III.30: Illustration de l'intervalle de garde

Lorsque l'intervalle de garde est supérieur à la réponse impulsionnelle du canal, ou au délai multitrajet, les ISI peuvent être éliminés. Le rapport intervalle de garde à durée du symbole utile dépend de l'application mais Δ est d'ordinaire inférieur à $T_s/4$.

Dans un système de transmission optique utilisant la modulation OFDM, la longueur du préfixe cyclique peut être ajustée en fonction de l'effet de la dispersion chromatique du canal, en utilisant la formule [120]:

$$\Delta = \frac{c |D_t| N_{sc}}{f^2 T_s} \quad (3.20)$$

Où f est la fréquence de la porteuse optique, C est la vitesse de la lumière, D_t est la dispersion chromatique cumulée totale en unités de ps/pm, et N_{sc} est le nombre de sous-porteuses OFDM.

Une longueur trop élevée de Δ entraîne une diminution du débit car la portion d'échantillons utiles diminue.

III.6.2.8 Estimation de canal pour les systèmes OFDM

La réponse impulsionnelle du canal de communication peut varier d'une façon significative d'un symbole OFDM à un autre. Dans le cas des canaux rapidement fluctuants, cette fonction de transfert peut subir des changements tout aussi importants à l'intérieur d'un même symbole OFDM. Par conséquent, l'estimation dynamique du canal devient une étape incontournable permettant d'assurer une démodulation correcte des symboles OFDM.

L'estimation de canal peut être effectuée à l'aide de l'insertion de symboles pilotes sur toutes les sous-porteuses d'un symbole OFDM avec une période spécifique, connue sous le nom « estimation du canal par pilotes de type bloc ». Elle peut aussi être réalisée en insérant des symboles pilotes dans chaque symbole OFDM, il s'agit des méthodes appelées « estimation du canal par pilotes de type peigne ». L'estimation du canal par pilotes de type bloc a été développée sous l'hypothèse d'un canal à évanouissement lent, ce qui veut dire que le canal demeure invariant sur plusieurs symboles OFDM. Par contre, l'estimation du canal par pilotes de type peigne a été présentée pour assurer l'égalisation quand le canal change d'un symbole OFDM à un autre ou au sein d'un même symbole OFDM.

a) Principe d'estimation du canal par pilotes de types « peigne » :

L'algorithme est basé sur utilisation des signaux pilotes de type peigne pour le système OFDM comprenant N sous-porteuses et un préfixe cyclique de longueur N_g . Les symboles pilotes de type peigne sont fixés lors de la transmission et régulièrement espacés entre les symboles de donnée comme illustré dans la figure III.31, avec L_f la distance en terme de nombre de sous-porteuses entre deux symboles pilotes consécutifs dans le domaine fréquentiel. L_f peut-être choisi sans la nécessité de respecter le théorème d'échantillonnage dans le domaine fréquentiel et N_p devra répondre à la condition suivante : $N_p \geq L$ où L représente le nombre de chemins multiples présents dans le canal de communication.

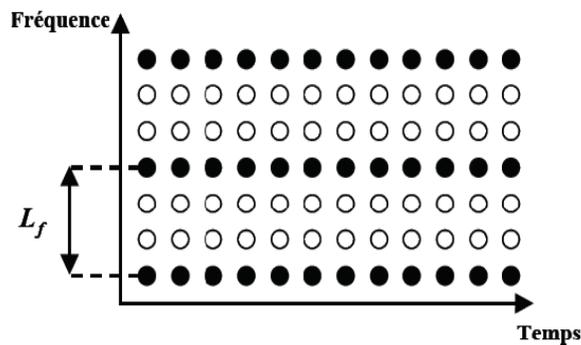


Figure III.31: Pilote de type peigne.

b) Principe d'estimation du canal par des signaux pilotes du type bloc :

Son algorithme est basé sur l'insertion périodique de signaux pilotes sur l'ensemble des sous porteuses d'un système OFDM. Un bloc de symboles pilotes est transmis dans toute la bande du canal d'une manière cyclique.

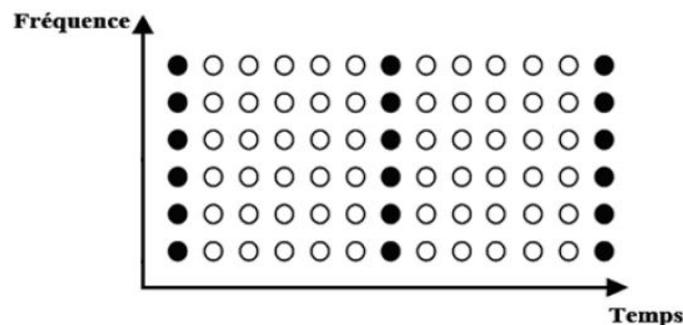


Figure III.32: Pilote de type bloc.

L'hypothèse fondamentale sur laquelle repose l'algorithme peut être énoncée de la façon suivante :

Si la durée effective d'un symbole OFDM est inférieure à 10% du temps de cohérence du canal (ce qui suppose un canal pas très sélectif en temps), alors la variation du gain complexe du canal peut être considérée linéaire. Par ailleurs, ce type d'algorithme n'est pas robuste en présence de canaux à grande mobilité.

III.6.3 Un système de transmission optique OFDM :

Un système OFDM optique d'une manière globale peut être considéré en cinq blocs fonctionnels qui sont entre autres :

- L'émetteur OFDM RF
- Le convertisseur-abaisseur RF-to-optical (RTO)
- Le canal optique
- Le convertisseur éleveur-optical-to-RF (OTR)
- Le récepteur OFDM RF

Un émetteur OFDM est constitué d'un convertisseur série-parallèle, d'un module de mise en correspondance des données (data mapping), d'un bloc IFFT, d'un additionneur de préfixe cyclique, d'un convertisseur parallèle-série, de convertisseurs numériques-analogique (CNA) et de filtre limiteur de bande.

Une conversion linéaire entre le signal RF et le signal optique peut être réalisée par l'intermédiaire des modulateurs Mach-Zehnder à leur point milieu (partie linéaire du modulateur). Aussi une transformation linéaire du signal optique au signal électrique (RF) est réalisable avec une détection directe ou cohérente.

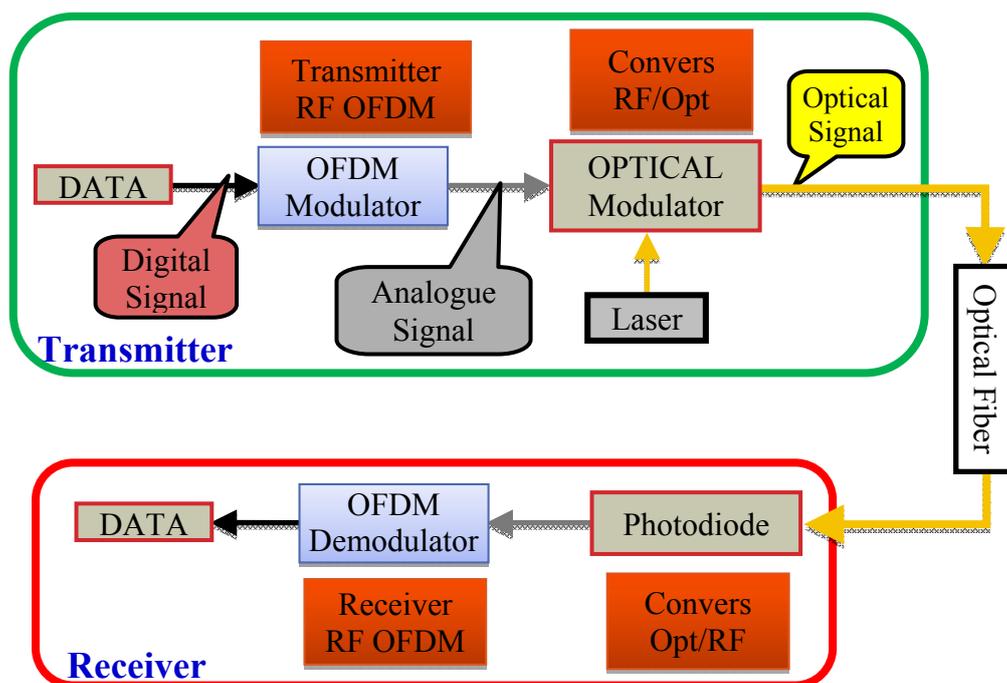


Figure III.33: Blocs fonctionnels d'un système OFDM optique.

III.6.4 Techniques de génération de signal OFDM optique :

Pour générer un signal OFDM optique, on peut trouver deux grandes méthodes et ceci dépend directement de la technique utilisée dans la détection:

- Conversion optique à détection directe.
- Conversion optique à détection cohérente.

III.6.4.1 Conversion optique à détection directe : Cette méthode utilise le principe de conversion du signal OFDM en un signal optique en utilisant seulement un seul modulateur optique pour moduler la porteuse optique. Dans cette méthode on peut trouver deux architectures, tout dépend de la nature du signal OFDM électrique généré.

a) Émetteur DD-OOFDM en bande de base :

Dans cette méthode le signal OFDM en bande de base est purement réel et sera directement modulé en amplitude par l'intermédiaire d'un seul modulateur optique externe. En général, le signal de sortie d'une IFFT est complexe et non pas réel. Dans un système où on a besoin d'une sortie purement réelle, le vecteur d'entrée \mathbf{I} de l'IFFT doit respecter la symétrie hermitienne [121] donc la partie imaginaire du signal de sortie de l'IFFT est nulle. La figure III.34 montre les valeurs du $\mathbf{I}=\mathbf{I}_0 \dots \mathbf{I}_{N-1}$.

$$\mathbf{I}=\mathbf{I}_0 \dots \mathbf{I}_{N-1} = X_0 \dots X_{N/2-1}, X_{N/2}, X_{N/2-1}^* \dots X_1^* \quad (3.21)$$

Où X_k^* représente le conjugué complexe de X_k et N est la taille de l'IFFT [122].

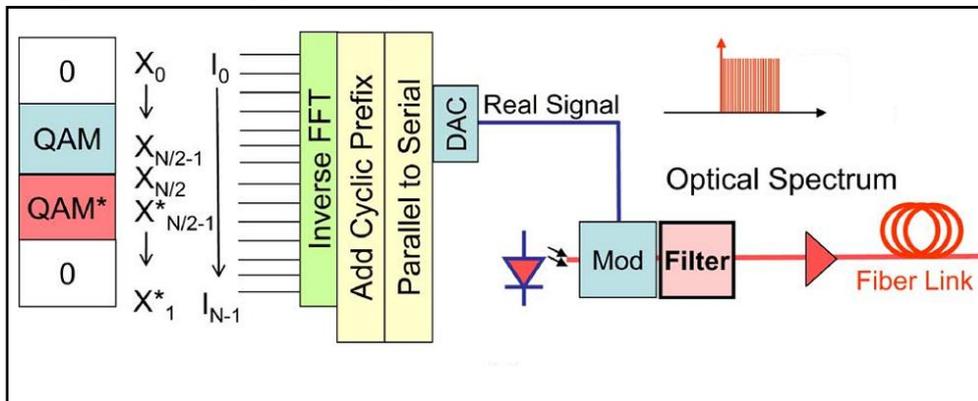


Figure III.34 : Émetteurs DD-OOFDM, en utilisant la symétrie hermitienne.

Cette architecture sera utilisée dans la partie simulation à cause de sa simplicité et son coût très réduit par rapport à la deuxième méthode qui sera détaillée dans le paragraphe suivant.

b) Émetteur DD-OOFDM à fréquence intermédiaire (FI) :

Les détails de la deuxième conception sont montrés dans la figure III.35. Le DAC unique de la première conception est remplacé par deux DACs, on ajoute un étage de fréquence. Cela permet au signal OFDM en bande de base complexe d'être mélangé avec une porteuse RF avant d'attaquer le modulateur optique [117].

La conversion en FI permet le placement flexible du spectre du signal par rapport à la porteuse optique. Comme dans la première conception un filtre optique est utilisé pour supprimer une bande latérale afin de réduire le spectre optique à moitié.

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle présente une efficacité spectrale importante par rapport à celle de la première conception.

Mais l'inconvénient principal de cette méthode ce qu'elle nécessite l'utilisation d'un oscillateur local très haute fréquence pour les débits très importants, ainsi qu'il soit le plus stable possible est ceci pour l'émetteur et le récepteur pour la démodulation.

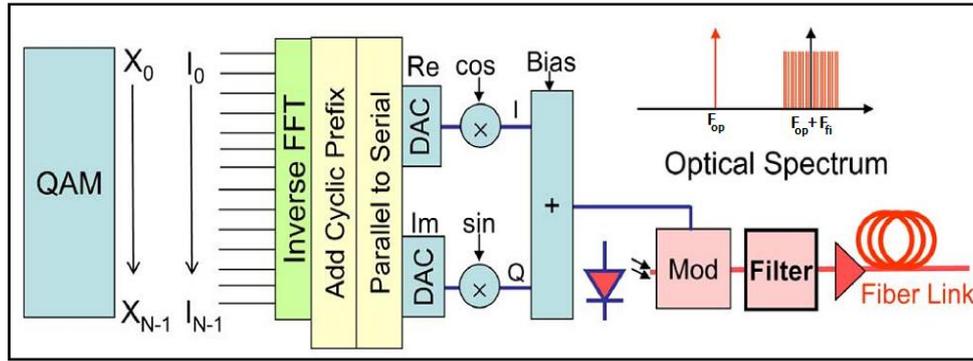


Figure III.35: Émetteurs DD-OOFDM, en utilisant la fréquence intermédiaire

III.6.4.2 Conversion optique à détection cohérente (CO-OFDM) :

Dans l'architecture CO-OFDM (Figure III.36a), l'émetteur optique utilise un modulateur optique I/Q (Figure III.36b) qui est constitué de deux MZMs en parallèle afin convertir les parties réelles et imaginaires de signal de sortie de l'IFFT ($E(t)$) du domaine RF en bande de base vers le domaine optique, c'est à dire, chaque MZM est respectivement piloté par la partie réelle ou imaginaire de $E(t)$ [117].

Afin de conserver le déphasage entre la partie réelle et imaginaire de $E(t)$, les signaux optiques issus des deux modulateurs MZM sont déphasés entre eux par 90° , en suite on filtre le signal optique pour éliminer une bande latérale.

Cette méthode présente un avantage important et peut être utilisée pour n'importe quel débit, puisqu'elle ne nécessite aucun oscillateur local RF (pas d'étage IF), par contre on doit utiliser une réception cohérente pour détecter le signal reçu, ce qui rend le récepteur plus complexe.

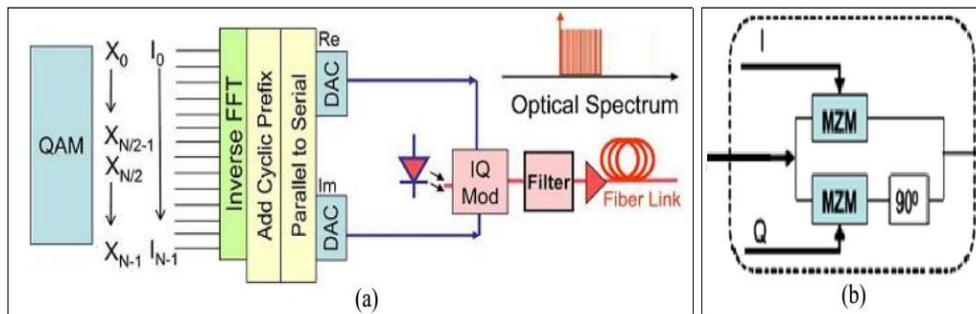


Figure III.36: L'architecture du système CO-OFDM.

III.6.5 Méthodes et techniques de détection OOFDM :

Les techniques de détection utilisées dans un système OOFDM sont:

- **La détection non cohérente** : seule la présence ou l'absence de l'énergie est assurée et aucune information de phase n'est récupérée.
- **La détection cohérente** : un signal est détecté en utilisant une référence de phase de porteuse produite au niveau du récepteur.

III.6.5.1 DD-OOFDM récepteur :

La figure III.37 montre le récepteur à détection directe simple requise pour la modulation DD-OOFDM. Cette méthode est réalisée simplement par l'utilisation d'une seule photodiode. Comme le signal reçu à partir du PD est composé d'un certain nombre de fréquences de plusieurs ordres. Ceux-ci peuvent être classés en composants utiles à partir de lesquels les données sont récupérées, et des composants indésirables qui peuvent limiter les performances du système. Pour éliminer ces composantes, généralement on utilise un filtre passe-bas après la photodiode.

La partie numérique du récepteur est un démodulateur OFDM classique, dans lequel la phase et l'amplitude de chaque sous-porteuse reçue sont corrigées par un simple égaliseur en utilisant les méthodes d'estimation du canal.

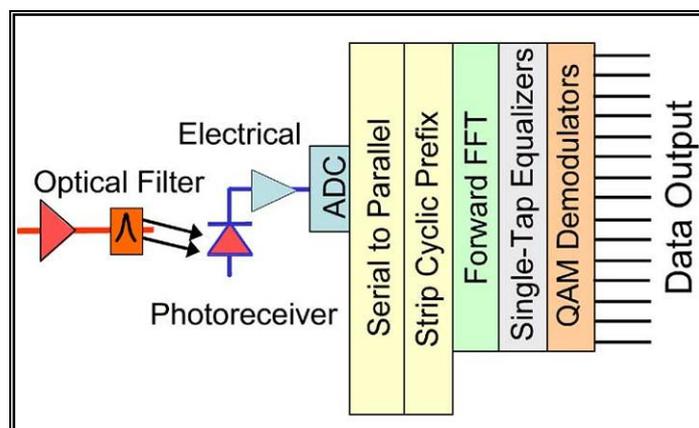


Figure III.37: La structure de DD-OOFDM récepteur

III.6.5.2 CO-OFDM récepteur :

Dans la détection CO-OFDM, le récepteur utilise deux couples de photodiodes équilibrés et un laser local envoyant une puissance optique à la longueur d'onde de signal reçue suivie d'un coupleur optique hybride 90° pour effectuer une détection optique I/Q. Le récepteur RF OFDM effectue le traitement en bande de base du signal résultant pour récupérer les données. Les avantages d'une telle architecture sont :

- (i) la sensibilité importante du récepteur
- (ii) l'élimination de la nécessité d'utiliser un filtre passe-bas à la réception.

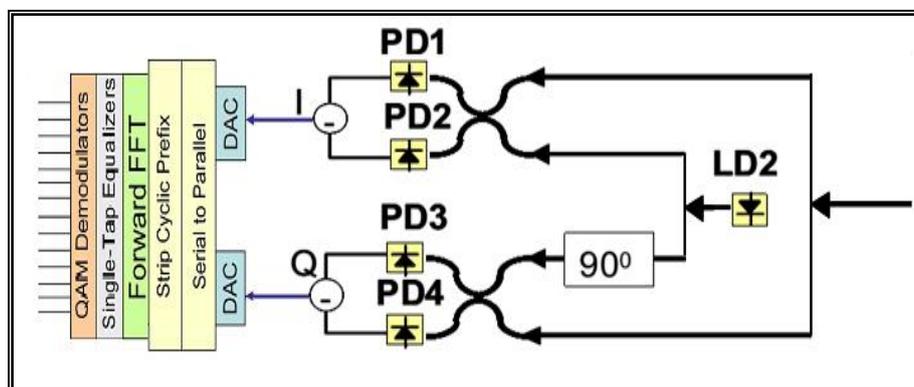


Figure III.38: La structure de CO-OFDM récepteur.

III.7 Conclusion :

Dans cette partie, on a énuméré l'ensemble des techniques de modulation utilisées dans un système de communication optique. Ces méthodes sont proposées pour la première fois dans les réseaux optiques longs et très longues distances. Dans le cadre de notre thèse, on va utiliser ces méthodes dans un réseau d'accès optique WDM-PON, dans ce qui suit on présente et on simule des architectures avec des configurations diverses, tout en respectant la simplicité du système.

Chapitre IV:

Simulations et résultats des architectures proposées

IV.1 Introduction

Nous avons vu dans l'introduction générale que l'objectif principal de notre étude est d'analyser l'influence de l'utilisation de nouveaux formats de modulation optiques dans les réseaux d'accès optiques de type WDM-PON fonctionnant au très haut débit.

Pour ce faire, nous avons été amenés lors de cette thèse de proposer de nouvelles architectures de réseau WDM-PON pour les différents types de modulations et faire des comparaisons entre eux, selon les performances du système. L'outil de validation de cette étude est basé sur des simulations, où nous avons développé des modèles des simulations en utilisant l'outil de simulation optique **OptiSystem 12.0** [123]. Ce dernier fait partie d'une suite de conceptions logicielles par la société OPTIWAVE, et qui permet à des utilisateurs de prévoir, d'examiner et de simuler des liaisons optiques dans la couche de transmission des réseaux optiques modernes.

Dans cette partie, nous présentons notre architecture générale du réseau d'accès étudié. Nous donnerons ensuite la chronologie des travaux et les résultats obtenus pour les différents formats utilisés en évaluant la variation de BER (Bit Erreur Rate) en fonction de la variation de l'OSNR (Optical Signal Noise Ratio).

IV.2 Description du système WDM PON étudié

Afin de tester les formats de modulations avancés appliqués dans le réseau d'accès WDM PON, plusieurs simulations ont été réalisées au niveau du Laboratoire de Recherche Appliquée en TIC (LaRATIC) à l'institut national des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication en collaboration avec le Laboratoire des Télécommunications de l'université de Tlemcen (LTT).

L'idée générale de ces simulations est de considérer la fibre optique comme une boîte noire soumise à des tests pour différents formats de modulations en évaluant les performances du système et voir leurs résistances contre les différents effets néfastes de transmission bidirectionnelle. Cette partie décrit l'architecture globale ainsi les paramètres importants pris dans les différents scénarios de simulations.

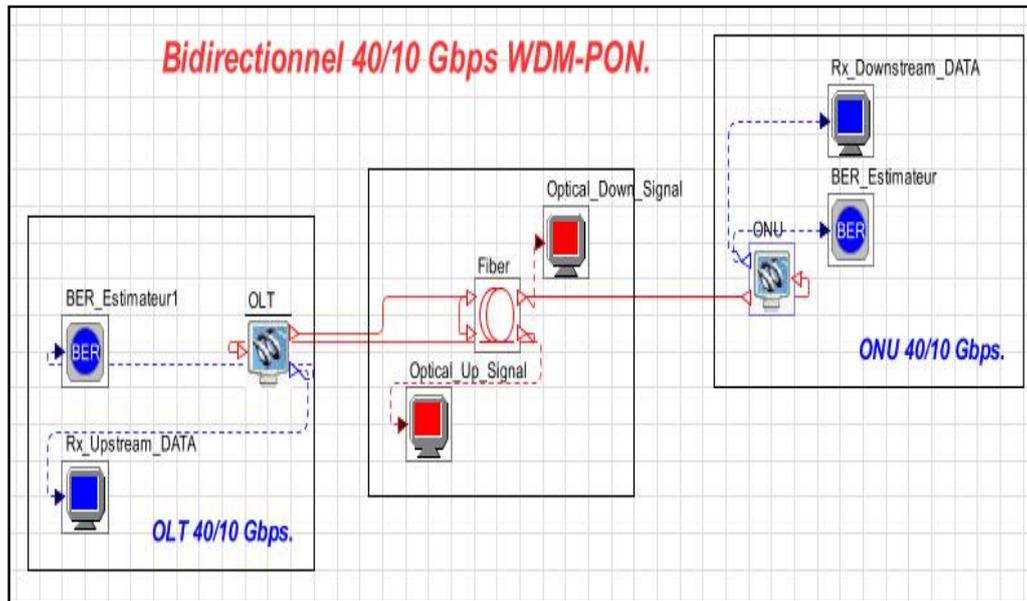


Figure IV.1: Architecture générale du système WDM-PON simulé [125].

La figure IV.1 présente l'architecture générale du système simulé, comprenant une terminaison de ligne optique OLT (Optical Line Terminal), une unité optique du réseau ONU, connectées entre eux par une fibre optique bidirectionnelle standard (SMF-28) de 30 km.

Le signal de downstream généré par l'OLT est envoyé à travers la fibre optique vers l'ONU qui représente le client final, les données montantes sont re-modulées par la porteuse optique descendante au niveau d'ONU et seront transmises vers l'OLT. Notons que le facteur d'affaiblissement dans la fibre est de 0.2 dB/km, l'effet de la dispersion chromatique n'est pas simulé puisque la compensation de cette dernière est parfaitement maîtrisée par plusieurs méthodes dédiées à cela. Tous les effets non linéaires de la fibre sont pris en compte dans cette étude, ainsi les effets de la dispersion de Rayleigh et de Brillouin présentés dans la fibre bidirectionnelle.

IV.3 Simulations réalisées et résultats

Dans cette partie on va détailler l'ensemble des simulations faites durant cette thèse et présentet les résultats trouvés, par la suite nous ferons une comparaison entre les résultats afin de favoriser le système le plus adéquat à nos contraintes.

Comme nous avons déjà mentionné, notre système utilise le principe de remodulation des données montantes sur la porteuse descendante, on note ici que le signal upstream pour l'ensemble des simulations utilise la re-modulation NRZ-ASK, tandis que la modulation des données du signal descendant varie suivant les scénarios, cités dans la suite de ce paragraphe.

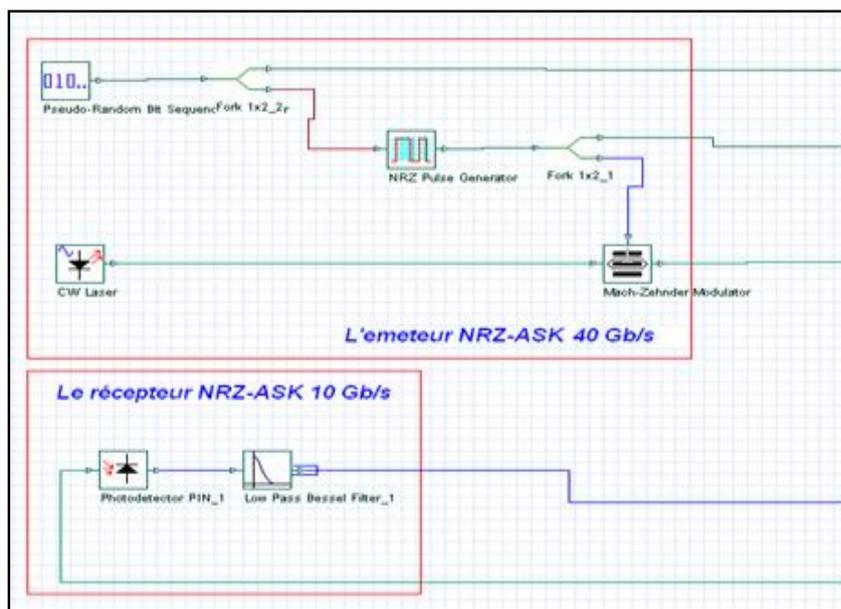
Les débits de transmissions dans les différentes simulations sont pris comme suite : le downlink fonctionne à 40 Gb/s, et le uplink fonctionne à 10 Gb/s.

IV.3.1 WDM PON basé sur la modulation NRZ-ASK/ASK

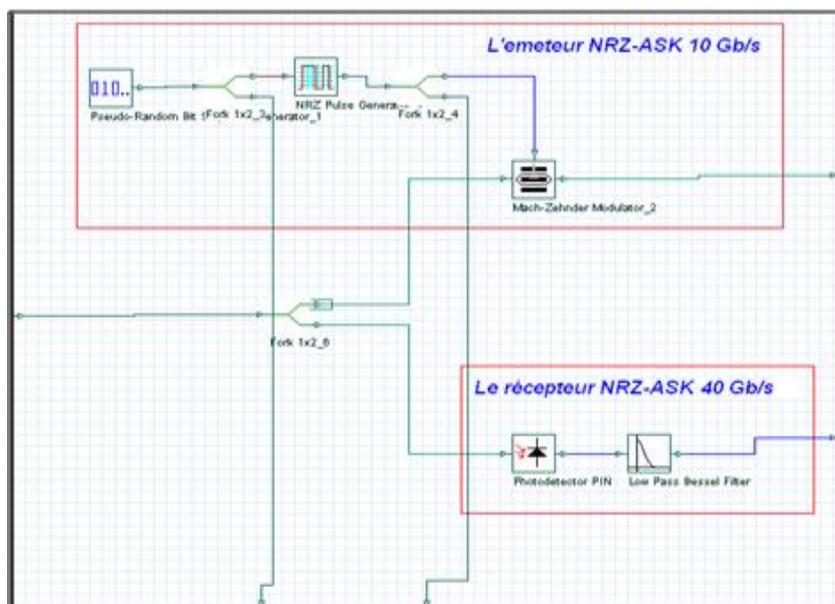
IV.3.1.1 Architecture globale du réseau

La figure IV.2a montre l'architecture interne de l'OLT du réseau, l'émetteur NRZ-ASK 40 Gbps est un émetteur optique classique, composé d'une source laser CW (continuous wave) qui permet de générer la porteuse optique de puissance $P_e = 0$ dBm à la longueur d'onde de 1550 nm. Les données sont générées par le générateur de séquences aléatoires PRBS d'ordre 2^7-1 de longueur de 512 bits. Après le codage NRZ ces données sont modulées optiquement à travers le modulateur Mach-Zehnder. Le récepteur des données montantes est réalisé par l'utilisation d'une simple photodiode, puisque la modulation utilisée est de type ASK, suivie par un filtre passe-bas pour supprimer les bruits additifs du récepteur.

Du coté de l'ONU, on trouve pratiquement la même structure, un récepteur 40Gb/s pour la détection du signal descendant, et l'émetteur d'ONU qui utilise le principe de la re-modulation ASK/ASK, en récupérant une partie du signal optique descendant et le réinjecter dans un modulateur MZM après son filtrage afin de moduler les données upstream à un débit de 10 Gb/s (Figure IV.2b).



(a)

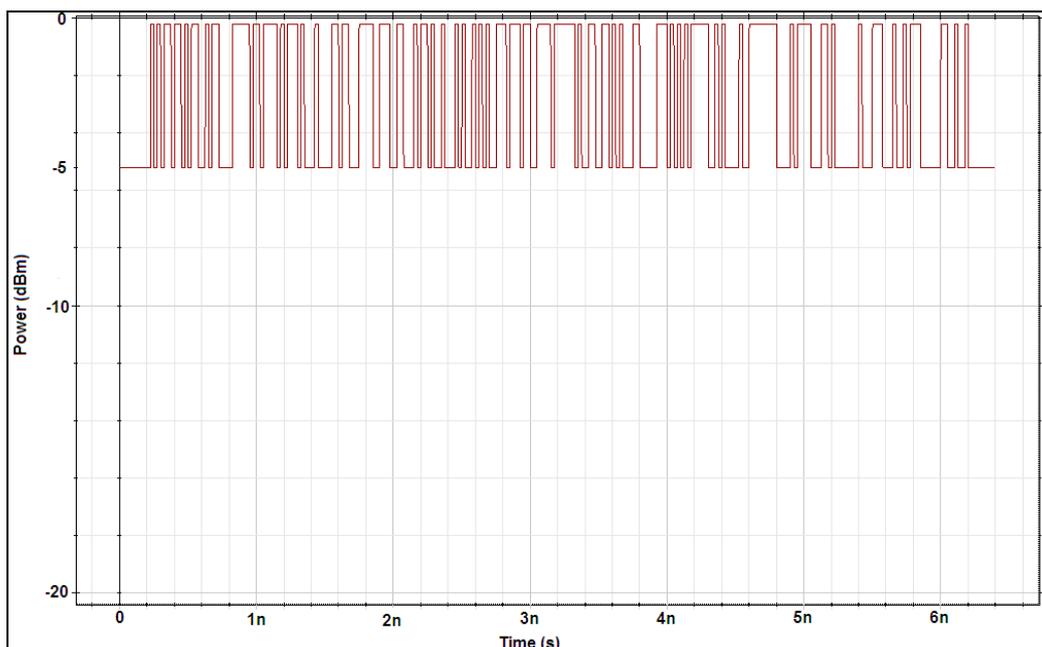


(b)

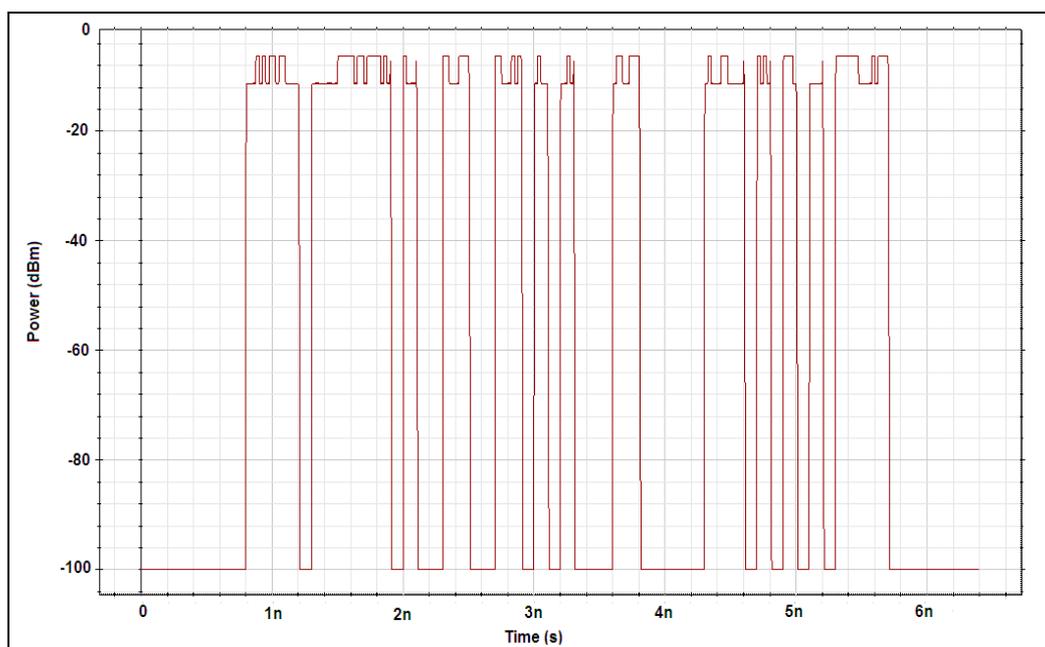
Figure IV.2 : L'architecture de l'OLT (a) et l'ONU (b) du système NRZ-ASK. Système à remodulation avec deux niveaux de taux d'extinction

La méthode utilisée pour la remodulation des données montantes est basée sur le principe de la remodulation avec deux niveaux de taux d'extinction (voir le paragraphe II.7.4.3), le signal descendant est modulé avec un ER de 5dB, tandis que le ER du signal montant est de 30 dB.

Les figures suivantes montrent les allures temporelles des signaux montant et descendant.



(a)



(b)

*Figure IV.3: Variation temporelle de la puissance optique;
(a) signal descendant, (b) signal montant.*

IV.3.1.1.1 Résultats des simulations

Après avoir optimisé les filtres électriques de réception de l'OLT, et de l'ONU, on varie la puissance du bruit additif (P_b) de -24dBm à -14dBm, afin d'étudier l'influence de la sensibilité du récepteur sur la qualité du système.

La figure IV.4 présente la variation du BER en fonction de l'OSNR de réception pour le système WDM PON ASK/ASK à un seul ONU. Il est clair que lorsque le niveau

du bruit augmente la qualité du système est médiocre, le signal d'information est submergé dans le bruit et donc la décision est difficile puisque le signal est modulé en amplitude et comme le bruit agit sur l'amplitude donc la détection des niveaux du signal devienne délicate, en plus l'allure des diagrammes de l'œil montre la différence de qualité lorsque la puissance de bruit augmente. La dégradation du système lorsqu'on simule les effets de dispersions de Rayleigh et de Brillouin est de l'ordre de 0.4 dB en downstream, tandis qu'on mesure une pénalité de 1.5 dB dans le upstream. Ceci semble logique puisque cet effet est plus agissant sur le signal montant.

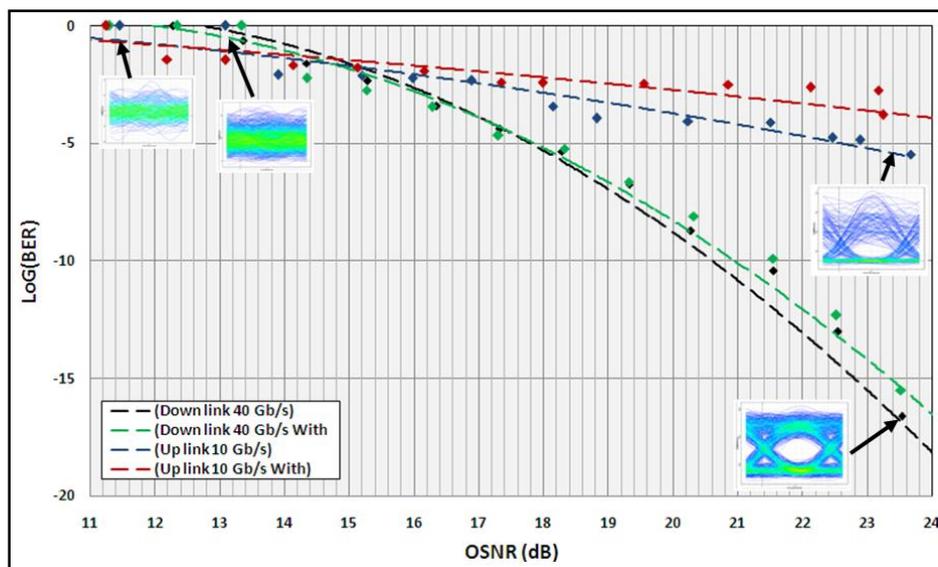


Figure IV.4: Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système NRZ-ASK/ASK avec deux niveaux taux d'extinction.

IV.3.1.2 Système avec filtrage au niveau de l'ONU

IV.3.1.2.1 Description de la technique

Afin d'améliorer la qualité du signal montant, on a procédé à une autre technique pour la remodulation du signal montant sur la porteuse descendante. La méthode consiste à utiliser un filtre optique passe-bande très sélectif en fréquence accordé sur la longueur d'onde de la porteuse afin d'éliminer la bande spectrale du signal d'information descendant. La figure suivante montre l'architecture de l'ONU après la modification du système.

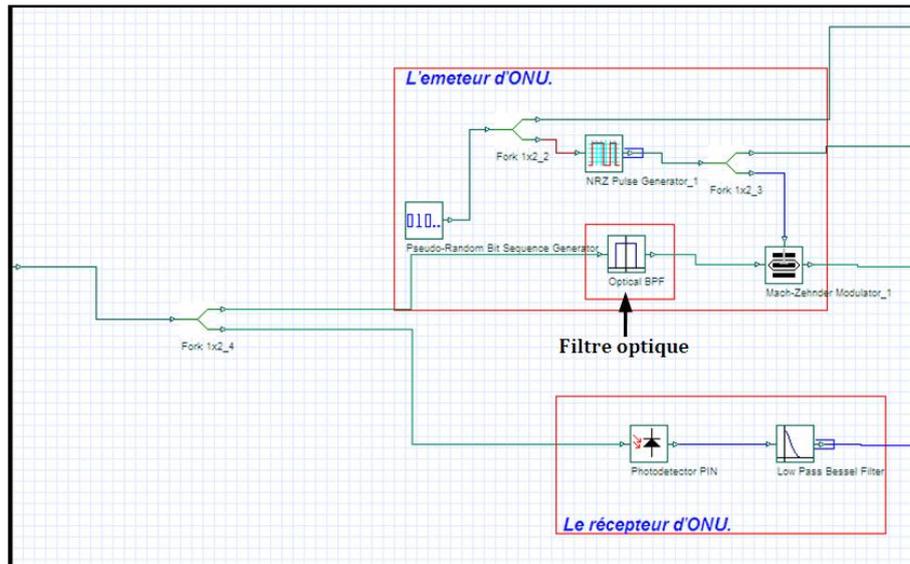
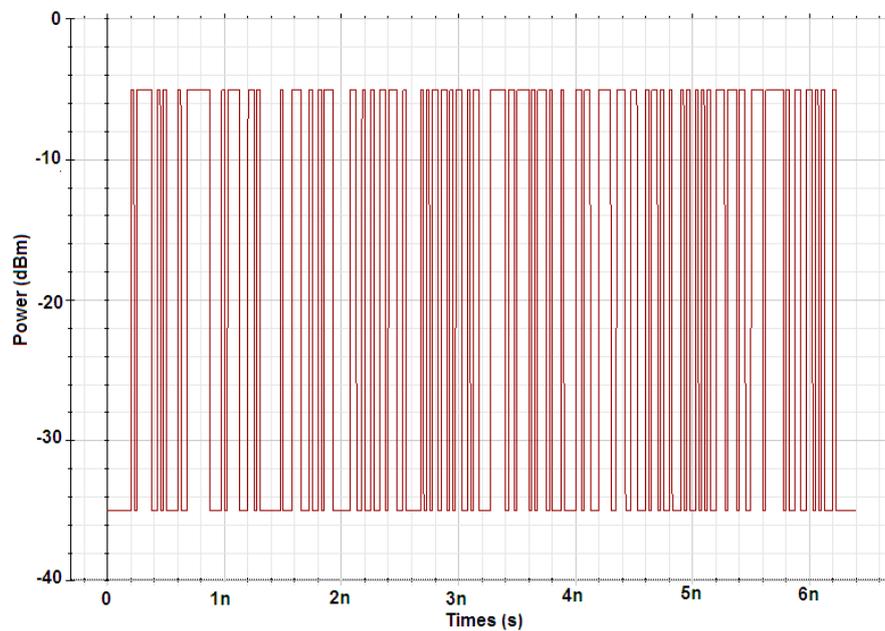


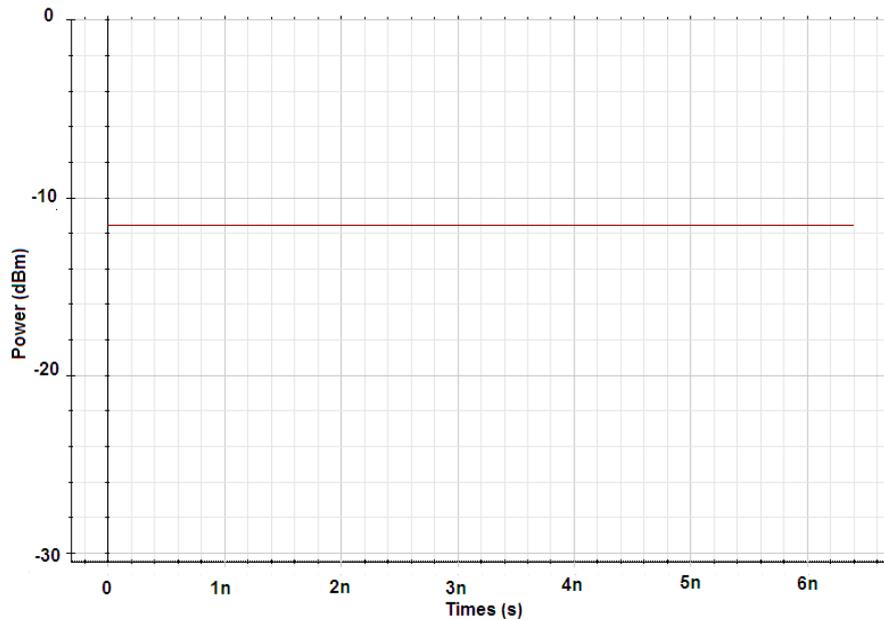
Figure IV.5 : Architecture de l'ONU utilise le principe de filtrage optique.

IV.3.1.2.2 Résultats des simulations

Le filtrage du signal descendant permet d'éliminer la variation en amplitude de la porteuse, ce qui va la rendre utilisable pour moduler en amplitude les données montantes. Les figures IV.6 montrent l'effet du filtrage sur la porteuse montante.



(a)



(b)

Figure IV.6 : Variation temporelle de la puissance optique de la porteuse descendante, (a) avant le filtrage, (b) après le filtrage.

On remarque que la puissance optique de signal est constante, donc absence totale de variations en amplitude due à la modulation des données descendantes, ceci permet de réduire les bruits engendrés par ces variations.

Les résultats présentés dans la figure IV.7 montrent que l'utilisation de filtre au niveau d'ONU permet d'améliorer nettement la qualité de transmission dans les deux directions. On mesure un gain en OSNR de 6.6 dB en downlink et plus de 16 dB en Uplink. La dégradation du système lorsqu'on simule les effets de dispersions de Rayleigh et de Brillouin est presque nulle dans le downstream, tandis qu'on mesure une pénalité de 0.5 dB dans le upstream.

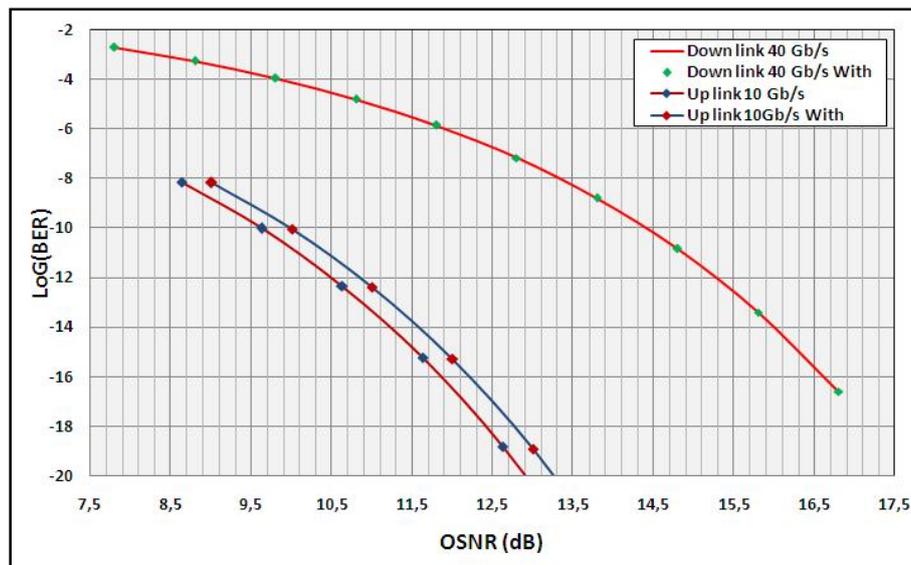


Figure IV.7: Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système NRZ-ASK/ASK avec filtrage dans l'ONU.

Les limites principales de cette méthode résident d'une part dans le budget optique qui reste limité par la puissance d'émission au niveau d'OLT et l'atténuation de la liaison, en plus par le fait de filtrer la porteuse va diminuer encore sa puissance, d'autre part, le fait d'utiliser un filtre passe-bande optique accordable sur la longueur d'onde du canal de transmission, oblige chaque ONU d'utiliser son propre filtre ce qui défavorise le concept d'ONU achromatique, à moins si on utilise des filtres accordables.

Vu le gain apporté par cette technique, on va l'adopter dans l'ensemble des travaux présentés ci-dessous.

IV.3.1.3 Système avec deux polarisations différentes

IV.3.1.3.1 Description de la technique

Les résultats présentés ci-dessus montrent que l'impact des effets de rétrodiffusion de Rayleigh et de Brillouin sont plus importants sur le signal montant. Afin de réduire ces effets, on a procédé à une technique qui permet d'utiliser deux polarisations différentes entre le signal montant et descendant. La méthode consiste à employer un convertisseur de polarisation juste après la modulation des données montantes, c.à.d utiliser la polarisation **Verticale** en uplink et la polarisation **Horizontale** en downlink. La figure IV.8 résume l'architecture de l'ONU basée sur cette nouvelle technique.

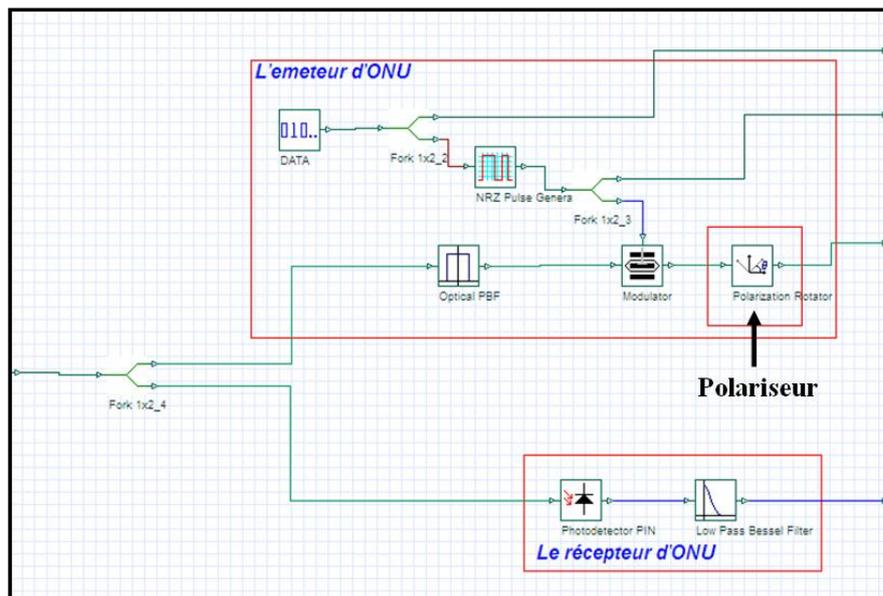
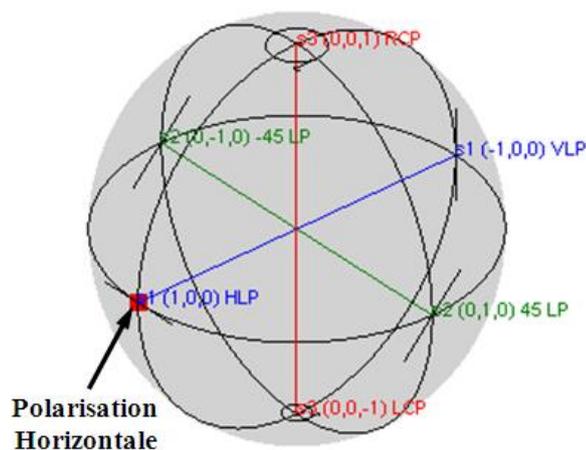


Figure IV.8 : Architecture de l'ONU utilise la conversion de polarisation.

IV.3.1.3.2 Résultats des simulations

La polarisation du signal est un paramètre important dans les ondes optiques, la sphère de Pointcarré est un outil permet de caractériser cette polarisation. La figure IV.9 montre l'état de polarisation de la porteuse optique dans les deux sens, on remarque clairement que le signal descendant utilise la polarisation linéaire Horizontale « **HLP** » (Figure IV.9a), l'utilisation du convertisseur de polarisation au niveau de l'ONU a permet de faire une rotation de cette dernière à 90° ce qui résulte une polarisation linéaire verticale du signal montant « **VLP** » (Figure IV.9b).



(a)

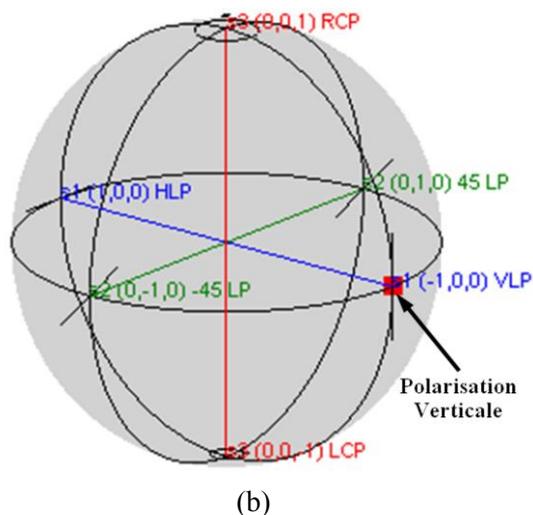


Figure IV.9: État de polarisation de la porteuse optique, (a) Signal descendant, (b) signal montant.

La figure IV.10 présente la variation du BER en fonction de l'OSNR de réception pour le système WDM PON ASK/ASK à deux polarisations [124,125]. Les résultats montrent que l'utilisation de différentes polarisations dans les deux sens apporte un gain en OSNR de 1.5 dB dans la direction montante par rapport au système qui n'utilise pas la conversion de polarisation.

Dans la suite de cette thèse, on va utiliser cette méthode dans l'ensemble des simulations vu l'amélioration apportée par cette dernière.

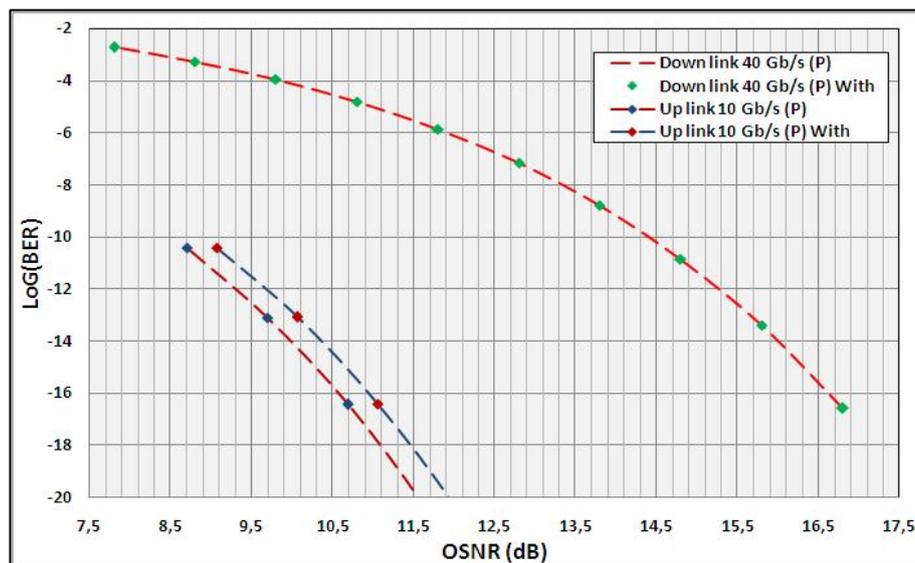


Figure IV.10: Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système NRZ-ASK/ASK avec inversion de polarisation.

La figure IV.11 présente la variation du BER en fonction de l'OSNR de réception en downlink pour le système WDM PON ASK/ASK à 4 ONUs [126,127]. On remarque que le système presque n'a pas subi de dégradations lorsqu'on a simulé les effets de dispersions de Rayleigh et de Brillouin pour l'ensemble des canaux, à l'exception du canal 3 où on a eu une pénalité de 1 dB par rapport au back to back pour un BER de 10^{-9} .

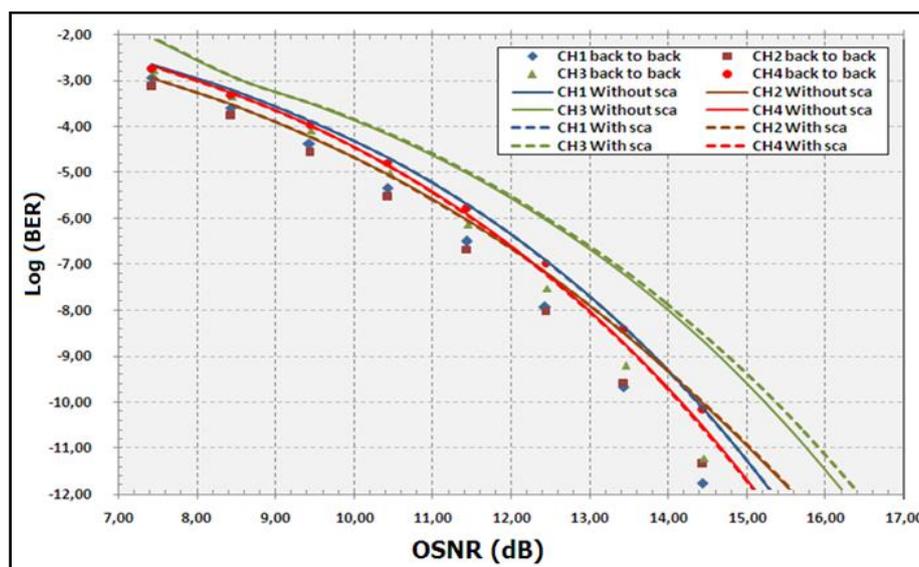
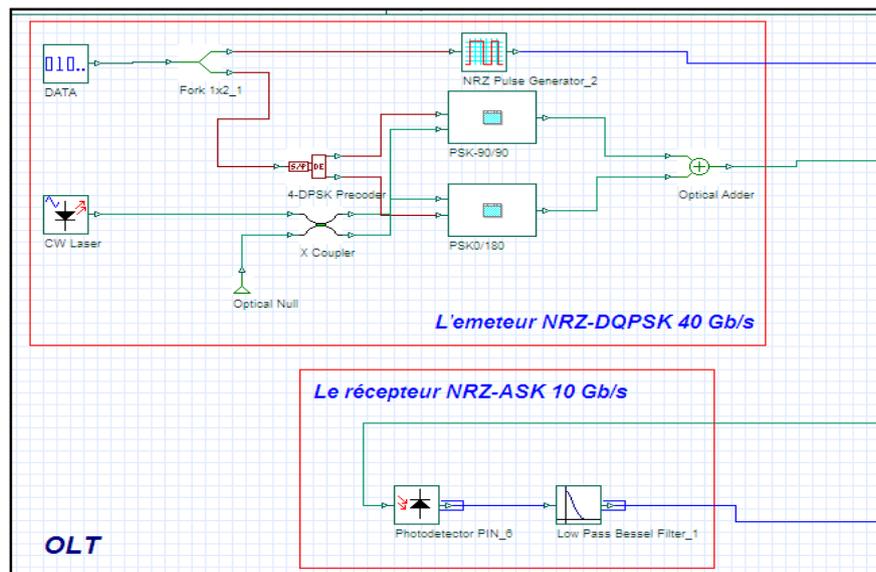


Figure IV.11: Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système NRZ-ASK/ASK à 4 ONUs.

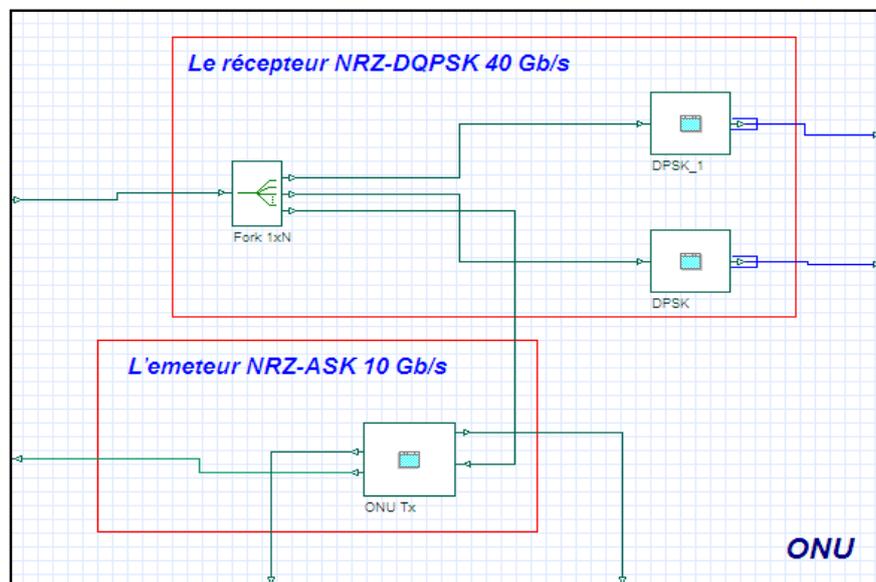
IV.3.2 WDM PON basé sur la modulation NRZ-DQPSK/ASK

IV.3.2.1 Architecture du réseau

L'émetteur NRZ-DQPSK 40Gb/s est présenté dans la figure IV.12a. Après le pré-codage différentiel, les données sont modulées optiquement à travers deux modulateurs Mach-Zehnder montés en parallèle. Chacun des deux modulateurs doit fonctionner en mode de polarisation nulle [128], où l'intensité optique de sortie du chaque MZM est minime, l'un des deux modulateurs est suivi par un modulateur de phase PM pour créer un déphasage de $\pi/2$ entre les deux faisceaux lumineux.



(a)



(b)

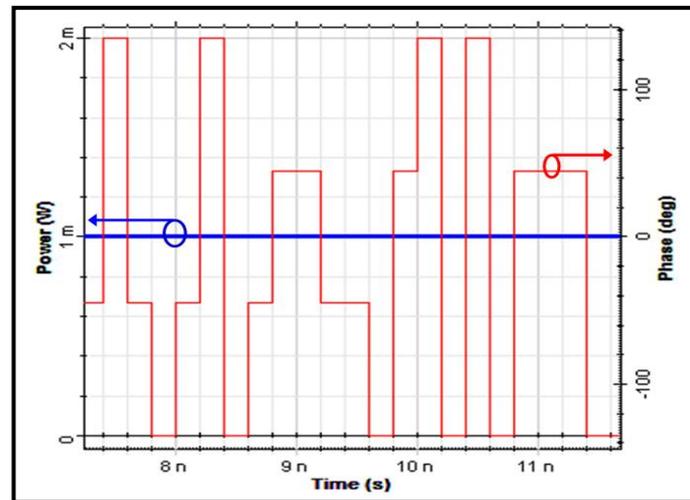
Figure IV.12 : Architecture de l'OLT (a) et l'ONU (b) du système NRZ-DQPSK.

Le signal downstream NRZ-DQPSK est démodulé par un détecteur différentiel en utilisant deux MZDI (Mach-Zehnder Dual-arm Interfero-meter) suivies par deux photodiodes chacun (Figure IV.12b). Chaque MZDI a un retard de 50 ps ($2T_b$) puisque le débit symbolique de la DQPSK est de 20GSym/s. L'émetteur d'ONU est identique au système précédent.

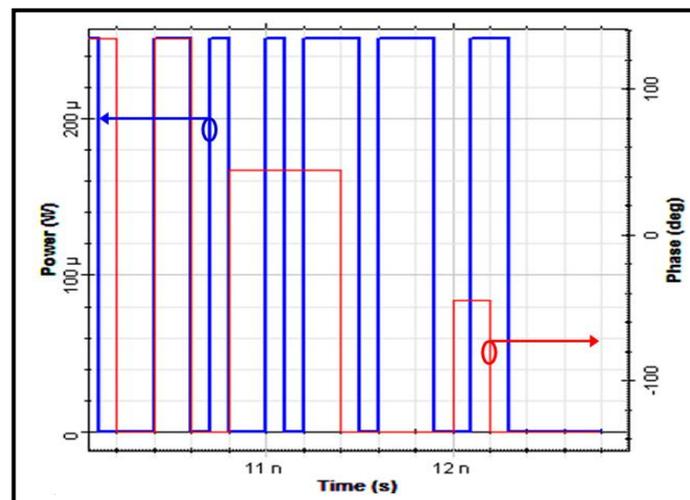
IV.3.2.2 Résultats des simulations

La figure IV.13a montre l'allure du signal optique modulé à la sortie de modulateur MZM de l'OLT. On remarque que l'amplitude est constante (bleu), mais sa phase a

quatre valeurs $[-3\pi/4, -\pi/4, \pi/4$ et $3\pi/4]$, ceci est dû à la modulation utilisée, qui est une modulation NRZ-DQPSK, où l'information est gravée sur la phase de la porteuse.



(a)



(b)

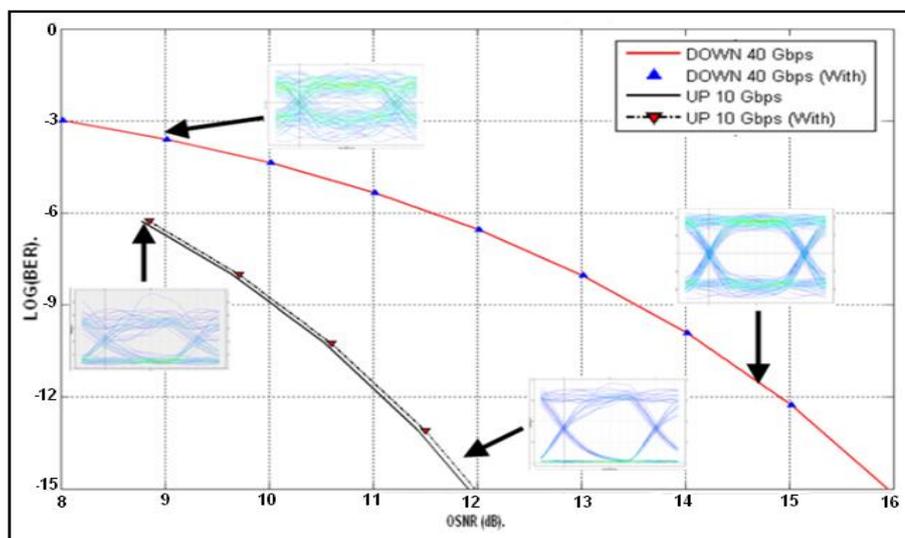
Figure IV.13 : Allure des signaux transmis par l'OLT (a) et l'ONU (b) dans le système DQPSK/ASK.

La figure IV.13b montre l'allure du signal optique à la sortie de modulateur MZM de l'ONU. On remarque que l'amplitude de signal optique est variable dans le temps (bleu), ceci est dû de la modulation en amplitude utilisée dans le uplink. Concernant la variation de la phase (rouge) n'a pas d'importance, car l'origine de cette variation est due de la porteuse descendante qui est utilisée pour la re-modulation NRZ-DQPSK/ASK.

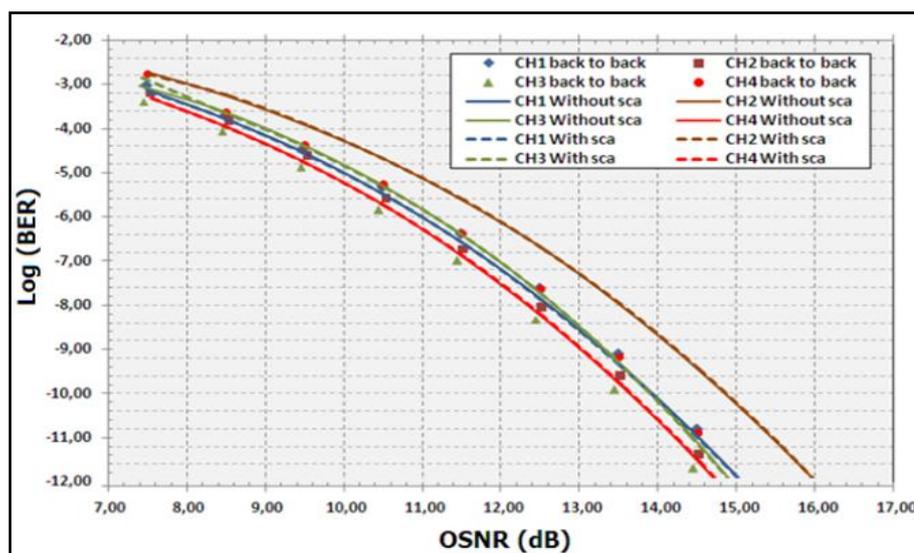
La variation de la qualité de liaison descendante et montante aux différentes valeurs d'OSNR pour un réseau WDM PON DQPSK/ASK à un seul ONU est présentée sur

la figure IV.14a [124,125]. L'influence des dispersions de Rayleigh et de Brillouin est transparente pour le système utilisant la modulation DQPSK/ASK, ceci est dû à la non-variation de la puissance optique du signal descendant qui influe sur le signal montant.

La figure IV.14b présente la variation du BER en fonction de l'OSNR du réception en downlink pour le système WDM PON DQPSK/ASK à 4 ONU's [127,129]. On remarque que pour un BER de 10^{-9} l'influence des dispersions de Rayleigh et de Brillouin est transparente pour l'ensemble des canaux, à l'exception du canal 2 où on mesure une pénalité de 1 dB par rapport au back to back.



(a)



(b)

Figure IV.14 : Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système DQPSK/ASK.

IV.3.3 WDM PON basé sur la modulation OOFDM/ASK

IV.3.3.1 Architecture du réseau

La figure IV.15 présente l'architecture du l'OLT simulé pour le système utilisant la modulation OOFDM. Les données sont générées par le générateur de séquences aléatoires PRBS, puis codées en symboles 4-QAM. Après le codage OFDM des symboles sur 128 sous-porteuses en utilisant la symétrie hermitienne, les données sont modulées optiquement à travers le modulateur MZM. On note que la méthode utilisée pour générer le signal OFDM optique est suivant l'architecture mentionnée dans la figure III.34.

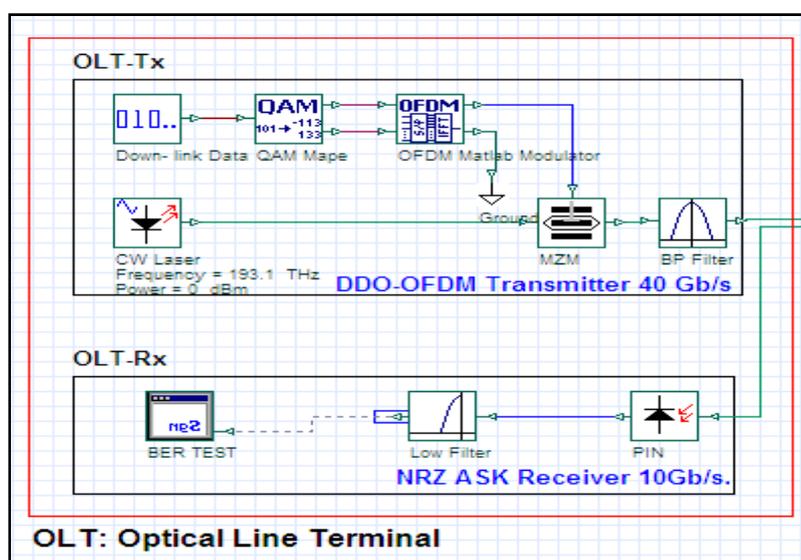


Figure IV.15: Architecture du l'OLT pour le système WDM PON OOFDM/ASK [130].

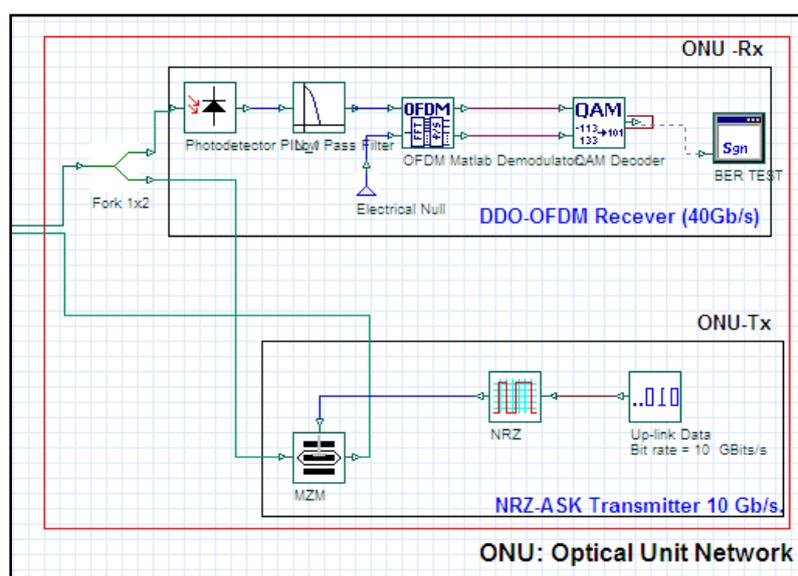


Figure IV.16: Architecture du l'ONU pour le système WDM PON OOFDM/ASK [130].

Le signal downstream OOFDM est démodulé directement par l'utilisation d'une photodiode PIN c'est le principe de DD (Direct Detection) (Figure IV.16). Après le filtrage du signal, on attaque le démodulateur OFDM, puis le décodeur QAM pour la récupération des données envoyées. Le lien montant est identique au système précédent.

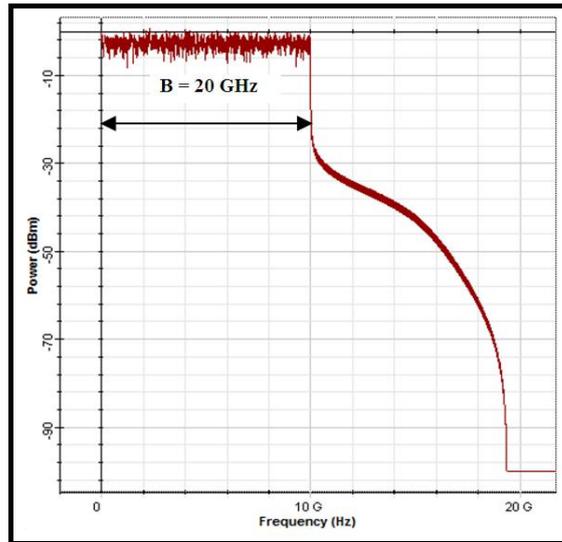
IV.3.3.2 Les paramètres de simulation

Les paramètres principaux des différents composants utilisés dans la liaison sont regroupés dans le tableau suivant :

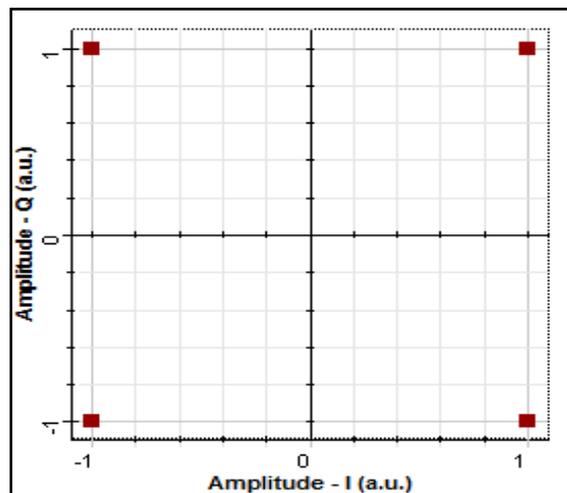
Composant	Valeur du paramètre	Signification
<i>La partie logique (PRBS)</i>	10/40 Gbps	Débit
<i>La source laser (CW laser)</i>	-14 à 0 dBm	Puissance d'émission
	1550 nm	Longueur d'onde
<i>Modulateur OFDM</i>	128	Nsp : Nombre de sous-porteuses
	256	IFFT
	4 QAM	Symboles
	1/8 du Temps de symbole	Intervalle de Garde
<i>La fibre bidirectionnelle (SMF)</i>	30 km	La longueur
	0,2 dB/km	l'atténuation
	16,75 ps/nm/km	DC
	0,33 /0,083 ps	La PMD
	4.6e-011	Dispersion de Bernoulli
	5e-005	Dispersion de Rayleigh
<i>La photodiode PIN</i>	0,7 A/W	Sensibilité
<i>La source de bruit additif</i>	[-24dBm, -14dBm]	Puissance de bruit

Tableau IV.1: Les paramètres de simulation de système OFDM/ASK.

La figure IV.17a montre la représentation spectrale du signal électrique à la sortie du modulateur OFDM, ainsi la constellation d'émissions (Figure IV.17b). On remarque que le spectre du signal est plat et sa largeur spectrale est de $B=20 \text{ GHz} = 1/T_s$, ou $T_s = 1/D_{\text{sym}}=1/M \cdot T_b$, avec D_{sym} est le débit symbolique, dans notre cas, on utilise la modulation 4-QAM (constellations à $2^M=4$ états) ; donc $M=2$.



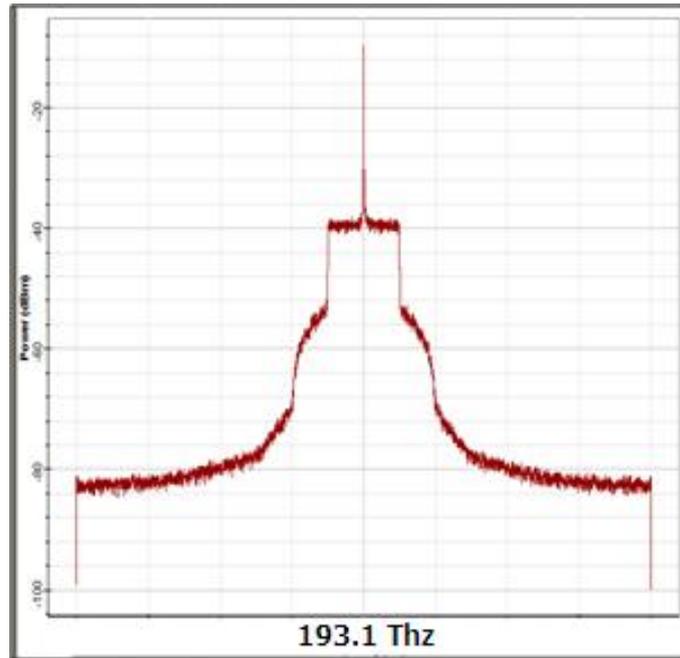
(a)



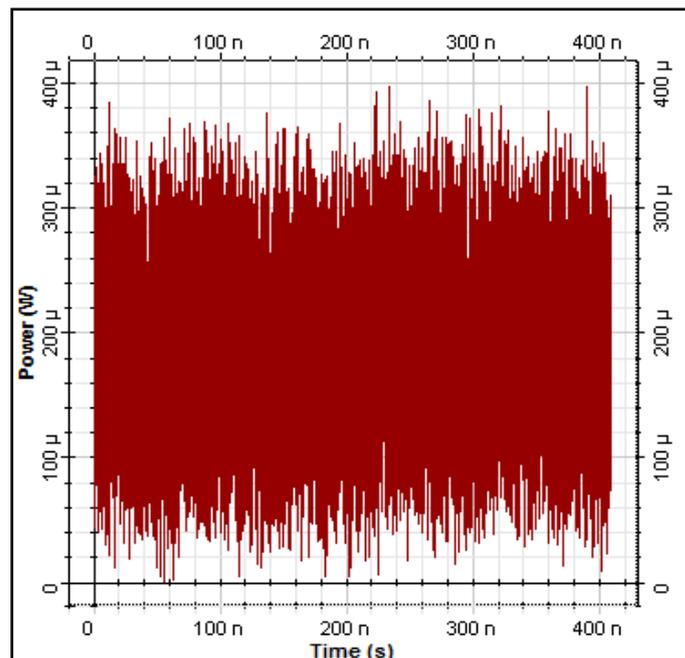
(b)

Figure IV.17: Signal électrique transmis par le modulateur OFDM (4-QAM), Spectre électrique (a), Constellation d'émissions (b).

La figure IV.18a montre l'allure spectrale du signal optique à la sortie de l'OLT pour le canal 1 ($f_1 = 193.1 \text{ THz}$) et sa variation temporelle (figure IV.18b). On remarque que l'amplitude de signal optique est variable dans le temps, ceci est dû de la modulation d'amplitude utilisée.



(a)



(b)

Figure IV.18: Allure des signaux transmis par l'OLT du CHI du système OFDM/ASK, Spectre optique (a), Variation temporelle (b).

IV.3.3.3 Résultats des simulations

IV.3.3.3.1 Système WDM-PON OFDM (4-QAM)

La courbe de variation du BER en fonction de l'OSNR de la réception pour le lien descendant d'un réseau WDM PON OFDM à un seul ONU [130] est montrée sur la figure IV.19. Il est clair qu'un niveau du bruit important engendre une diminution de

la qualité de transmission, le signal d'information est submergé dans le bruit et donc la décision est difficile puisque le signal est modulé en amplitude et comme le bruit agit sur l'amplitude donc la détection des niveaux du signal devienne délicate. On remarque que le système n'a pas subi de dégradations lorsqu'on a simulé les effets de dispersions de Rayleigh et de Brillouin par rapport au back to back, ce qui montre les performances de cette modulation aux effets néfastes de transmission.

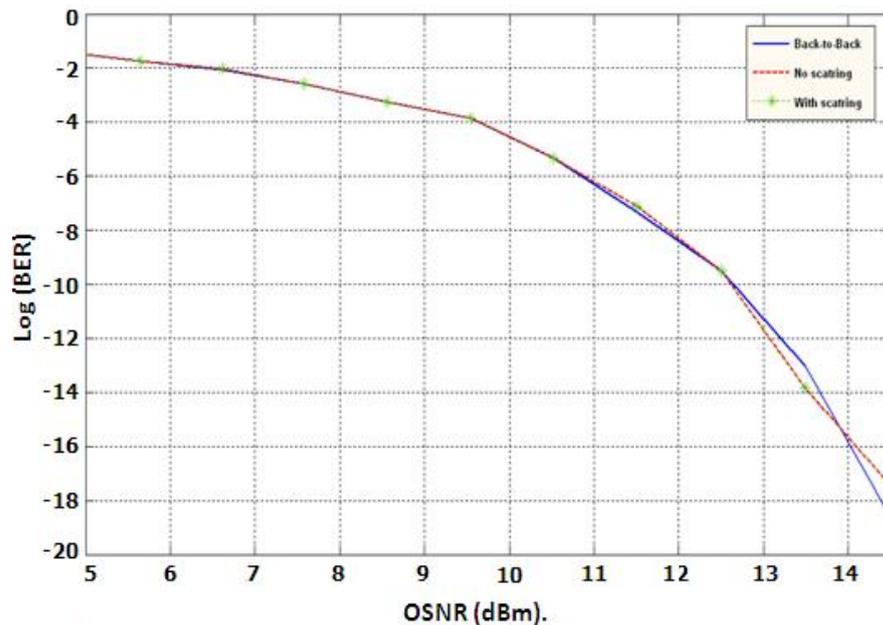


Figure IV.19: Variation de BER en fonction de l'OSNR pour système OOFDM.

Afin d'évaluer les performances de cette modulation, on la teste dans un système WDM-PON de 4 utilisateurs, la partie qui suit montre les résultats de l'étude faite dans le cas où on a modulé des symboles 4-QAM, puis pour une modulation OFDM à 16-QAM.

IV.3.3.3.2 Système WDM-PON OFDM (4-QAM) à 4 ONUs

La figure IV.20 présente la variation du BER en fonction de l'OSNR de réception en downlink pour le système WDM-PON OFDM (4-QAM) à 4 ONUs. On remarque que l'influence des dispersions de Rayleigh et de Brillouin a engendré une pénalité de 0.5 dB, est ceci pour l'ensemble des canaux en comparant au cas back to back.

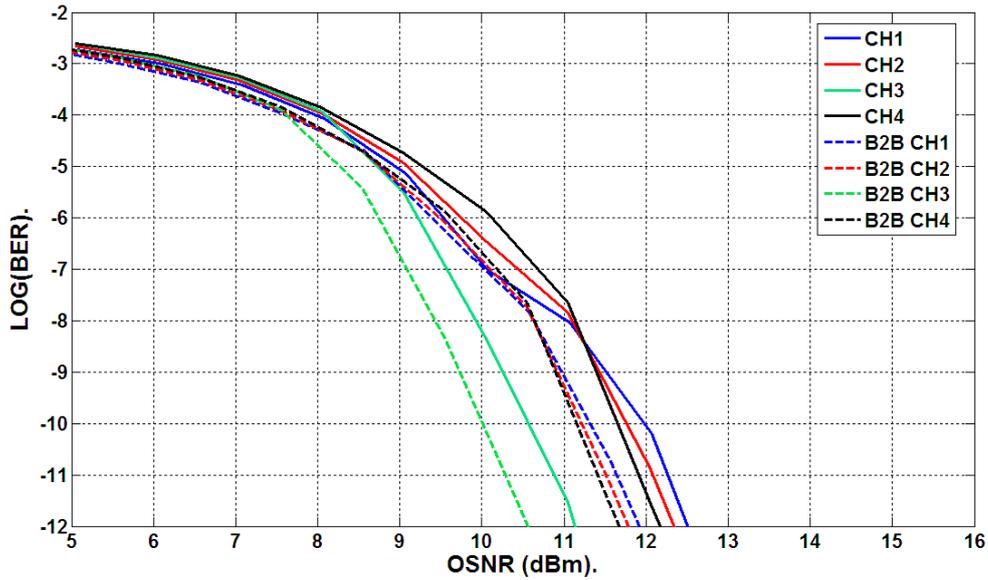


Figure IV.20: Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le WDM-PON OOFDM (4-QAM) à 4 ONUs.

IV.3.3.3 Système WDM-PON OFDM (16-QAM) à 4 ONUs

La variation du BER en fonction de l'OSNR de réception pour le lien descendant du système WDM-PON OFDM (16-QAM) est présentée dans la figure IV.21. Les résultats montrent que l'influence des dispersions de Rayleigh et de Brillouin à également engendré une pénalité de 0.5 dB, est ceci pour l'ensemble des canaux en comparant au cas back to back.

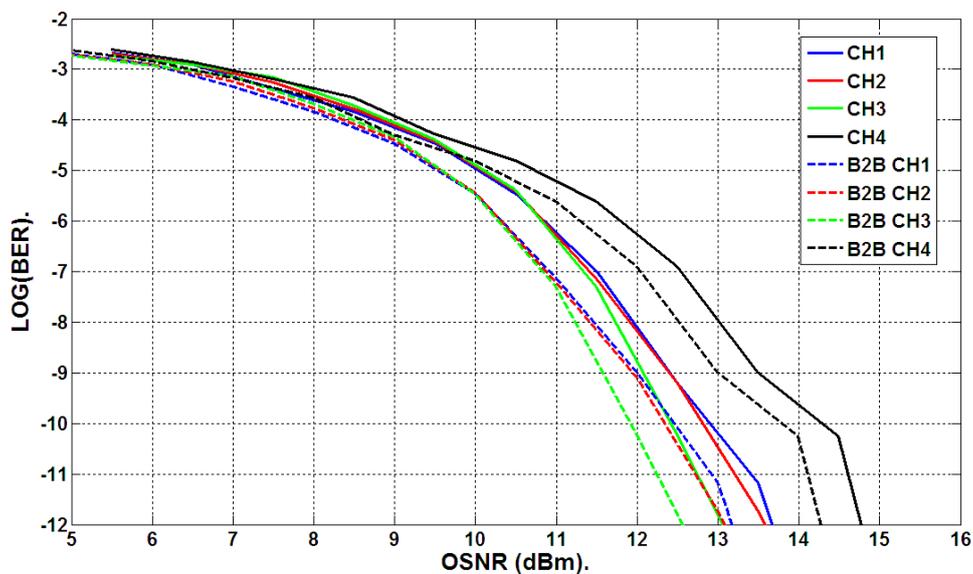


Figure IV.21: Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le WDM-PON OOFDM (16-QAM) à 4 ONUs.

En comparant les deux figures, on constate que le système OFDM(4-QAM) est plus performant que le deuxième système en qualité d'OSNR requis pour le même BER, ou on a eu un gain moyen sur tous les canaux de 1.4 dB.

Par exemple pour un BER de 10^{-9} , l'OSNR requis pour le canal 3 est de l'ordre de 10.3 dB pour la modulation OFDM (4-QAM), tandis que pour la modulation OFDM (16-QAM), le canal 3 nécessite un OSNR de l'ordre de 12.1 dB pour le même BER.

Ces résultats semblent logiques, puisque la deuxième modulation utilise la constellation 16-QAM, la probabilité d'erreur est de 15/16, et le bruit agit plus durement contre cette dernière puisque la distance entre les symboles est petite. Contrairement à la première modulation qui utilise la constellation 4-QAM, la distance entre les symboles est plus grande donc l'effet du bruit est tolérable, ainsi la probabilité d'erreur est plus petite, égale à 3/4.

IV.4 Comparaison et discussion des résultats

IV.4.1 Comparaison des résultats des différentes simulations :

Le tableau suivant fait une comparaison entre les différents systèmes simulés en montrant les valeurs d'OSNR requis pour un BER de 10^{-9} .

Numéro de canal	OSNR exigé à la réception (dB)			
	Système simulé			
	ASK/ASK	DQPSK/ASK	OOFDM 4QAM/ASK	OOFDM 16QAM/ASK
ONU1	14.3	14	11.5	12.5
ONU2	14.4	14.8	11.4	12.5
ONU3	15.4	14	10.3	12
ONU4	14.2	13.8	11.4	13.5
Moyenne	14.75	14.15	11.15	12.62

Tableau IV.2: Résumé des résultats trouvés.

En examinant ces résultats, on remarque que l'utilisation de la modulation OFDM (4-QAM) dans le downstream présente le meilleur résultat puisque la qualité de système est améliorée pour l'ensemble des canaux où on a gagné 3.6 dB sur le système NRZ-ASK/ASK et 3 dB sur le système NRZ-DQPSK/ASK, ceci est dû premièrement à la largeur spectrale exigée par cette modulation qui est 2 fois plus petite que celle

exigée par une modulation NRZ classique (ex : pour un débit binaire de 40 G/s, la modulation NRZ exige une largeur spectrale de 40GHz, pour la modulation OFDM (4-QAM) on exige que 20 GHz) ceci représente une efficacité spectrale de 2bit/Hz.

Le deuxième point réside dans le principe de fonctionnement de cette technique, qui permet facilement l'estimation du canal de transmission, ce qui facilite la récupération des symboles transmis, par conséquent, une minimisation des erreurs de transmission.

IV.4.2 Comparaison aux autres travaux

Des progrès dans le domaine des réseaux optiques passifs ont été faits pendant ces dix dernières années. Comme le montre le tableau IV.3, les chercheurs ont fortement contribué à la conception de réseaux optiques passifs.

Références	PON technique	Nombre d'ONUs	Débit descendant	Débit montant	Distance en km	Espacement en GHz
S-J. Park et al. [131] Avril 2006	WDM PON system using RSOA	-	1.25 Gbps	1.25 Gbps	20	-
J. H. Lee et al. [132] Juin 2009	WDM PON system using RSOA	3	622 Mbps	622 Mbps	60	100
C-H. Yeh et al. [133] Juin 2010	TDM PON	2	2.5 Gbps	2.5 Gbps	20	-
K. Lee et al. [134] Mars 2012	WDM PON using SOA	16	1.25 Gbps	1.25 Gbps	25	100
K-O. Kim et al. [135] Juillet 2012	TDM/ WDM PON using RSOA	32	2.5 Gbps	2.5 Gbps	50	100
J. Kim et al. [136] Juin 2013	TDM/ WDM PON	8	10 Gbps	2.5 Gbps	60	200
A.M. Khan et al. [137] Juin 2013	WDM/ TDM based on DQPSK with IRZ	10	10 Gbps	2.5 Gbps	20	50
L. Li et al. [138] Mars 2014	OFDM PON	8	40 Gbps	2.5 Gbps	20	100
F. Hou et al. [139] Août 2014	OCDM/WDM PON system using DQPSK	4	5 Gbps	Unidirectionnel	20	50
P. Parolari et al. [140] Août 2014	WDM PON system using RSOA	-	10 Gbps	5 Gbps	52	100
K.P. Kaur et al. [141] Septembre 2014	WDM PON for different types of filters	4	10 Gbps	Unidirectionnel	20	100
A.M. Husein et al. [142] Septembre 2014	WDM PON using AWG	32	3 Gbps	Unidirectionnel	40	50
G. Pandey et al. [143] Septembre 2014	WDM PON using SCM technique with RSOA	16	10 Gbps	10 Gbps	20	80

J. Prat et al. [144] Octobre 2014	TDM/ WDM PON using RSOA	32	10 Gbps	1 Gbps	100	50
A.Chenika et al. [126] Octobre 2014	WDM PON using NRZ-DQPSK	4	40 Gbps	10 Gbps	30	100
A.Chenika et al. [130] Décembre 2015	WDM PON using NRZ-OFDM	-	40 Gbps	10 Gbps	30	-

Tableau IV.3: Les progrès des réseaux PON dans la littérature.

Selon l'enquête de la littérature donnée dans le tableau IV.3, le plus gros travail a été effectué sur les réseaux d'accès PON de type WDM, TDM individuellement ou sur des combinaisons de ces deux techniques. Les chercheurs ont proposé divers PON en utilisant des débits en aval et en amont symétriques ou asymétriques variant de 1,25 Gbps à 40 Gbps sur des portées variables peuvent atteindre jusqu'à 100 km de longueur.

Plusieurs architectures ont été proposées offrant la connectivité de plusieurs ONUs jusqu'aux 32 utilisateurs au même OLT. L'espacement entre les canaux est de 80 GHz à 200 GHz est atteint pour la conception de PONs.

Vu les résultats trouvés dans notre étude où nous avons démontré la possibilité de connecter 4 ONUs au même OLT en envoyant 40 Gbps dans le downlink et 10 Gbps en uplink à travers une fibre de 30 km de longueur. En faisant une comparaison avec les travaux listés dans le tableau ci-dessus, notre architecture présente un challenge important et présente de bons résultats qui peut concurrencer les autres architectures présentées dans la littérature, et peut être adoptée dans les réseaux WDM PON de nouvelle génération.

IV.5 Conclusion

Dans ce travail nous avons procédé à une comparaison entre trois systèmes WDM-PON bidirectionnels utilisent les différents formats de modulations (NRZ-ASK/ASK, NRZ-DQPSK/ASK et OOFDM/ASK) sur une distance de 30 km pour un débit binaire descendant 40 Gbps. Le réseau étudié adopte le concept d'ONU achromatique où nous avons utilisé la même porteuse dans les deux sens de transmission, ceci permet de minimiser le cout d'ONU en évitant l'utilisation d'un nouveau laser.

Le système a été analysé en présence des effets de rétrodiffusion de Rayleigh et de Brillouin. Plusieurs techniques ont été utilisées afin d'optimiser la qualité du système. Les résultats montrent par exemple que l'utilisation de deux polarisations différentes

entre le sens montant et descendant permet de minimiser les effets de rétrodiffusion de Rayleigh et de Brillouin.

Enfin, l'utilisation de la modulation OFDM en downlink donne de bons résultats ce qui permet de présenter cette modulation comme un fort candidat pour les réseaux optiques d'accès de nouvelle génération.

Conclusion et perspectives

Les technologies du réseau d'accès optique évoluent sans cesse vers des générations de plus en plus performantes, avec une capacité de plus en plus élevée. Dans cette évolution, l'accès optique multiplexé en longueurs d'onde est l'un des candidats technologiques les plus représentatifs dans la course vers le très haut débit.

Cette thèse a consisté à étudier, concevoir et valider des architectures de réseau d'accès de nouvelle génération NG-PON à plusieurs dizaines de Gbit/s qui utilisent le multiplexage en longueurs d'onde.

Le WDM est une technologie issue du réseau de transport où les débits atteignent plusieurs centaines de Gbit/s. L'intérêt de son introduction dans le réseau d'accès réside dans la possibilité de mutualiser de façon plus importante des utilisateurs sur une architecture en utilisant simultanément le multiplexage temporel et en longueurs d'onde.

L'analyse approfondie des architectures de WDM PON proposées dans la littérature actuelle nous a permis de dégager les avantages et inconvénients de chacune d'entre elles et de converger vers le choix d'architecture.

Le défi majeur en rapport avec la nouvelle génération WDM PON est la réduction du prix de déploiement à travers le futur réseau et l'hypothèse technologique.

La condition pour l'introduction du WDM dans le réseau d'accès est la disponibilité d'émetteurs «achromatiques», c'est-à-dire indépendants de la longueur d'onde qui vont constituer des ONUs simples et bas coûts. Plusieurs techniques sur les émetteurs «achromatiques» sont envisageables aujourd'hui et elles utilisent divers composants. Mais celle qui a été choisie pour cette thèse s'appuie sur la re-modulation déportée.

La technique utilisée dans cette thèse permet de réduire le nombre de longueurs d'onde dans l'architecture en réutilisant la même longueur d'onde pour le sens montant et le sens descendant (réduction de nombres de sources optiques surtout dans l'ONUs), en re-modulant les données montantes sur la porteuse descendante en utilisant un format de modulation orthogonale au format utilisé en downlink pour

empêcher les interférences entre les données montantes et celles descendantes, puisque la transmission se fait sur une seule fibre bidirectionnelle.

Le fait d'utiliser la même longueur d'onde en downlink et en uplink sur une seule fibre bidirectionnelle a mis en valeur les fortes contraintes imposées par la rétrodiffusion Rayleigh. Ceci nous a poussés à tester de nouvelles combinaisons de formats de modulation afin de trouver la meilleure solution qui permet de faire face aux différentes contraintes posées par un réseau WDM PON bidirectionnel.

En effet, dans le cadre de notre travail, nous avons montré que l'utilisation de deux polarisations différentes entre le sens montant et descendant a amélioré la qualité de transmission du système.

De même, nous avons exploité plusieurs formats de modulation ASK/ASK, DQPSK/ASK et OOFDM/ASK et les utilisés dans un système optique WDM-PON en faisant une comparaison entre les trois systèmes. Cette étude montre que l'utilisation de la modulation OOFDM dans la liaison descendante du réseau d'accès optique améliore la qualité du système en termes de budget optique, tout en restant dans les normes fixées par l'organisme des télécoms.

En plus, l'architecture proposée au niveau de l'ONU basée sur la re-modulation de la porteuse descendante par les données montantes permet de diminuer le coût global du système.

L'amélioration apportée par l'application de la OOFDM au niveau de l'OLT, ainsi la simplicité de la mise en œuvre et vu le gain apporté par l'utilisation de la re-modulation au niveau de l'ONU, qualifie cette architecture et la présente comme un fort candidat pour les réseaux optiques d'accès de nouvelle génération.

En fin, comme perspectives, la modulation OOFDM peut être intégrée dans un réseau d'accès hybride WDM/TDM PON par le fait qu'on peut facilement connecter un nombre important d'utilisateurs dans à un seul ONU, et ceci, par le multiplexage multi-porteuses offert par la modulation OFDM.

En plus, l'utilisation de multiplexage NYQUIST WDM à la place du multiplexage classique WDM permet d'augmenter le nombre d'ONUs connectés à un seul OLT en réduisant l'espacement entre les canaux optiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S.-J.Park, C.-H.Lee, K.-T.Jeong, H.-J.Park, J.-G.Ahn, et K.-H.Song, “Fiber-to-the-Home Services Based on Wavelength-Division-Multiplexing Passive Optical Network”, *J.Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 11, p. 2582-2591, 2004.
- [2] I.Fsaifes, C.Lepers, R.Gabet, M.Douay et P.Gallion, “ Performance analysis of Quadratic Congruence Codes using Superstructured Fiber Bragg Gratings for Flexible Data Rate Coherent DS-OCDM System”, *J.Opt. Netw.*, vol.7, no.7, p.692-703, 2008.
- [3] G.-K.Chang, A.Chowdhury, Z.Jia, H.-C.Chien, M.-F.Huang, J.Yu, et G.Ellinas, “Key Technologies of WDM-PON for Future Converged Optical Broadband Access Networks”, *J.Opt. Commun. Netw.*, vol.1, no.4, p. C35-C50 2009.
- [4] An Vu Tran, Chang-Joon Chae; Tucker R.S, “Ethernet PON or WDM PON: A Comparison of Cost and Reliability”, *TENCON 2005*.
- [5] X.Liu, Y.Shao, C.Hou, X.Zheng, X.Li, S.Zou et N.Chi, “A novel WDM-PON structure using the orthogonal FSK /ASK remodulation scheme”, *Proc. Of SPIE-OSA-IEEE, Asia Communications and Photonics*, SPIE Vol. 7633, 2009.
- [6] Y.Wu, T.Ye et L.Zhang, “Generation of a 16-star/square Quadrature Amplitude Modulation (QAM) Signal in Radio over Fiber System”, *Proc. Of SPIE-OSA-IEEE, Asia Communications and Photonics*, SPIE Vol. 7632, 2009.
- [7] <http://www.infovista.com/solutions/broadband-and-triple-play>
- [8] Saliou. F « Etudes des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée », *Telecom Paris Tech*, thèse de doctorat, Juin 2010.
- [9] <http://tavier.free.fr/serveur/infor/reseau/sansfils/sansfils.htm>
- [10] http://www.ybet.be/hardware2_ch6/Liaisons_haut_debit.htm
- [11] https://syaifulrohman.files.wordpress.com/2010/12/pon_example.gif
- [12] Gauthy. G «Développement des réseaux à très haut débit : Guide de mise en place de réseaux fibres optiques FTTH», *Le cercle C.R.E.D.O* , Juin 2007.
- [13] « Livre blanc : Les réseaux PON », 06-4551-4, Décembre 2006.
- [14] <http://www.youtube.com/watch?v=CiLggH4kia0>
- [15] Payoux. F, «Etude des réseaux d'accès optique exploitant le multiplexage en longueurs d'onde», *Ecole nationale supérieure des télécommunications de Bretagne*, thèse de doctorat, Août 2006.
- [16] Marek Hajduczenia, & all, « Development of 10 Gb/s EPON in IEEE 802.3av », *IEEE communications magazine*, Vol. 46, No. 7; pp 40-47, pp 90-95, July 2008.
- [17] IUT standard, ITU-T, G.983.1 amendement 1, *Systèmes d'accès optique à large bande basés sur PON* Novembre 2001.
- [18] IUT standard, ITU-T, G.984.2, *Spécification de la couche dépendante du support physique*, March 2003.
- [19] D. Parsons, « GPON — Reversing the Power Bandwidth Trend: In Other Words, Saving the Environment », *IEEE GLOBECOM '07*, Washington, DC, Nov. 28–30, 2007.
- [20] Lynn Hutcheson, Ovum, «FTTx: Current Status and the Future», *IEEE communications magazine*, Vol. 46, No. 7; July 2008.

- [21] X. Wang et al., "Demonstration of Over 128-Gb/s Capacity (12-User *10.71 Gb/s/User) Asynchronous OCDMA Using FEC and AWG-Based Multiport Optical Encoder/Decoders," IEEE Photonics Tech. Lett. , Aug. 2006.
- [22] GUIGNARD Ph, J. MOTTIER, " OPTICAL CDMA: Etat de l'art, perspectives", Note Technique France Télécom Division R&D, NT/FTR&D/7995, 2003.
- [23] <http://cfile8.uf.tistory.com/image/1768A6444FEB93AB2C0449>.
- [24] Raharimanitra. R « Contribution à l'étude des architectures basées sur le multiplexage en temps et en longueur d'onde dans le réseau d'accès, permettant la migration vers la nouvelle génération de PON (NG-PON) à 10 Gbit/s», Télécom Bretagne, Ph. D, Janvier 2012.
- [25] ITU-T Recommendation G.694.2, spectral grids for WDM applications : CWDM wavelength grid.
- [26] ITU-T Recommendation G.694.1, spectral grids for WDM applications : DWDM wavelength grid.
- [27] NGUYEN. QT «Émetteurs achromatiques pour le réseau d'accès optique haut débit multiplexé en longueurs d'onde », Ph. D, Université Rennes, Janvier 2011.
- [28] BRUCE, Elizabeth (février 2002) Tunable Lasers, IEEE Spectrum, vol. 39, no. 2, pp. 35-39.
- [29] ERDOGAN Turan,(Août 1997) Fiber Grating Spectra, IEEE , Journal of Lightwave Technology, vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294.
- [30] SATO K., et al Simultaneous Opération of Ten-Channel Tunable DFB Laser Arrays Using Strained-InGaAsP Multiple Quantum Wells, IEEE J. Quantum Electron., Vol 29, No. 6, juin 1993, pp. 1805-1809.
- [31] http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=26332&page_number=8.
- [32] WANG L. A., et al. (avril 1992) Integrated Four-Wavelength DFB Laser Array with 10 Gb/s Speed and 5 nm Continuous Tuning Range, IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 4, No. 4, pp. 318-320.
- [33] HONG J., et al. "Compact Asymmetric Strongly Gain-Coupled DFB Laser Array with Integrated BFM Array for Simultaneous 4-X 2.5 Gb/s 100 km WDM Transmission", IEEE J. Lightwave Tech., Vol. 17, No. 8, pp. 1436-1442, Août 1999.
- [34] ZAH C , et al. (avril 1997) Multiwavelength DFB Laser Arrays with Integrated Combiner and Optical Amplifier for WDM Optical Networks, IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron, Vol. 3, No. 2, pp. 584-597.
- [35] HONG J., et al. (octobre 1999) Cascade Strongly Gain-Coupled (SGC) DFB Lasers with 15-nm Continuous-Wavelength Tuning, IEEE Photon. Tech. Lett, Vol. 11, No. 10, pp. 1214-1216.
- [36] H. Suzuki et al., "Wavelength-Tunable DWDM-SFP Transceiver with a Signal Monitoring Interface and Its Application to Coexistence-Type Colorless WDM-PON", in 33th European Conference on Optical Communication, ECOC '07, 2007.
- [37] Hatakemaya et al., IEEE PTL, vol 15, N°7, pp. 903-905, 2003.
- [38] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, Long-wavelength semiconductor lasers. Van Nostrand Reinhold Company, 1986.
- [39] KÔRBL J. et al. (2001), A novel tunable DFB/DBR laser with lateral grating for WDM. Proc. 27 th Eur. Conf. On Opt. Comm. ECOC'01.

- [40] G. Sarlet et al., "Control of widely tunable SSG-DBR lasers for dense wavelength division multiplexing, *Journal of Lightwave Technology*", vol. 18, no. 8, pp. 1128-1138, Aug. 2000.
- [41] S. H. Oh et al ; et al., « 2.5Gbps WDM Tunable light Source Hybrid Integrated with Superluminescent Diode and Polymeric Waveguide Bragg Reflectir », ECOC 2009, P2.11, vienne, Autriche, 20-24 septembre 2009.
- [42] Favre F. et al., « 82 nm of continuous tunability for an external cavity semi-conductor laser », *Electron, Lett.* 27, 2, pp. 183–184. 1991.
- [43] S.-R. Mun et al., "A self wavelength tracking method for a cost effective WDM-PON with tunable lasers", in *Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC 2010*, 2010, pp. 1-3.
- [44] S. Kaneko et al., "Scalability of spectrum-sliced DWDM transmission and its expansion using forward error correction", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 1295-1301, 2006.
- [45] R. Raharimanitra et al., "Spectrum sliced sources AMOOFDM modulated for WDM-TDM-PON", in *35th European Conference on Optical Communication, ECOC '09*, 2009, pp. 1-2.
- [46] Exalos AG, Kamelian, "Denselight Semiconductor", Covega, Accelink.
- [47] www.denselight.com.
- [48] Tomoyuki Akiyama et al, "An ultrawide-band (120 nm) semiconductor optical amplifier having an extremely-high penalty-free output power of 23 dBm realized with quantum-dot active layers", *OFC04*, 2004.
- [49] P. Chanclou et al., "Demonstration of SOA-based remote modulation at 2.5 and 5 Gbit/s for WDM PON," in the proc. of *OFC 2007*, San Diego, USA, March 2007, paper OWD1.
- [50] M. Omella, V. Polo, J. Lazaro, B. Schrenk and J. Prat, "10Gbit/s RSOA Transmission by Direct Duobinary Modulation," in proc. of *ECOC 2008*, 21 -25 Sep. 2008, Brussels, Belgium, paper Tu.3.E.4.
- [51] WONG F., Tunable Laser, QDI, <http://www.qdi-usa.com/documents/whitepaper.pdf>
- [52] H.-K. Lee, H.-J. Lee, and C.-H. Lee, "A Simple and Color-Free WDM-Passive Optical Network Using Spectrum-Sliced Fabry-Perot Laser Diodes", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 3, pp. 220-222, 2008.
- [53] R. Lang, "Injection locking properties of a semiconductor laser", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, no. 6, pp. 976-983, Jun 1982.
- [54] S.-J. Park et al., "Fiber-to the home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical network", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 11, pp. 2582-2591, nov. 2004.
- [55] J. H. Lee, et al., "Single, Depolarized, CW Supercontinuum-Based Wavelength-Division-Multiplexed Passive Optical Network Architecture With C-Band OLT, L-Band ONU, and U-Band Monitoring", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 10, pp. 2891-2897, Oct. 2007.
- [56] H. D. Kim, et al., "A low-cost WDM source with an ASE injected Fabry-Perot semiconductor laser", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, no. 8, pp. 1067-1069, Aug 2000.
- [57] S.-G. Mun et al., "A WDM-PON with a 40 Gb/s (32 x 1.25 Gb/s) capacity based on wavelength-locked Fabry-Perot laser diodes", *Opt. Express*, vol. 16, no. 15, pp. 11 361_11 368, Jul 2008.

- [58] S.-M. Lee et al., "Demonstration of a Long-Reach DWDM-PON for Consolidation of Metro and Access Networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 271-276, 2007.
- [59] "SpeedLIGHT 16" & "TurboLIGHT 16" Products Datasheets, "DWDM-PON FTTX Transport Platform, Novera Optics, www.noveraoptics.com.
- [60] H.-K. Lee, et al., "A WDM-PON with an 80 Gb/s capacity based on wavelength-locked Fabry-Perot laser diode", *Opt. Express*, vol. 18, no. 17, pp. 18 077-18 085, Aug 2010.
- [61] X. Zhaowen, "10 Gb/s WDM-PON Upstream Transmission Using Injection-locked Fabry-Perot Laser Diodes", *OFC'06*, 2006.
- [62] D. W. Smith, "Reducing the Optical Component Cost for Future Fibre Access in Symposium Next generation optical access technologies", *35th European Conference on Optical Communication, ECOC '09*, 2009.
- [63] A. Borghesani, "Reflective based active semiconductor components for next generation optical access networks", in *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, ECOC '10*, pp. 1-6, 2010
- [64] G. de Valicourt, et al., "High Gain (30 dB) and High Saturation Power (11 dBm) RSOA Devices as Colorless ONU Sources in Long-Reach Hybrid WDM/TDM-PON Architecture", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 3, pp. 191-193, Feb.1, 2010.
- [65] H.-H.Lee, et al., "First commercial service of a colorless Gigabit WDM/TDM hybrid PON system", *Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC 2009*, pp. 1-3, 2009.
- [66] A. Borghesani, et al., "High temperature, colourless operation of a reflective semiconductor optical amplifier for 2.5 Gbit/s upstream transmission in a WDM-PON", in *33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication, ECOC 2007*, Berlin Germany, Sept. 2007.
- [67] B. Schrenk, et al., "Direct 10-Gb/s Modulation of a Single-Section RSOA in PONs With High Optical Budget", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 6, pp. 392-394, 2010.
- [68] K. Cho, et al., "10-Gb/s Operation of RSOA for WDM PON", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 18, pp. 1533-1535, sept.15, 2008.
- [69] N. Dupuis, « Intégration par épitaxie sélective d'un modulateur électro-absorbant et d'un amplificateur optique à base de puits quantiques AlGaInAs », Ph.D. dissertation, Université de Metz, 2008.
- [70] www.ciphotonics.com
- [71] K.H. Han, "Bi-directional WDM Passive optical network using spectrum-sliced light emitting diodes", *OFC'04*. 2004.
- [72] K.H. Han, "Bidirectional WDM PON Using Light-Emitting Diodes Spectrum-Sliced With Cyclic Arrayed-Waveguide Grating", *PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, VOL. 16, NO. 10, OCTOBER 2004.
- [73] D.J. Shin, "C/S band WDM-PON employing colorless bidirectional transceivers and SOA based broadband light sources", *OFC'05*, 2005.
- [74] K-M Choi, "Colourless Operation of WDM-PON based on Wavelength Locked Fabry-Perot Laser Diode", *ECOC'05*, We3.4.3.
- [75] K-M Choi, "Broad-band Light Source Using Mutually Injected Fabry-Pérot Laser Diodes for WDM-PON", *Photonics Technology Letter*, Vol 17, n°12, Déc 2005.

- [76] Josep Prat, & all, "Optical Network Unit based on a Bidirectional Reflective Semiconductor Optical Amplifier for Fiber-to-the-Home Networks", IEEE, Photonics Technology Letters, January 2005 vol. 17, No. 1, pp. 250-253.
- [77] W. Hung, C.K. Chan, L.K. Chen and C. Lin, "System Characterization of a robust Remodulation scheme with DPSK downstream traffic in a WDM access network", ECOC 2003.
- [78] S.Y. Cheung, L.Y. Chan, C.K. Chan, D.T.K. Tong, F.Tong, L.K. Chen, "Demonstration of an ONU for WDM Access Network with Downstream BPSK and upstream remodulated OOK data using injection-locked FP Laser", ECOC 2001.
- [79] J.J. Koponen, "A duplex WDM passive optical network with 1:16 power split using reflective SOA remodulator at ONU", OFC 2004, MF99.1999.
- [80] W. Lee and al. "Bidirectional WDM-PON based on gain-saturated reflective semiconductor optical amplifiers", Photonics Technology Letters, Vol. 17, n°11, November 2005.
- [81] "Wavelength Channel Data rewrite using Saturated SOA modulator for WDM Networks with Centralized Sources" H. Takesue, T. Sugie, Journal of lightwave Technology, Vol. 21, N° 11, Nov 2003.
- [82] "2.5-Gbit/s Wavelength Channel Data Rewriter Using Semiconductor Optical Saturator/Modulator for Drop-and-rewrite WDM Networks", H. Takesue (1), N. Yoshimoto (1), Y. Shibata (2), T. Ito (2), Y. Tohmori (2) and T. Sugie (1), Th233, ECOC 2003
- [83] R. Sato, T. Ito, A. Ohki, Y. Akatsu, H. Toba, "WDM PON system with FSK downstream data using a reflective SOA transmitter", OECC/COIN 2004.
- [84] J.Prat, V. Polo, C. Bock, C. Arellano, J.J. Vegas, "bidirectional Transmission in FTTH using combined FSK-IM modulation formats", in Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2005), paper JWA46.
- [85] J. Prat, C. Bock, V. Polo, C. Arellano, J.J. Vegas, "Full-duplex Single Fiber Transmission using FSK Downstream and IM Remote Upstream Modulations for Fiber-to-the-Home", IEEE Photonics Technology Letters, PTL-13649-2004, vol. 17, no. 3, March 2005.
- [86] M. Seimetz, "Bidirectional Transmission for optical access networks – conventional techniques and novel alternatives", in 9th European Conference on Networks and Optical Communications, NOC 2004, 2004.
- [87] E. Brinkmeyer, "Analysis of the backscattering method for single-mode optical fibers", Journal of Optical Society of America, vol. 70, no. 8, pp. 1010-1012, 1980.
- [88] J. Conradi and I. Few, "Measurement of frequency dependence of Rayleigh backscattering in bidirectional optical systems at 0.83 and 1.3 μm ", Electronics Letters, vol. 16, no. 11, pp. 414-415, May 22 1980.
- [89] M. Gold and A. Hartog, "Measurement of backscatter factor in single-mode fibres", Electronics Letters, vol. 17, no. 25, pp. 965-966, dec. 1981.
- [90] P. Gysel and R. Staubli, "Statistical properties of Rayleigh backscattering in single mode fibers", Journal of Lightwave Technology, vol. 8, no. 4, pp. 561-567, apr. 1990.
- [91] N. Genay and P. Chanclou "effect of backscattering and backreflections on upstream remote modulation in bidirectional link for WDM-PON applications", STREON 2005, paper O3_1.

- [92] J-I. Kani, "Design and demonstration of Gigabit Spectrum-sliced WDM Systems employing directly modulated super luminescent diodes", OFC 2005.
- [93] A. H. Gnauck, P. J. Winzer, « Optical Phase-Shift-Keyed Transmission », IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 23, n°1, pp. 115-130, Jan. 2005
- [94] T. Kawanishi, & all, « LiNbO3 high-speed optical FSK modulator », Electron. Lett., Vol. 40, n°11, May 2004.
- [95] J. Wilson and J. F. B. Hawkes, "Optoelectronics, An introduction", Prentice Hall, 1989.
- [96] N. Boudrioua, "Étude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD", Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine Metz, 2007.
- [97] H. Elkadi and J. P. Vilcot and S. Maricot and D. Decoster, "Microwave circuit modeling for semiconductor lasers under large and small signal conditions", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 3, pp. 379-382 (1990).
- [98] F. Mederer and I. Ecker and R. Michalzik and G. Steinle and H. Riechert and B. Lunitz and J. Moisel and D. Wiedenmann, "VCSEL transmitters for 10-Gigabit Ethernet: 1.3 μm wavelength VCSELs for metropolitan area networks and TO-packaged 850 nm wavelength VCSELs for data transmission over multimode fibers and optical backplane waveguides", Electronic Components and Technology Conference, Vol., pp. 5-11 (2002).
- [99] O. Parillaud and D. Van and N. Vodjdani, "Realization of 20 GHz directly modulated 1.55 μm DFB lasers using partially strain compensated quantum wells structures", International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Vol., pp. 551-553 (2005).
- [100] E. Goutain and J. C. Renaud and M. Krakowski and D. Rondi and R. Blondeau and D. Decoster, "30 GHz bandwidth, 1.55 μm MQW-DFB laser diode based on a newmodulation scheme", Electronics Letters, Vol. 32, pp. 896-897 (1996).
- [101] D. Moodie and all, "40 Gbit/s modulator with low drive voltage and high optical output power", 27th European Conference on Optical Communication, Vol. 3, pp. 332-333 (2001).
- [102] T. Yamanaka, "Ultrafast electroabsorption modulators with traveling-wave electrodes", 27th European Conference on Optical Communication, Vol. 3, pp. 328-331 (2001).
- [103] R. Lewén and all, "Traveling-wave electrode electroabsorption modulators toward 100 Gb/s", Optical Fiber Communication Conference, Vol. 2, pp. 3 (2004).
- [104] D. Moodie and all, "Applications of Electroabsorption Modulators in High Bit-Rate Extended Reach Transmission Systems", Optical Fiber Communications Conference, Vol. 1, pp. 267- 268 (2003).
- [105] N. Courjal, "Modulateur LiNbO3 à faible chirp par inversion de domaine ferro-électrique", Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2002.
- [106] G. L. Li and P. K. L. Yu, "Optical Intensity Modulators for Digital and Analog Applications", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 21, pp. 2010-2030 (2003).
- [107] CARENCO A., "Composants actifs, Systèmes optiques", Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse, Ecole d'été, Juillet 1991, pp. 93-143.
- [108] K. Noguchi, et all, « Millimeter-Wave Ti: LiNbO3 optical modulators », Journal of lightwave technology, vol.16, no. 4, April 1998, pp. 615-619.
- [109] S. Tsukamoto, K. Katoh, K. Kikuchi, « Unrepeated Transmission of 20-Gb/s Optical Quadrature Phase-Shift-Keying Signal Over 200-km Standard Single-Mode Fiber Based on Digital Processing of Homodyne-Detected Signal for Group-Velocity

- Dispersion Compensation », *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 18, n°9, pp. 1016-1018, May 2006.
- [110] G. Charlet, J. Renaudier, M. Salsi, H. Mardoyan, P. Tran, S. Bigo, « Efficient Mitigation of Fiber Impairments in an Ultra-Long Haul Transmission of 40Gbit/s Polarization-Multiplexed Data, by Digital Processing in a Coherent Receiver », in *proc. OFC'07, PDP17*, Anaheim, California, March 25-29, 2007.
- [111] M. Ohm, T. Freckmann, « Comparison of Different DQPSK Transmitters with NRZ and RZ Impulse Shaping », in *proc. LEOS'04, ThB2*, July 1-2, 2004
- [112] G. Amouzad and A. Fauzi, “Advanced Modulation Formats and Multiplexing Techniques for Optical Telecommunication Systems,” In *Trends in Telecommunications Technologies*, édité par Christos J. InTech, 2010.
- [113] A. H. Gnauck, P. J. Winzer, “Optical Phase Shift Keyed Transmission”, *J. of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 1, Jan 2005.
- [114] W. Shieh, X. Yi, Y. Ma and Q. Yang, “Coherent optical OFDM: has its time come?”, *Journal of Optical Networking*, vol. 7, no. 3, pp. 234-255, 2008.
- [115] Lian Zhao, Hari Shankar, Ariel Nachum, “40G QPSK and DQPSK Modulation”, Inphi Corporation, (2008).
- [116] S.D. Dissanayake and J. Armstrong, “Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADOOFDM in IM/DD systems,” *Journal of Lightwave Technology.*, 31, (7), 1063–1072, (2013).
- [117] W. Shieh, I. Djordjevic, *OFDM for Optical Communications*. (Elsevier, Amsterdam, 2009).
- [118] D. Matiaë, « OFDM as a possible modulation technique for multimedia applications in the range of mm waves», *Introduction to OFDM*, edition II, 1998.
- [119] H. Schulze, C. Lüders, « Theory and Applications of OFDM and CDMA, Wideband Wireless Communications », John Wiley & Sons, Ltd, 2005
- [120] H. Bao, W. Shieh, “Transmission simulation of coherent optical OFDM signals in WDM systems”, *Optics Express*, Vol. 15, Issue 8, pp. 4410-4418, (2007).
- [121] S. C. J. Lee, & al, «24-Gb/s transmission over 730 m of multimode fiber by direct modulation of 850-nm VCSEL using discrete multi-tone modulation, » in *Opt. Fiber Commun. Conf.*, Anaheim, CA, 2007.
- [122] Brendon.J & al. «Experimental Demonstrations of Electronic Dispersion Compensation for Long-Haul Transmission Using Direct-Detection Optical OFDM» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, VOL. 26, NO. 1, JANUARY 1, 2008.
- [123] *Optical Communication System Design Software “OptiSystem Getting Started” Version 12*, Optiwave, 2013.
- [124] A.CHENIKA, A. TEMMAR, H. OUALD SAADI, A. BOUTALEB, ‘Nouvelle architecture du réseau d’accès haut débit WDM-PON, utilisant la modulation NRZ-DQPSK/ASK’. *CGE’08, ALGERIE*, 16-17 Avril, 2013.
- [125] A.CHENIKA, A. TEMMAR, and O.SEDDIKI, “A Novel architecture of an optical high-speed access network WDM-PON using NRZ-DQPSK/ASK modulation”, *ICNCRE’13*, ISBN: 978-81-925233-8-5, vol 1, Algeria, 2013, pp 396-398.
- [126] A.CHENIKA, A.TEMMAR, O.SEDDIKI, «Transmission of 4x40/10Gbps in a WDM-PON using NRZ-DQPSK/ASK modulation », *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Volume 125, Issue 20, Pages 6296–6298. October 2014.

- [127] A.CHENIKA, A.TEMMAR, O.SEDDIKI, «Transmission of 160/40 Gbps in a WDM-PON using NRZDQPSK/ASK modulationn », 3rdInternational Conference on Optics Photonics and their Applications ICOPA'2013, December 9 -11, 2013, Algiers.
- [128] RSoft Design Group, "OptSim Models Reference: Volume I Sample Mode", www.rsoftdesign.com.
- [129] A.CHENIKA, A.TEMMAR, O.SEDDIKI "An WDM-PON with downstream NRZ-DQPSK and upstream re-modulated NRZ-ASK", The fourth International Conference ComNet'2014, 19 - 22 March, 2014, Hammamet, Tunisia,978-1-4799-3764-6/14/\$31.00 ©2014 IEEE.
- [130] A.CHENIKA, A.TEMMAR, O.SEDDIKI, "Transmission Simulation of 40Gbps DDO-OFDM signal in WDM-PON access network", International conference OPAL 2015 (Optics and Photonics Algeria), USTHB Algiers, 13-15 December 2015.
- [131] Park S. J., Kim G. Y., Park T. S., "WDM-PON system based on the laser light injected reflective semiconductor optical amplifier," *Optical Fiber Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 162–169, April 2006.
- [132] Lee J. H., Lee K., Lee S. B., Kim C. H., "Extended-reach WDM-PON based on CW super continuum light source for colorless FP-LD based OLT and RSOA- based ONUs," *Optical Fiber Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 310–319, June 2009.
- [133] Yeh C. H., Chow C. W., Wu Y. F., Shih F. Y., Chi S., "Experimental demonstration of CW light injection effect in upstream traffic TDM-PON," *Optical Fiber Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 178–181, June 2010.
- [134] Lee K., Lim S. D., Jhon Y. M., Kim C. H., Ghelfi P., Nguyen A. T., Poti L., Lee S. B., "Broadcasting in colorless WDM-PON using spectrum-sliced wavelength conversion," *Optical Fiber Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 112–116, March 2012.
- [135] Kim K. O., Lee J. H., Lee S. S., Jang Y. S., "Demonstration of a WDM/TDM hybrid PON based on a colorless frame-level reach extender," *Optical Fiber Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 190–198, July 2012.
- [136] Kim J., Park C. S., "Optical design and analysis of CWDM upstream TWDM PON for NG-PON2," *Optical Fiber Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 250–258, June 2013.
- [137] Khan A. M., Zhang J., Zhao Y., Gao G., Chen S., Wang D., "Simple and spectrally-efficient design of high capacity hybrid WDM/TDM-PON with improved receiver sensitivity," *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, vol. 20, no. 3, pp. 114-120, June 2013.
- [138] Li L., Gu R., Ji Y., Bai L., Huang Z., "All-optical OFDM network coding scheme for all-optical virtual private communication in PON," *Optical Fiber Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 61–67, March 2014.
- [139] Hou F., Yang M., "The analysis of system performance of WDM/ OCDMA- PON based on DQPSK," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, no. 15, pp. 4150–4153, August 2014.
- [140] Parolari P., Marazzi L., Brunero M., Gatto A., Martinelli M., Chanclou P., Deniel Q., Saliou F., Le S. D., Brenot R., Barbet S., Lelarge F., Gebrewold S., O'Duill S., Hillerkuss D., Leuthold J., Gavioli G., Galli P., "Self-tuning transmitter for fibre-to-the-antenna PON networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 14, pp. 25–31, August 2014.
- [141] Kaur K. P., Randhawa R., Kaler R. S., "Performance analysis of WDM-PON architecture using different receiver filters," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, no. 17, pp. 4742–4744, September 2014.

- [142] Husein A. H. M., Nahal F. I. E., “Optimal design of 32 channels spectrum slicing WDM for optical fiber access network system,” *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, no. 18, pp. 5141–5143, September 2014.
- [143] Pandey G., Goel A., “Performance analysis of symmetrical 10 Gbps colorless WDM-PON using subcarrier modulated downstream and wavelength converted upstream through RSOA,” *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, no. 17, pp. 4951–4954, September 2014.
- [144] Prat J., Polo V., Schrenk B., Lazaro J. A., Bonada F., Lopez E. T., Omella M., Saliou F., Le Q. T., Chanclou P., Leino D., Soila R., Spirou S., Costa L., Teixeira A., Tosi-Beleffi G. M., Klondis D., Tomkos I., “Demonstration and field trial of a resilient hybrid NG-PON test-bed,” *Optical Fiber Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 537–546, October 2014.

GLOSSAIRE

A

ADC	Analog to Digital Converter
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AON	Active Optical network
APD	Avalanche Photo diode
APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arrayed Waveguide Grating

B

BER	Bit Error Rate
BPON	Broadband Passive Optical Network
BPSK	Binary PSK
BTB	Back To Back
BW	Band Width

C

CD	Chromatic Dispersion
CO	Central Office
CO-OFDM	Coherent Optical OFDM
CP	Cyclic Prefix
CWDM	Coarse WDM

D

DAB	Digital Audio Broadcasting,
DAC	Digital to Analogue Converter
DAC	Digital to Analog Converter
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DBR	Distributed Bragg Reflector
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DD-OOOFDM	Direct Detection Optical OFDM
DFB	Distributed Feedback laser
DML	Directly Modulated Laser
DMUX	Demultiplexer
DQPSK	Differential QPSK
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DSP	Digital Signal Processor
DVB-T	Digital Video Broadcasting Terrestrial
DWDM	Dense WDM

E

EAM	Electro Absorption Modulator
ECL	External Cavity Laser
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EPON	Ethernet Passive Optical Network

F

FDM	Frequency Division Multiplexing
FEC	Forward Error Code
FFT	Fast Fourier Transform
FI	Fréquence Intermédiaire
FIR	Finite Impulse Response
FP	Fabry-Perot laser
FSAN	Full Service Access Network

FSK	Frequency Shift Keying
FTTx	Fiber To The x
G	
GEM	GPON Encapsulation Method
GEPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network
GFP	Generic Framing Protocol
GI	Gradient d'Indice
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
H	
HDTV	High Definition Television
I	
ICI	Inter Carrier Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IL-FP	Injection Locked Fabry Perot
IP	Internet Protocol
ISI	Inter Symbol Interference
ITU-T	International Telecommunications Union
L	
LAN	Local Area Network
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light Emitting Diode
M	
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MUX	Multiplexer
MZM	Mach-Zehnder Modulator
N	
NG	Next Generation
NRA	Nœud de Raccordement d'Abonnés
NRO	Nœud de Raccordement Optique
NRZ	Non Return to Zero
NT	Network Termination
O	
ODN	Optical Distribution Network
OEO	Optical-Electrical-Optical
OFDM (A)	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Access)
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
OOK	On-Off Keying
OSA	Optical Spectrum Analyzer
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OTR	Optical-to-RF
P	
P2M	Point-à-multipoint
P2P	Point à point

PAPR	Peak Average Power Ratio
PD	Photo Diode
PIC	Photonic Integrated Circuit
PLC	Planar Lightwave Circuit
PMD	Polarization Mode Dispersion
PON	Passive Optical network
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence
PSC	Passive Splitter-Combiner
PSK	Phase Shift Keing
Q	
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
R	
R-EAM	Reflective Electro-Absorption Modulator
RF	Radio Fréquence
RN	Remote Node
R-SOA	Reflective Semiconductor Optical Amplifier
RTO	RF-to-optical
S	
SLED	Superluminescent Light Emitting Diode
SMF	Single Mode Fiber
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SSMF	Standard Single Mode Fiber
T	
TDM	Times Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TEC	Thermo-Electric Cooler
T-ECL	Tunable External Cavity Laser
U	
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
US	Up Stream
V	
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VDSL	Very high data DSL
W	
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WDM (A)	Wavelength Division Multiplexing (Access)
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
X	
XG-PON1	10GPON asymétrique normalisé par le FSAN
XG-PON2	10GPON symétrique normalisé par le FSAN

ANNEXE

Recueil des travaux de thèse de doctorat



Transmission of $4 \times 40/10$ Gbps in a WDM-PON using NRZ-DQPSK/ASK modulation



Abdelfettah Chenika^{a,*}, Abdelkader Temmar^{a,1}, Omar Seddiki^{b,2}

^a Laboratory of Applied Research in TIC (La RATIC), INTTIC, Oran, Algeria

^b Laboratory of Telecommunications, Abu-Bakr Belkaid University of Tlemcen, Algeria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 November 2013

Accepted 16 June 2014

Keywords:

Passive Optical Network (PON)
Wavelength division multiplexing (WDM)
No return-to-zero (NRZ)
Amplitude Shift Keying (ASK)
Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK)

ABSTRACT

In this paper we demonstrate the feasibility to deploy a wavelength division multiplexing passive optical network (WDM-PON) of a 30 km standard single-mode fiber (SSMF-28) carrying 160 Gbps data in downstream and 40 Gbps through the uplink. The developed method is based on the comparison between two WDM-PON systems of 4 channels with the same characteristics, using two different formats of modulation in OLTs. The first system uses the NRZ-ASK in the downlink direction, while the second uses the NRZ-DQPSK.

© 2014 Elsevier GmbH. All rights reserved.

1. Introduction

Today, FTTH (Fiber-To-The Home) systems are being deployed to increase bandwidth and provide more services to users [1]. Systems installed by many operators use a passive optical network architecture (Passive Optical Network – PON) and are based on the IEEE EPON (Ethernet PON) or ITU GPON (Gigabit PON), with downstream speeds of 1.25 Gbit/s and 2.5 Gbit/s, respectively [2,3]. These technologies are based on time division multiplexing (TDM) of user's data, and provide less than 100 Mbps per single user. Currently the wavelength division multiplexing (WDM) based standards are being introduced in access networks to enable higher bandwidth capacity per user [4,5].

In a WDM PON configuration, each ONU (Optical Network Unit) receives the throughput supported by the wavelength assigned to it. Thus, we can imagine that the different optical carriers can be modulated by electrical signals at different rates depending on services requested by users: this is the concept of multi-service/multi-speed. We can thus create optical subnets on a single

optical fiber infrastructure. The WDM PON network must therefore be flexible, scalable in bandwidth and number of users and economically conceivable.

In order to increase data rates in the optical links, a number of advanced modulation formats were adopted for their effectiveness and their capacity to fight against the effects of chromatic dispersions (CD), polarization mode dispersions (PMD) and nonlinear effects [6].

In optical access networks, several orthogonal modulation formats have been deployed in the downlink and uplink transmission, such as the DPSK (Differential Phase Keying Shift) in downstream and OOK (One-Off keying) in upstream, the FSK (Frequency Shift Keying) in down direction and ASK (Amplitude Shift Keying) in the opposite direction, thus the use of DPSK in both directions [7–10]. The author of the article [11] showed the feasibility to transmit 40/10 Gbps of data in a WDM-PON of 30 km of length using the NRZ-DQPSK modulation in downlink and the re-modulation DQPSK/ASK in uplink.

In this document, our work consists to test the architecture proposed in [11] and make a study of a link constituted of four channels transmitting 160/40 Gbps of data through 30 km of single mode fiber (SMF). In order to assess our system, we compared it with another WDM-PON system having the same characteristics but using the NRZ-ASK/ASK modulation. Let us note that simulations are made by OptiSystem 12.0 tools. In deferent simulations we have considered the effects of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in bidirectional fiber.

* Corresponding author. Tel.: +213 778623420.

E-mail addresses: achenika@ito.dz (A. Chenika), a.temmar@hotmail.com (A. Temmar), omar_seddiki@yahoo.fr (O. Seddiki).

¹ Tel.: +213 790342936.

² Tel.: +213 553136959.

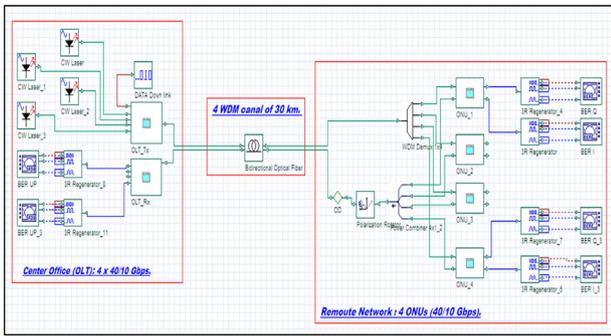


Fig. 1. Architecture of the simulated system.

2. Description of simulations

2.1. Network architecture

We propose below the architecture of a passive optical network WDM-PON which provides high bandwidth per user and supports multiple channels. Indeed, the work carried out in this paper allows to make a comparison between two WDM-PON with the same characteristics, the difference is located in the type of modulation used on downstream of systems, where the first uses the traditional modulation NRZ-ASK and the second uses NRZ-DQPSK.

Fig. 1 presents the general structure of the simulated system, including the Optical Line Terminal (CO: Center Office) which communicates with four ONUs (End User) via a bidirectional optical fiber of 30 km. The type of the fiber is a G.652 standard single-mode fiber (SMF) (16.5 ps/nm km chromatic dispersion, 0.20 dB/km attenuation, polarization dispersion coefficient $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$). The total link loss was measured at 25 dB.

The four WDM channels employed were separated by 100 GHz (0.8 nm), at standard International Telecommunication Union (ITU)

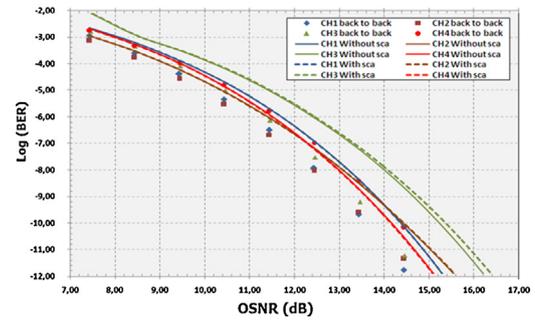


Fig. 2. BER vs OSNR for NRZ-ASK/NRZ-ASK system.

wavelengths, denoted by $\lambda_1 = 1549.2 \text{ nm}$ through $\lambda_4 = 1551.6 \text{ nm}$. The downlink signal generated by the OLT is multiplexed by a WDM multiplexer before being passed through the optical fiber. The AWG (Arrayed Waveguide Grating) located at the other side of the fiber ensures de-multiplexing channels to the ONUs, the uplink data is re-modulated by the downlink optical carrier in the ONU and will be retransmitted to the OLT.

Note that the effect of the chromatic dispersion is not simulated because its compensation is controlled perfectly by several methods dedicated to that. All nonlinear effects are taken into account in this study. The effects of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in bidirectional fiber are also considered.

2.2. Description of NRZ-DQPSK/ASK link

The NRZ-DQPSK transmitter is composed of a CW (Continuous Wave) laser source that works at $\lambda_i \in [1549.2, 1552.4] \text{ nm}$ with an output power $P_0 = 0 \text{ dBm}$. The data is generated by a pseudo-random generator of 512 bits of length at a rate of 40 Gbps. After differential pre-coding, the data is modulated optically through two parallel Mach-Zehnder modulators MZM; for more details

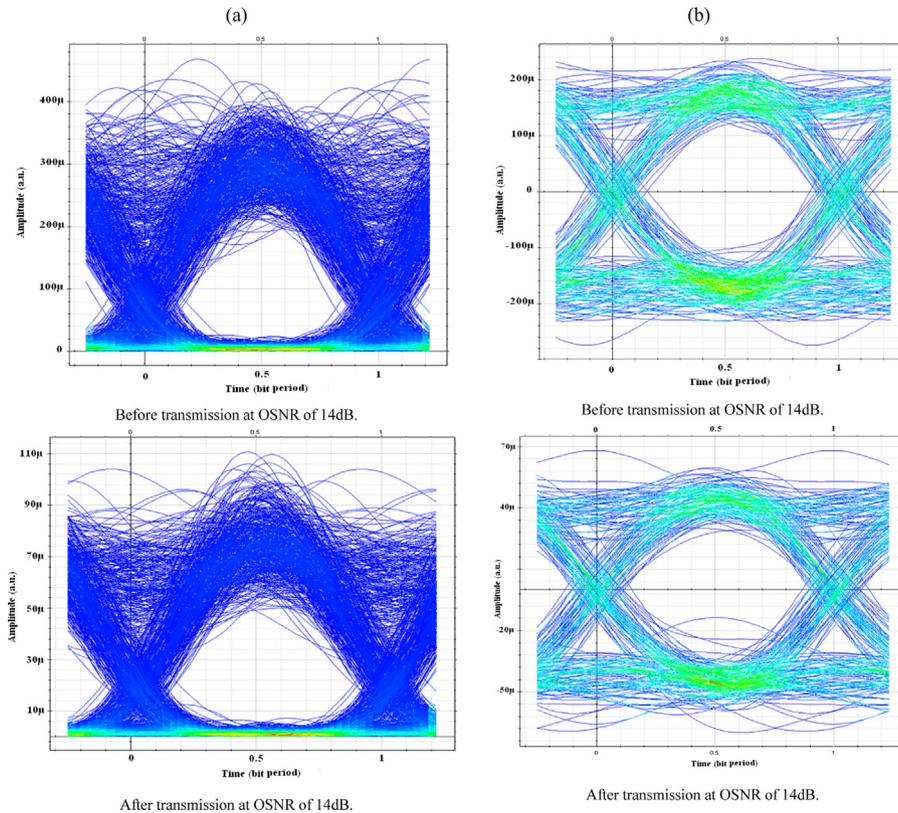


Fig. 3. Eye diagrams before and after transmission in (a) NRZ-ASK/ASK system, (b) NRZ-DQPSK/ASK system.

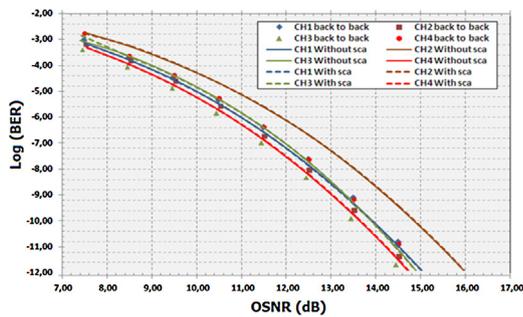


Fig. 4. BER vs OSNR for NRZ-DQPSK/NRZ-ASK system.

see [11]. After transmission and wavelength de-multiplexing, the NRZ-DQPSK signals are demodulated using a one-symbol delay Mach-Zehnder interferometer (MZI) and detected by a pair of balanced photo-detectors (BPDs). The ONU transmitter uses the re-modulation DQPSK/ASK, by recovering part of the optical signal polarized vertically. Then, it is used to modulate the upstream data by an MZM. In order to evaluate the system's quality, the BER is measured at the reception of each direction (ONU and OLT) by varying the optical power of the additive noise.

3. Discussion of results

In this section, we present the simulation results of the studied network.

Fig. 2 shows the curve of BER versus the OSNR (Optical Signal-to-Noise ratio) measured at the receiver of NRZ-ASK/ASK system. Note that when increasing the OSNR the system's quality becomes important; this is very remarkable by the decrease of BER. In addition to this, for a BER of 10^{-9} , we observed that the system almost has not undergone degradations when we simulated the Rayleigh and Brillouin scattering for all channels, except for channel 3 where we noticed a penalty of 1 dB compared to back to back. The eye diagrams before and after transmission shown in Fig. 3 show no transmission distortion; thus confirming good transmission properties.

Fig. 4 shows the BER performance with varied OSNR for the NRZ-DQPSK/ASK system. The influence of Rayleigh and Brillouin scattering is transparent to the system, except for channel 2 where we measured a penalty of 1 dB compared to back to back at

BER = 10^{-9} . Comparing the two figures, it can be noticed that the 2nd system represents a gain of 0.5 dB, which promotes the use of the DQPSK modulation in high speed WDM-PON systems.

4. Conclusion

In this work we made a comparison between two high speed WDM-PON systems with four channels using two different formats of modulation (NRZ-ASK/ASK and NRZ-DQPSK/ASK) for a distance of 30 km at a rate of 160/40 Gbps. The results show the advantage to use DQPSK modulation in such networks. The deployment of direct re-modulation uplink data on the downlink optical carrier avoids using a new laser at the client side, so allows an efficient use of the band because it uses the same wavelength in both directions (downlink and uplink) which allows to have a large number of channels, so several ONUs per fiber. This architecture may be viewed as a highly attractive candidate for the next generation optical access networks. This work was carried out at the Laboratory of Optoelectronics in the National Institute of Telecommunications and Information Technologies and Communication of Oran, Algeria.

References

- [1] L. Hutchesson, Ovum «FTTx: current status and the future», IEEE Commun. Mag. (2008 July), www.comsoc.org
- [2] ITU-T G.984. <<http://www.itu.int>>.
- [3] IEEE 802.3. <<http://www.iee.org>>.
- [4] K. Grobe, J.-P. Elbers, PON in adolescence: from TDMA to WDM-PON, Commun. Mag. 46 (1) (2008) 26–34.
- [5] G.-K. Chang, A. Chowdhury, Z. Jia, H.-C. Chien, M.-F. Huang, J. Yu, G. Ellinas, Key technologies of WDM-PON for future converged optical broadband access networks, J. Opt. Commun. Netw. 1 (4) (2009) C35–C50.
- [6] R.S. Vodhanel, A.F. Elrefaie, M.Z. Igbal, R.E. Wagner, J.L. Gimlett, S. Tsuji, Performance of directly modulated DFB laser in 10 Gb/s ASK, FSK and DPSK lightwave systems, Lightwave Technol. J. 8 (1990) 1379–1385.
- [7] W. Hung, C. Chan, L. Chen, F. Tong, An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream re-modulated OOK data using injection-locked FP laser, PTL: Photonics Technol. Lett. 15 (2003) 1476–1478.
- [8] N. Deng, W. Hung, C. Chan, L. Chen, F. Tong, A novel wavelength modulated transmitter and its application in WDM-PON, in: OFC, MF79, 2004.
- [9] G. Lu, N. Deng, C. Chan, L. Chen, Use of downstream IRZ signal for upstream data re-modulation in a WDM passive optical network, in: OFC, OF18, 2005.
- [10] Y. Tian, L. Yi, X. Tian, H. He, X. Xu, Y. Su, L. Leng, Optical VPN in PON based on DPSK erasing/rewriting and DPSK/IM formatting using a single Mach-Zehnder modulator, in: ECOC, Tu4.5.6, 2006.
- [11] A. Chenika, A. Temmar, O. Seddiki, A Novel architecture of an optical high-speed access network WDM-PON using NRZ-DQPSK/ASK modulation, in: ICNCRE'13, vol. 1, Algeria, 2013, ISBN 978-81-925233-8-5, pp. 396–398.

Transmission Simulation of 40Gbps DDO-OFDM signal in WDM-PON access network.

A.CHENIKA^{1,2}, A.TEMMAR¹, O.SEDDIKI²

¹Laboratory of Applied Research in TIC (La RATIC), INTTIC, Oran (ALGERIA).

²Department of Electrical Engineering, laboratory of Telecommunications.

(Abu-Bakr Belkaïd University), Tlemcen, (ALGERIA).

achenika@ito.dz; a_temmar@hotmail.com; omar_seddiki@yahoo.fr.

Abstract: In the context of Passive Optical Networks (PON), operators look for innovative solutions to increase the aggregate throughput, the number of users and the range of transmission. Moreover, transceivers at low cost solutions are needed. The optical modulation Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OOFDM) can improve the communication's performance in terms of bit rate and transmission range. The aim of this work is to study the performance of a WDM-PON network using this modulation. To achieve this, a dedicated simulation platform was developed. The results show the ability to carry 40Gbps by ONU (Optical Network Unit) through 30km of singlemode fiber, compatible with the requirements of future generation PONs.

Keywords: DDO-OFDM; WDM-PON; ONU; OLT.

1. Introduction

The orthogonal frequency division multiplexing method (OFDM) is an attractive technique that is widely used in high-speed wired and wireless systems, due to its robustness against inter-symbol interference (ISI) caused by the dispersive channel.

During the last recent years, we have witnessed a significant interest to this method by the optical communications community [1,2]. The number of publications who study the optical OFDM has increased significantly since it was proposed as an interesting modulation format for long distance transmission, either in coherent detection [3,4] or in the direct detection [5-7].

DDO-OFDM has much more variants than the coherent counterpart. This mainly stems from the broader range of applications for direct-detection OFDM due to its lower cost. For example, the single-side-band OFDM (SSB-OFDM), which has been recently proposed by Lowery & al. and Djordjevic & al. for long-haul transmission [5,6]. Tang & al. proposed adaptive optical OFDM (AMOOOFDM) which shows promising results for both single mode and multimode fiber [7]. The common feature for DDO-OFDM is obviously the use of the direct detection at the receiver, which provides a very simple architecture for the receiver, as for the transmitter, which promotes the use of this modulation type in PON networks. In addition, the implementation of this modulation is very easy.

Recently, the optical re-modulation has been proposed to achieve the centralization of optical carrier, where only one light source is used in order to reduce the cost of the transmitter at the customer side [8].

In this document, our work consists of proposing a new architecture of a WDM-PON system which transmits 40 Gb/s of data through 30 km of SSMF using DDO-OFDM modulation in downlink and 10 Gb/s of data using the re-modulation DDO-OFDM/ASK in uplink.

System concepts, the theoretical bases, the simulated network and the results will be discussed later.

Let us note that the study is performed by a co-simulation involving Matlab (for the generation of the OFDM signal) and OptiSystem 12 (for the simulation of the optical system) taking into account the effects of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in a bidirectional fiber.

2. Optical OFDM: Theory and implementation

The OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), has been a great maturity in radio frequency. It allows fighting against the temporal spreads and is robust to chromatic dispersion in optical channel. One of the other interests of OFDM is that it can use components of low cost, low bandwidth allowing direct modulation of the laser and direct detection in reception [9,10].

OFDM is a frequency modulation that consists to divide the bandwidth into multiple orthogonal sub-bands (several subcarriers N_{sc}). These sub-bands are used for transmitting a set of symbols for a longer duration in order to avoid the frequency selectivity of the channel. The implementation of this modulation is very simple since it suffices to parallelize the symbols coming from a constellation, to apply an IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) and serialize them again (Fig 1). After Fourier transform, the complex values obtained are incompatible with the optical amplitude modulation.

To overcome this problem, we use the same technique as DMT (Discrete Multi Tone); it is to generate a signal having a Hermitian symmetry. The Hermitian symmetry consists to make the following operation: for a packet of size N (X_0, X_1, \dots, X_N), we construct the vector of size $2*N$ ($X_0, X_1, \dots, X_N, X_N^*, \dots, X_1^*, X_0^*$) when X^* is the conjugate of X (Fig 1). In this manner, the signal at the output of OFDM modulator is purely real, so we use the intensity laser modulation to generate the optical signal, in reception, direct detection is sufficient for the demodulation of the signal, by using a simple PIN or APD photodiode. In order to equalize the channel, we insert at the beginning of the frame several OFDM words known at the reception.

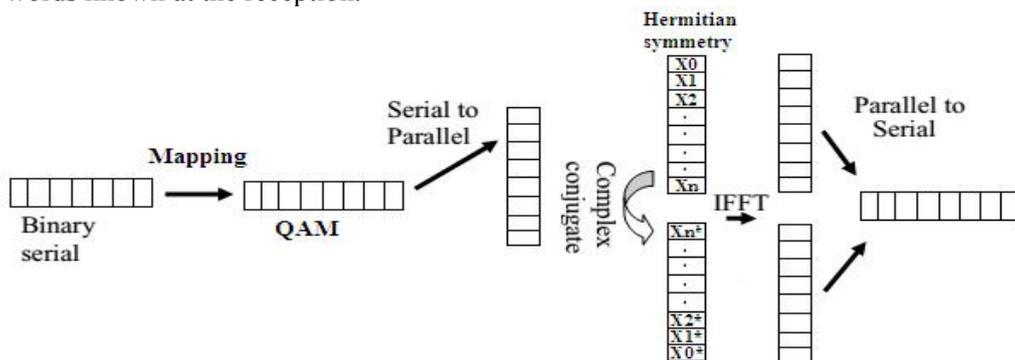


Fig.1. Generation principle of an OFDM symbol with Hermitian symmetry

3. Network architecture

Figure 2 presents the general structure of the simulated system, including Optical Line Terminal (OLT) transmitting an optical signal using the OFDM modulation, an Optical Network Unit (ONU), connected between them by a standard bidirectional fiber (SMF-28) with 30 km of length. The downstream signal is generated at OLT, sent through optical fiber at ONU which represents customer side, and re-modulated to the ASK format to load the upstream data which is received at OLT. In our simulations, the attenuation coefficient in the fiber is 0.2 dB/km, the effect of the chromatic dispersion is not simulated because its compensation is controlled perfectly by several methods dedicated to that purpose. All nonlinear effects are taken into account in this study. We considered also the effect of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in the bidirectional fiber.

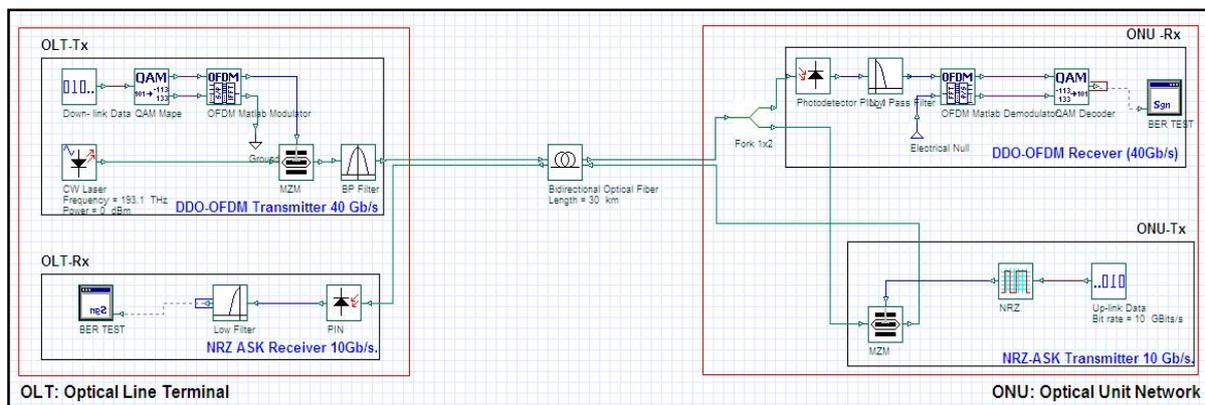


Fig. 2. Architecture of the simulated WDM-PON system.

4. Discussion of results

In this section, we present the simulation results of the studied network. Figure 3.a shows the curve of BER versus the OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) measured at the receiver for the downlink. It is clear that when the noise level increases the performance of the system is mediocre, the signal is

submerged in the noise and therefore the decision is difficult because the signal is modulated in amplitude and the noise acts on the amplitude therefore the signal's level detection becomes difficult. We observed that the system almost has not undergone any degradation when we simulated the Rayleigh and Brillouin scattering compared to the back to back, which shows the performance of this modulation against the adverse effects of transmission. The variation of transmission's quality for the uplink with regard to the various values of OSNR is shown in Figure 3.b. The influence of Rayleigh and Brillouin scattering is remarkable, and presents a penalty of 7 dB compared to the back to back. These results seem logical because the NRZ-ASK modulation is very sensitive to variations of the optical power in downlink signal that affects the uplink signal.

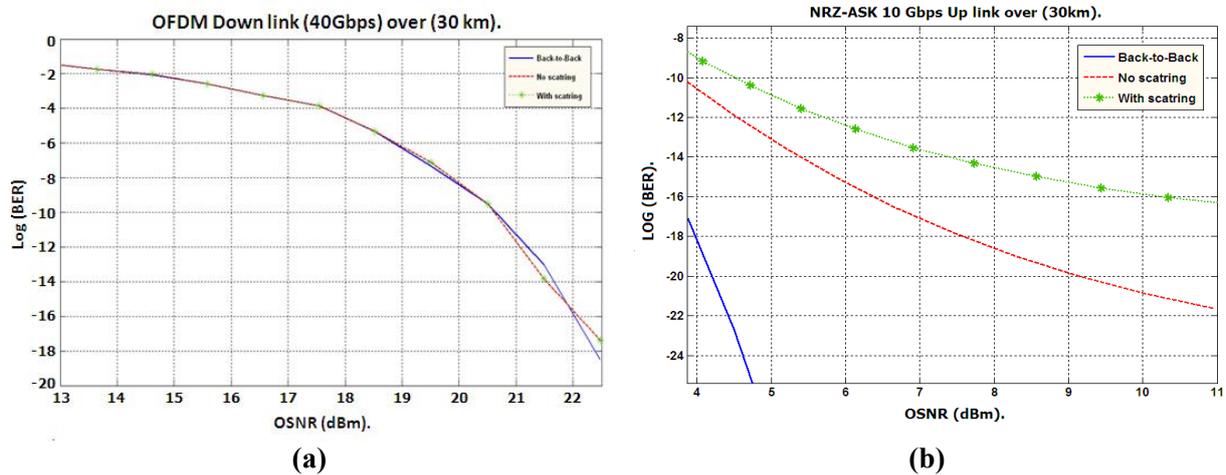


Fig. 3. BER vs OSNR for a WDM-PON system using the OFDM/ASK modulation.

5. Conclusion

In this work we have shown by simulation that the transmission performance is not degraded when we used a DDO-OFDM modulation in a WDM-PON system of 30 km range for a bit rate of 40 Gbps in downlink. The direct re-modulation of upstream data by the downlink carrier avoids the use of a new laser at the client's side. This architecture may be viewed as a highly attractive candidate for the next generation optical access networks. This work was carried out at the Laboratory of Optoelectronics in the National Institute of Telecommunications and Information Technologies and Communication of Oran, ALGERIA.

6. References

- [1] S.D. Dissanayake and J. Armstrong, "Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADOOFDM in IM/DD systems," *Journal of Lightwave Technology*, 31, (7), 1063–1072, (2013).
- [2] J. Armstrong, "OFDM for optical communications", *Lightwave Technol.* 27, pp. 189-204 (2009).
- [3] W. Shieh, I. Djordjevic, "OFDM for Optical Communications". Elsevier, Amsterdam, 2009.
- [4] W. Shieh, & all, "Coherent optical OFDM: theory and design" *OPTICS EXPRESS*, Vol. 16, No. 2 / pp 841- 859 OSA, (2008).
- [5] A.J. Lowery, & all, "Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems, *Optical fiber communication conference*", paper PDP, Anaheim, CA, p. 39, (2006).
- [6] I.B. Djordjevic, B. Vasic, "Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission", *Opt. Express* 14, 3767–3775 (2006).
- [7] J.M. Tang, & all, "Optimization of adaptively modulated optical OFDM modems for multimode fibre-based local area networks", *J. Opt. Networking*, 7, 198–214 (2008).
- [8] An Vu Tran, & all, "Ethernet PON or WDM PON: A Comparison of Cost and Reliability", *TENCON 2005*.
- [9] L. Chen, & all, "Performance analysis for optical OFDM transmission in short-range IM/DD systems," *Journal of Lightwave Technology*, 30, (7), 974–983, (2012).
- [10] T.N. Duong & all, "Experimental Demonstration of 10Gbit/s Transmission over 110 km SNF by direct modulation of 2 GHz Bandwidth laser using Discrete Multi-tone Modulation for access network applications", *OFC 2008*.

An WDM-PON with downstream NRZ-DQPSK and upstream re-modulated NRZ-ASK.

A.CHENIKA¹ A.TEMMAR²

Laboratory of Applied Research in TIC (La RATIC),
INTTIC, Oran (ALGERIA).

¹B27500@yahoo.fr;

²a_temmar@hotmail.com;

O.SEDDIKI

Department of Electrical Engineering,
laboratory of Telecommunications.

(Abu-Bakr Belkaid University), Tlemcen, (ALGERIA)

omar_seddiki@yahoo.fr.

Abstract– In this paper we prove the ability to deploy a WDM-PON of a 30 km standard single-mode fiber (G.652) carrying 160 Gbps data in downstream and 40 Gbps through the uplink. The method developed here is based on the comparison between two WDM-PON systems of four channels, where each one uses in its OLT own format of modulation. The first system uses the NRZ-ASK in the downlink direction, while the second uses the NRZ-DQPSK.

Keywords–Single-mode fiber (SMF), Passive Optical Network (PON), Optical Line Terminal (OLT), Optical Network Unit (ONU),Wavelength Division Multiplexing (WDM), No Return-to-Zero (NRZ), Amplitude Shift Keying (ASK), Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK), Differential Detection, Bidirectional fiber.

I. INTRODUCTION

Today, FTTH (Fiber-To-The Home) systems are being deployed to increase bandwidth and provide more services to users [1]. Systems installed by many operators use a passive optical network architecture (Passive Optical Network PON) and are based on the IEEE EPON (Ethernet PON) or ITU GPON (Gigabit PON), with downstream speeds of 1.25 Gbit/s and 2.5 Gbit/s, respectively [2,3]. These technologies are based on time division multiplexing (TDM) of user's data, and provide less than 100 Mbps per single user. Currently the wavelength division multiplexing (WDM) based standards are being introduced in access networks to enable higher bandwidth capacity per user [4,5].

In a WDM PON configuration, each ONU (Optical Network Unit) receives the throughput supported by the wavelength assigned to it. Thus, we can imagine that the different optical carriers can be modulated by electrical signals at different rates depending on services requested by users: this is the concept of multi service / multi-speed. We can thus create optical subnets on a single optical fiber infrastructure. The WDM PON network must therefore be flexible, scalable in bandwidth and number of users and economically conceivable.

In order to increase data rates in the optical links, a number of advanced modulation formats were adopted for their

effectiveness and their capacity to fight against the effects of chromatic dispersions (CD), polarization mode dispersions (PMD) and nonlinear effects [6].

In optical access networks, several orthogonal modulation formats have been deployed in the downlink and uplink transmission, such as the DPSK (Differential Phase Keying Shift) in downstream and OOK (One-Off keying) in upstream, the FSK (Frequency Shift Keying) in down direction and ASK (Amplitude Shift Keying) in the opposite direction, thus the use of DPSK in both directions [7-10].

The author of the article [11] showed the feasibility to transmit 40/10 Gbps of data in a WDM-PON of 30 km of length using the NRZ-DQPSK modulation in downlink and the re-modulation DQPSK/ASK in uplink.

In this document, our work consists to test the architecture proposed in [11] and make a study of a link constituted of four channels transmitting 160/40 Gbps of data through 30 km of single mode fiber SMF. In order to assess our system, we compared it with another WDM-PON system having the same characteristics but using the ASK/ASK modulation. Let us note that simulations are made by OptSim 4.7 tools. In different simulations we have considered the effects of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in bidirectional fiber.

II. DESCRIPTION OF SIMULATIONS

A. Network architecture

We propose below the architecture of a passive optical network WDM-PON which provides high bandwidth per user and supports multiple channels. Indeed, the work carried out in this paper allows to make a comparison between two WDM-PON with the same characteristics, the difference is located in the type of modulation used on downstream of systems, where the first uses the traditional modulation NRZ-ASK and the second uses NRZ-DQPSK.

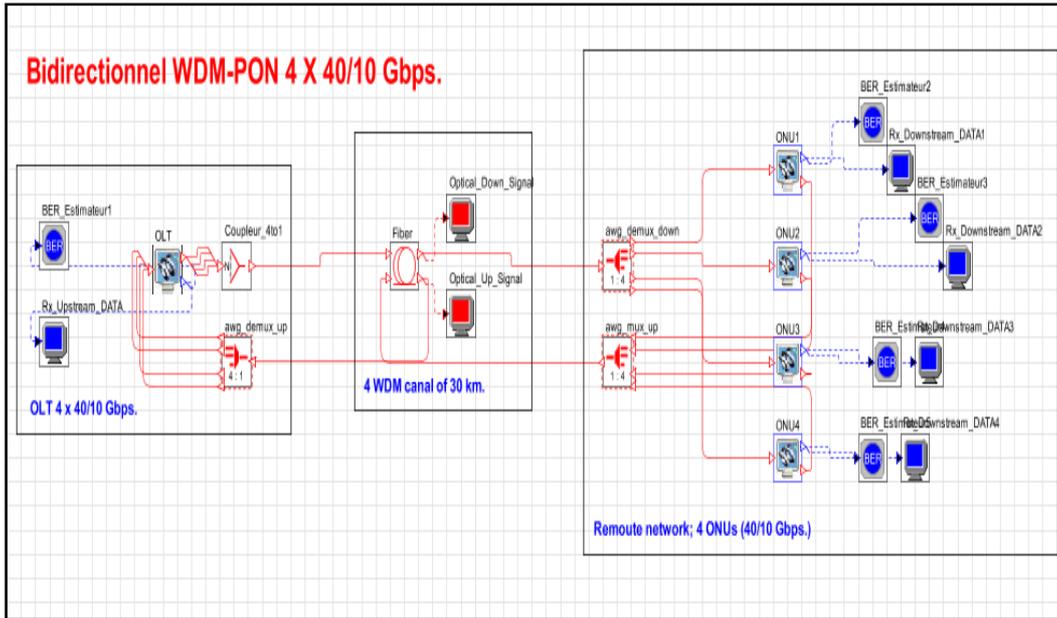


Fig. 1. Architecture of the simulated system.

Figure 1 presents the general structure of the simulated system, including the Optical Line Terminal (OLT: Center Office) which communicates with four ONUs (End User) via a bidirectional optical fiber of 30 km. The type of the fiber is a G.652 standard single-mode fiber (SMF) (16.5 ps/nmkm chromatic dispersion, 0.20 dB/km attenuation, polarization dispersion coefficient <0.2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$). The total link loss was measured at 25 dB.

The four WDM channels employed were separated by 100 GHz (0.8 nm), at standard International Telecommunication Union (ITU) wavelengths, denoted by $\lambda_1=1549.2$ nm through $\lambda_4 = 1551.6$ nm. The downlink signal generated by the OLT is multiplexed by a WDM multiplexer before being passed through the optical fiber. The AWG (Arrayed Waveguide Grating) located at the other side of the fiber ensures demultiplexing channels to the ONUs, the uplink data are re-modulated by the downlink optical carrier in the ONU and will be retransmitted to the OLT.

Note that the effect of the chromatic dispersion is not simulated because its compensation is controlled perfectly by several methods dedicated to that. All nonlinear effects are taken into account in this study. The effects of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in bidirectional fiber are also considered.

B. Description of NRZ-DQPSK/ASK link

The NRZ-DQPSK transmitter is composed of a CW (Continuous Wave) laser source that works at $\lambda_i \in [1549.2, 1552.4]$ nm with an output power $P_0 = 0$ dBm. The data is generated by a pseudo-random generator of 512 bits of length at a rate of 40 Gbps. After differential pre-coding, the data is modulated optically through two parallel Mach-Zehnder

modulators MZM; for more details see [11]. After transmission and wavelength de-multiplexing, the NRZ-DQPSK signals are demodulated using a one-symbol delay Mach-Zehnder interferometer (MZI) and detected by a pair of balanced photo-detectors (BPDs). The ONU transmitter uses the re-modulation DQPSK/ASK, by recovering part of the optical signal polarized vertically. Then, it is used to modulate the upstream data by an MZM. In order to evaluate the system's quality, the BER is measured at the reception of each direction (ONU and OLT) by varying the optical power of the additive noise.

III. DISCUSSION OF RESULTS

In this section, we present the simulation results of the studied network. Figure 2 shows the curve of BER versus the OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) measured at the receiver of NRZ-ASK/ASK system. Note that when increasing the OSNR the system's quality becomes important; this is very remarkable by the decrease of BER. In addition to this, for a BER of 10^{-9} , we observed that the system almost has not undergone degradations when we simulated the Rayleigh and Brillouin scattering for all channels, except for channel 3 where we noticed a penalty of 1 dB compared to back to back.

Figure 3 shows the BER performance with varied OSNR for the NRZ-DQPSK/ASK system. The influence of Rayleigh and Brillouin scattering is transparent to the system, except for channel 2 where we measured a penalty of 1 dB compared to back to back at BER = 10^{-9} . Comparing the two figures, it can be noticed that the 2nd system represents a gain of 0.5 dB, which promotes the use of the DQPSK modulation in high speed WDM-PON systems.

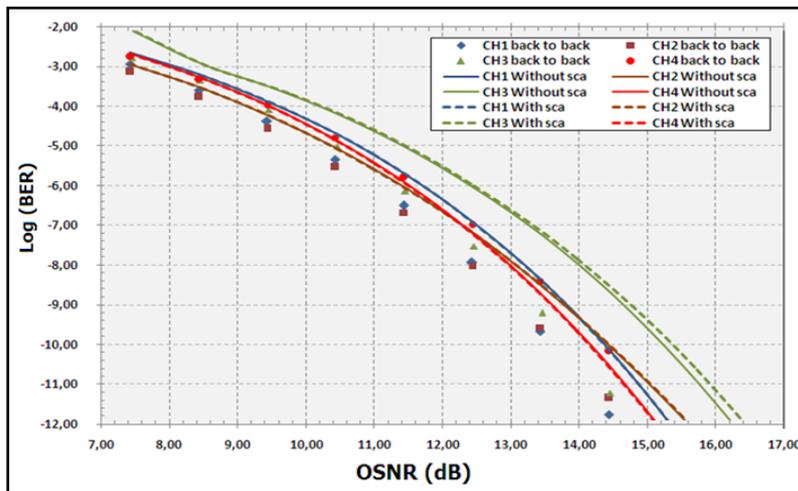


Fig. 2. BER vs OSNR for NRZ-ASK system.

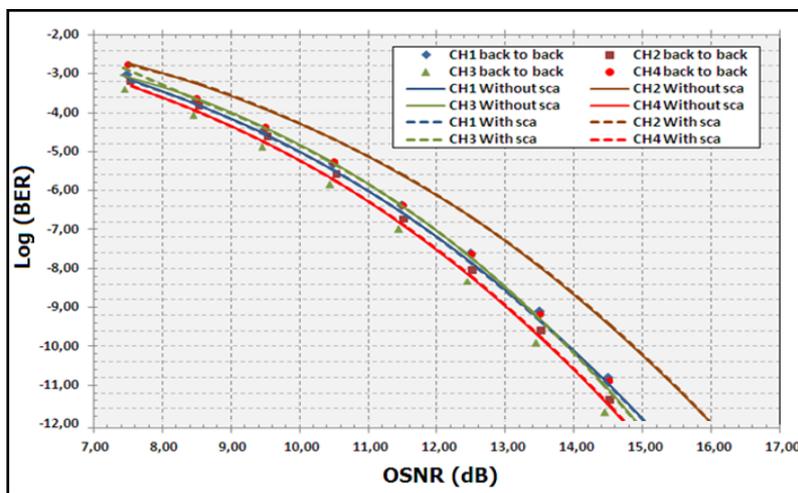


Fig.3. BER vs OSNR for NRZ-DQPSK system.

IV. CONCLUSION

In this work we made a comparison between two high speed WDM-PON systems with four channels using two different formats of modulation (NRZ-ASK/ASK and NRZ-DQPSK/ASK) for a distance of 30 km at a rate of 160/40 Gbps. The results show the advantage to use DQPSK modulation in such networks. The deployment of direct re-modulation uplink data on the downlink optical carrier avoids using a new laser at the client side. This architecture may be viewed as a highly attractive candidate for the next generation optical access networks. This work was carried out at the Laboratory of Optoelectronics in the National Institute of Telecommunications and Information Technologies and Communication of Oran, ALGERIA.

REFERENCES

[1] Lynn Hutcheson, Ovum « FTTx: Current Status and the Future », IEEE Communications Magazine, www.comsoc.org, July 2008.
 [2] ITU-T G.984. <<http://www.itu.int>>.
 [3] IEEE 802.3. <<http://www.iee.org>>.

[4] K. Grobe, J.-P. Elbers, « PON in adolescence: From TDMA to WDM-PON », Communications Magazine, 46 (1) (2008) 26–34.
 [5] G.-K. Chang, A. Chowdhury, Z. Jia, H.-C. Chien, M.-F. Huang, J. Yu, et G. Ellinas, “Key Technologies of WDM-PON for Future Converged Optical Broadband Access Networks”, J. Opt. Commun. Netw., vol. 1, no. 4, p. C35-C50 2009.
 [6] R.S. Vodhanel, A.F. Elrefaie, M.Z. Igbal, R.E. Wagner, J.L. Gimlett, S. Tsuji, “Performance of directly modulated DFB laser in 10Gb/s ASK, FSK and DPSK lightwave systems,” Lightwave Technology, Journal of, vol. 8, pp 1379-1385, 1990.
 [7] W. Hung, & al., “An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream re-modulated OOK data using injection-locked FP laser”, PTL, 15, pp. 1476-1478 (2003).
 [8] N. Deng, & al., “A novel wavelength modulated transmitter and its application in WDM-PON”, OFC, MF79, (2004).
 [9] G. Lu, & al., “Use of downstream IRZ signal for upstream data re-modulation in a WDM passive optical network”, OFC, OFI8 (2005).
 [10] Y. Tian, & al., “Optical VPN in PON based on DPSK erasing/rewriting and DPSK/IM formatting using a single Mach-Zehnder modulator”, ECOC, Tu4.5.6 (2006).
 [11] A. CHENIKA, & al., “A Novel architecture of an optical high-speed access network WDM-PON using NRZ-DQPSK/ASK modulation”, ICNCRE’13, ISBN: 978-81-925233-8-5, vol. 1, pp 396-398, Algeria, 2013.

A Novel architecture of an optical high-speed access network WDM-PON using NRZ-DQPSK/ASK modulation.

A.CHENIKA¹, A.TEMMAR²
Laboratory of Applied Research in TIC,
INT&TIC,
Oran, ALGERIA.

¹achenika@ito.dz; ²a_temmar@hotmail.com.

O.SEDDIKI

Department of Electrical Engineering,
Abu-Bakr Belkaïd University,
Tlemcen, ALGERIA.
omar_seddiki@yahoo.fr.

Abstract—The work presented in this paper treats the feasibility to transmit 40 Gbps data both in the Downlink direction (OLT-ONU) and 10Gbps in the Uplink direction (ONU-OLT) using an optical access network WDM-PON of a 30 km standard single-mode fiber (SSMF-28). The proposed method is based on the comparison between two systems with the same characteristics, using two different format of modulation in OLTs. In the first system, we used the NRZ-ASK modulation in the downlink and the re-modulation NRZ-ASK/ASK in the uplink, while in the second; we used the NRZ-DQPSK in the downstream transmission and re-modulation NRZ- DQPSK/ASK in the opposite direction.

Keywords: *Single-mode fiber (SMF), Passive Optical Network (PON), Wavelength Division Multiplexing (WDM), No Return-to-Zero (NRZ), Amplitude Shift Keying (ASK), Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK), Differential Detection, Bidirectional fiber.*

I. INTRODUCTION

The use of the optical fiber in access networks constitutes a major advance in order to satisfy the ever increasing demand for higher throughput among users. Currently, the passive optical networks can offer high speed broadband at speeds of up to 100Mbps for customers and provide advanced voice and multimedia services simultaneously [1]. It exploits two different wavelengths for both downloading and uploading.

The Wavelength Multiplexing Division (WDM) technology appears gradually in optical communication systems and seems to be a technique adopted in the medium term. This is because it has great potential to enhance system design and flexibility. The association of the two technologies WDM and PON, seems inevitable to accompany the increase flow at the subscriber [2]. WDM-PON is a promising technology for future broadband access network, since it can offer advantages including high capacity, large coverage range, upgradeability and cost-effective configuration [3].

In order to increase the data rates in the optical links, a number of advanced modulation formats were adopted for their effectiveness and their capacity to fight against the effects of chromatic dispersions (DC), polarization mode dispersions (PMD) and the nonlinear effects [4].

In optical access network, several orthogonal modulation formats have been deployed in the downlink and uplink transmission, such as the DPSK (Differential Phase Keying Shift) in downstream and OOK (One-Off keying) in upstream, the FSK (Frequency Shift Keying) in down direction and ASK (Amplitude Shift Keying) in the opposite direction, thus the use of DPSK in both directions [5-8]. Moreover, the use of

DQPSK in downstream and ASK in upstream is an alternative solution which makes possible to reduce the implementation cost, the maintenance complexity and power consumption [9]. Recently, the optical re-modulation scheme is proposed to achieve high speed centralized light source where we use only one source of light in order to reduce the cost of the customer transmitter [10].

In this document, our work consists of proposing a new architecture of a WDM-PON system which transmits 40 Gb/s of data through 30 km of SSMF using NRZ-DQPSK modulation in downlink and 10 Gb/s of data using the re-modulation DQPSK/ASK in uplink. In order to assess our system, we compare it with another WDM-PON system having the same characteristics but use the ASK/ASK modulation. Let us note that simulations are made by OptSim 4.7 tools. In deferent simulations we have considered the effects of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in bidirectional fiber.

II. DESCRIPTION OF SIMULATIONS

We present below some results of simulation modeling an optical access network WDM-PON supported with Optsim (simulator of the optical systems) to test the feasibility of the network structure and the improvement brought by using DQPSK modulation in downlink and Re-modulation DQPSK/ASK in uplink. Indeed, the work carried out in this paper allows to make a comparison between two WDM-PON with the same characteristics, the difference is located in the type of modulation used on downstream of systems, where the first uses the traditional modulation NRZ-ASK and the second uses NRZ-DQPSK.

Figure 1 presents the general structure of the simulated system, including Optical Line Terminal (OLT) and the Optical Network Unit (ONU), connected between them by a standard bidirectional fiber (SMF-28) with 30 km of length. The downstream signal is generated at OLT, sent through optical fiber at ONU which represents customer side, and re-modulated to the ASK format to load the upstream data which is received at OLT. In our simulations, the attenuation coefficient in fiber is 0.2 dB/km, the effect of the chromatic dispersion is not simulated because its compensation is controlled perfectly by several methods dedicated to that. All nonlinear effects are taken into account in this study. It is also considered the effects of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in bidirectional fiber.

The 40 Gb/s NRZ-DQPSK transmitter is composed of a CW laser source works at 1550 nm with output power $P_o = 0$ dBm. The data is generated by a pseudo-random generator of 512 bits of length. After differential pre-coding the data are

modulated optically through two parallel Mach-Zehnder modulators MZM. Each of the two modulators must function at its null polarization mode [11], one of the two modulators is followed by a phase modulator PM in order to create a dephasing of $\pi/2$ between the two beams of light [12].

The downstream signal is received by ONU and demodulated by a differential detector using two MZDI (Mach-Zehnder Dual-arm Interferometer) each followed by two photodiodes [13]. Each MZDI has a delay of 50 ps (2Tb) as the symbol rate of DQPSK is 20GSym / s.

The ONU transmitter uses the re-modulation DQPSK/ASK, by recovering part of the optical signal to modulate the upstream data by an MZM.

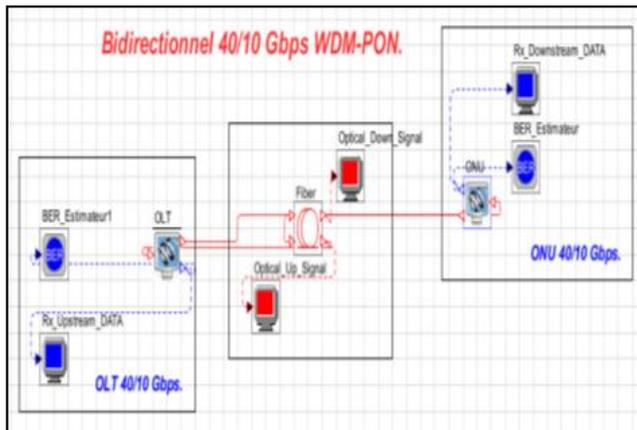


Figure 1. Architecture of the simulated system.

III. DISCUSSION OF RESULTS

Figure 2 shows the curve of BER vs. the OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) measured at the receiver of ASK / ASK system. It is clear that when the noise level increases the performance of the system is mediocre, the signal is submerged in the noise and therefore the decision is difficult because the signal is modulated in amplitude and the noise acts on the amplitude therefore the level detection signal becomes difficult. The Degradation system when we simulate the Rayleigh and Brillouin scattering is almost zero in the downlink, but we measure a penalty of 0.5 dB in the uplink.

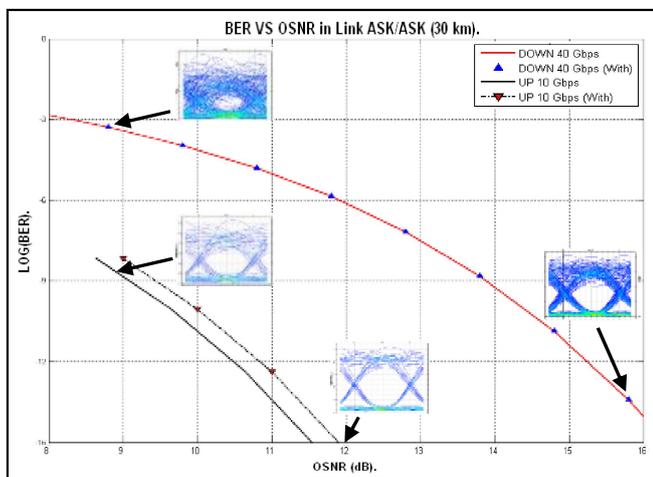


Figure 2. BER vs OSNR for NRZ-ASK system.

Figure 3 shows the BER performance with varied OSNR for down/upstream transmission with Rayleigh and Brillouin scattering in DQPSK/ASK system. The influence of Rayleigh and Brillouin scattering is transparent to the system; this is due to the non-variation of the optical power in the downlink signal that affects the uplink signal.

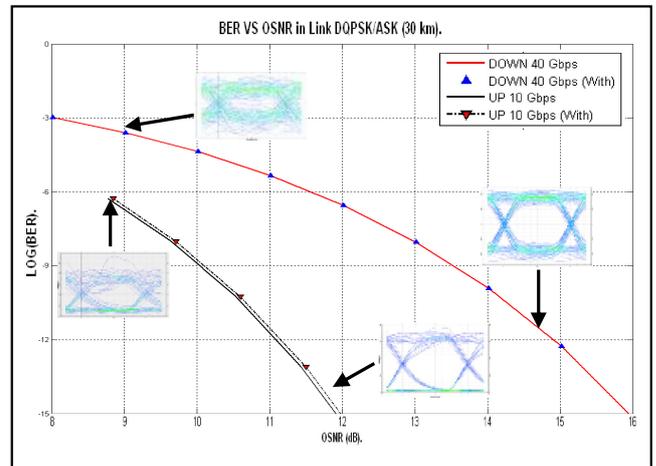


Figure 3. BER vs OSNR for NRZ-DQPSK system.

Comparing the two figures, it can be noticed that the 2nd system exhibits a gain of 0.5 dB in downstream which promotes the use of the DQPSK modulation in high speed WDM-PON systems.

IV. CONCLUSION

In this work we made a comparison between two high speed WDM-PON systems using two deferent formats of modulations (NRZ-ASK/ASK and NRZ-DQPSK/ASK). The transmission distance is 30km at a bit rate of 40 Gb/s for downstream transmission. For upstream transmission, the ONU directly modulates its information on the received optical carrier without using another wavelength.

This architecture may be viewed as a highly attractive candidate for the next generation optical access networks. This work was carried out at the Laboratory of Optoelectronics in the National Institute of Telecommunications and Information Technologies and Communication of Oran, ALGERIA.

REFERENCES

- [1] S-J.Park, C-H.Lee, K-T.Jeong, H-J.Park, J-G.Ahn, et K-H.Song, "Fiber-to-the-Home Services Based on WDM-PON", J. LightwaveTectmol., vol. 22, no. 11, P. 2582-2591, 2004.
- [2] G-K.Chang, A.Chowdhury, Z.Jia, H-C.Chien, M-F.Huang, J.Yu, etG.Ellinas, "Key Technologies of WDM-PON for Future Converged Optical Broadband Access Networks", J. Opt. Commun. Netw., vol. 1, no. 4, p. C35-C50 2009.
- [3] X.Liu, Y.Shao, C.Hou, X.Zheng, X.Li, S.Zou et N.Chi, A novel WDM-PON structure using the orthogonal FSK/ ASK remodulation scheme, Proc. Of SPIE-OSA-IEEE, Asia Communications and Photonics, SPIE Vol. 7633, 2009.
- [4] R.S. Vodhanel, A.F.Elrefaie, M.Z.Igbal, R.E.Wagner, J.L.Gimlett, S.Tsuji, "Performance of directly modulated DFB laser in 10Gb/s ASK, FSK and DPSK lightwave systems," Lightwave Techno-logy, Journal of, vol. 8,pp 1379-1385,1990.
- [5] W. Hung, C. K. Chan, L. K. Chen, and F. Tong, "An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream re-modulated OOK data using injection-locked FP laser", PTL, 15, pp. 1476-1478 (2003).

- [6] N. Deng, W. Hung, C. Chan, L. Chen, F. Tong, "A novel wavelength modulated transmitter and its application in WDM-PON", OFC, MF79, (2004).
- [7] G. Lu, N. Deng, C. K Chan, L. K Chen, "Use of downstream IRZ signal for upstream data re-modulation in a WDM passive optical network", OFC, OF18 (2005).
- [8] Y. Tian, L. Yi, X. Tian, H. He, X. Xu, Y. Su, L. Leng, "Optical VPN in PON based on DPSK erasing/rewriting and DPSK/IM formatting using a single Mach-Zehnder modulator", ECOC, Tu4.5.6 (2006).
- [9] J. Zhao, L. K Chen, C. K Chan, "A Novel Re-modulation Scheme to Achieve Colorless High-Speed WDM PON with Enhanced Tolerance to Chromatic Dispersion and Re-modulation Misalignment", OFC, OWD2 (2005).
- [10] An Vu Tran, Chang-JoonChae; Tucker R.S, "Ethernet PON or WDM PON: A Comparison of Cost and Reliability", TENCON 2005.
- [11] RSoft Design Group, "OptSim Models Reference: Volume I Sample Mode", www.rsoftdesign.com, 2007.
- [12] A. H. Gnauck, P. J. Winzer, "Optical Phase Shift Keyed Transmission", J. of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 1, Jan 2005.
- [13] Jay (Y.C.) Hsieh, "A Thermal Demodulator for 42.7 Gb/s NRZ-DPSK Signal" ECOC'05 paper (2005).

Transmission of 160/40 Gbps in a WDM-PON using NRZ-DQPSK/ASK modulation.

Abdelfettah CHENIKA¹ Abdelkader TEMMAR² Omar SEDDIKI³

Laboratory of Applied Research in TIC (La RATIC),INTTIC, Oran (ALGERIA).

¹achenika@ito.dz; ²a_temmar@hotmail.com.

Laboratory of Telecommunications, Abu-Bakr Belkaïd University, Tlemcen, (ALGERIA).

³omar_seddiki@yahoo.fr.

Abstract: In this paper we demonstrate the feasibility to deploy a wavelength division multiplexing passive optical network (WDM-PON) of a 30 km standard single-mode fiber (SSMF-28) carrying 160 Gbps data in downstream and 40 Gbps through the uplink. The developed method is based on the comparison between two WDM-PON systems of 4 channels with the same characteristics, using two different formats of modulation in OLTs. The first system uses the NRZ-ASK in the downlink direction, while the second uses the NRZ-DQPSK.

Keywords: Single-mode fiber (SMF), Passive Optical Network (PON), Optical Line Terminal (OLT), Optical Network Unit (ONU), Wavelength Division Multiplexing (WDM), No Return-to-Zero (NRZ), Amplitude Shift Keying (ASK), Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK), Differential Detection, Bidirectional fiber.

1 Introduction

Today, FTTH (Fiber-To-The Home) systems are being deployed to increase bandwidth and provide more services to users [1]. Systems installed by many operators use a passive optical network architecture (Passive Optical Network PON) and are based on the IEEE EPON (Ethernet PON) or ITU GPON (Gigabit PON), with downstream speeds of 1.25 Gbit/s and 2.5 Gbit/s, respectively [2,3]. These technologies are based on time division multiplexing (TDM) of user's data, and provide less than 100 Mbps per single user. Currently the wavelength division multiplexing (WDM) based standards are being introduced in access networks to enable higher bandwidth capacity per user [4-5].

In a WDM PON configuration, each ONU (Optical Network Unit) receives the throughput supported by the wavelength assigned to it. Thus, we can imagine that the different optical carriers can be modulated by electrical signals at different rates depending on services requested by users: this is the concept of multi service / multi-speed. We can thus create optical subnets on a single optical fiber infrastructure. The WDM PON network must therefore be flexible, scalable in bandwidth and number of users and economically conceivable.

In order to increase data rates in the optical links, a number of advanced modulation formats were adopted for their effectiveness and their capacity to fight against the effects of chromatic dispersions (CD), polarization mode dispersions (PMD) and nonlinear effects [6].

In optical access networks, several orthogonal modulation formats have been deployed in the downlink and uplink transmission, such as the DPSK (Differential Phase Keying Shift) in downstream and OOK (One-Off keying) in upstream, the FSK (Frequency Shift Keying) in down direction and ASK (Amplitude Shift Keying) in the opposite direction, thus the use of DPSK in both directions [7-10].

The author of the article [11] showed the feasibility to transmit 40/10 Gbps of data in a WDM-PON of 30 km of length using the NRZ-DQPSK modulation in downlink and the re-modulation DQPSK/ASK in uplink.

In this document, our work consists to test the architecture proposed in [11] and make a study of a link constituted of four channels transmitting 160/40 Gbps of data through 30 km of single mode fiber SMF. In order to assess our system, we compared it with another WDM-PON system having the same characteristics but using the ASK/ASK modulation. Let us note that simulations are made by OptiSystem 12.0 tools. In deferent simulations we have considered the effects of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in bidirectional fiber.

2 Description of simulations

2.1 Network architecture

We propose below the architecture of a passive optical network WDM-PON which provides high bandwidth per user and supports multiple channels. Indeed, the work carried out in this paper allows to make a comparison between two WDM-PON with the same characteristics, the difference is located in the type of modulation used on downstream of systems, where the first uses the traditional modulation NRZ-ASK and the second uses NRZ-DQPSK.

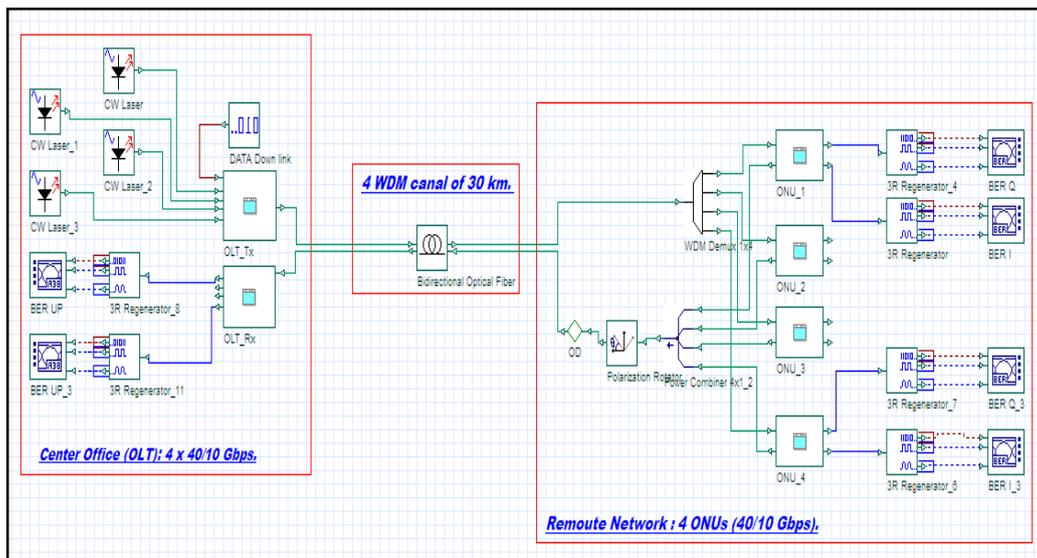


Figure 1

Architecture of the simulated system.

Figure 1 presents the general structure of the simulated system, including the Optical Line Terminal (CO: Center Office) which communicates with four ONUs (End User) via a bidirectional optical fiber of 30 km. The type of the fiber is a G.652 standard single-mode fiber (SMF) (16.5 ps/nmkm chromatic dispersion, 0.20 dB/km attenuation, polarization dispersion coefficient <0.2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$). The total link loss was measured at 25 dB.

The four WDM channels employed were separated by 100 GHz (0.8 nm), at standard International Telecommunication Union (ITU) wavelengths, denoted by $\lambda_1=1549.2$ nm through $\lambda_4 = 1552.4$ nm. The downlink signal generated by the OLT is multiplexed by a WDM multiplexer before being passed through the optical fiber. The AWG (Arrayed Waveguide Grating) located at the other side of the fiber ensures demultiplexing channels to the ONUs, the uplink data are re-modulated by the downlink optical carrier in the ONU and will be retransmitted to the OLT.

Note that the effect of the chromatic dispersion is not simulated because its compensation is controlled perfectly by several methods dedicated to that. All nonlinear effects are taken into account in this study. The effects of the Rayleigh and Brillouin backscattering presented in bidirectional fiber are also considered.

2.2 Description of NRZ-DQPSK/ASK link

The NRZ-DQPSK transmitter is composed of a CW (Continuous Wave) laser source that works at $\lambda_i \in [1549.2, 1552.4]$ with an output power $P_o = 0$ dBm. The data is generated by a pseudo-random generator of 512 bits of length at a rate of 40 Gbps. After differential pre-coding, the data is modulated optically through two parallel Mach-Zehnder modulators MZM; for more details see [11]. After transmission and wavelength demultiplexing, the NRZ-DQPSK signals are demodulated using a one-symbol delay Mach-Zehnder interferometer (MZI) and detected by a pair of balanced photo-detectors (BPDs). The ONU transmitter uses the re-modulation DQPSK/ASK, by recovering part of the optical signal polarized vertically. Then, it is used to modulate the upstream data by an MZM. In order to evaluate the system's quality, the BER is measured at the reception of each direction (ONU and OLT) by varying the optical power of the additive noise.

3 Discussion of results

In this section, we present the simulation results of the studied network. Figure 2 shows the curve of BER versus the OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) measured at the receiver of NRZ-ASK/ASK system. Note that when increasing the OSNR the system's quality becomes important; this is very remarkable by the decrease of BER. In addition to this, for a BER of 10^{-9} , we observed that the system almost has not undergone degradations when we simulated the Rayleigh and Brillouin scattering for all channels, except for channel 3 where we noticed a penalty of 1 dB compared to back to back.

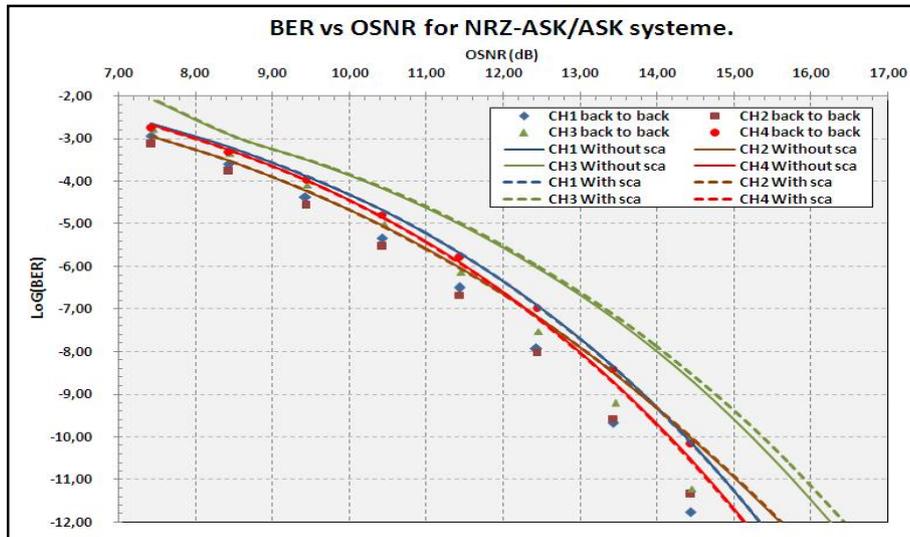


Figure 2

BER vs OSNR for NRZ-ASK system.

Figure 3 shows the BER performance with varied OSNR for the NRZ-DQPSK/ASK system. The influence of Rayleigh and Brillouin scattering is transparent to the system, except for channel 2 where we measured a penalty of 1 dB compared to back to back at $\text{BER} = 10^{-9}$. Comparing the two figures, it can be noticed that the 2nd system represents a gain of 0.5 dB, which promotes the use of the DQPSK modulation in high speed WDM-PON systems.

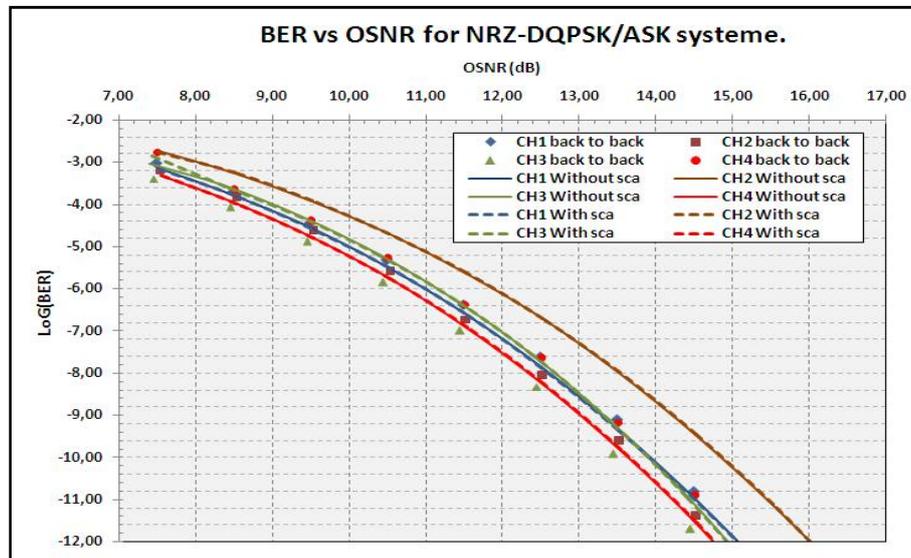


Figure 3

BER vs OSNR for NRZ-DQPSK system.

Conclusion

In this work we made a comparison between two high speed WDM-PON systems with four channels using two different formats of modulation (NRZ-ASK/ASK and NRZ-DQPSK/ASK) for a distance of 30 km at a rate of 160/40 Gbps. The results show the advantage to use DQPSK modulation in such networks. The deployment of direct re-modulation uplink data on the downlink optical carrier avoids using a new laser at the client side. This architecture may be viewed as a highly attractive candidate for the next generation optical access networks. This work was carried out at the Laboratory of Optoelectronics in the National Institute of Telecommunications and Information Technologies and Communication of Oran, ALGERIA.

References

- [1] Lynn Hutcheson, Ovum «FTTx: Current Status and the Future», IEEE Communications Magazine, www.comsoc.org, July 2008.
- [2] ITU-T G.984. <<http://www.itu.int>>.
- [3] IEEE 802.3. <<http://www.ieee.org>>.
- [4] K. Grobe, J.-P. Elbers, «PON in adolescence: From TDMA to WDM-PON», Communications Magazine. 46 (1) 2008, 26–34.
- [5] G.-K. Chang, A. Chowdhury, Z. Jia, H.-C. Chien, M.-F. Huang, J. Yu, et G. Ellinas, “Key Technologies of WDM-PON for Future Converged Optical Broadband Access Networks”, J. Opt. Commun. Netw., vol. 1, no. 4, 2009, pp. C35-C50.
- [6] R. S. Vodhanel, A. F. Elrefaie, M. Z. Iqbal, R. E. Wagner, J. L. Gimlett, S. Tsuji, “Performance of directly modulated DFB laser in 10Gb/s ASK, FSK and DPSK lightwave systems,” Lightwave Technology, Journal of, vol. 8, 1990, pp 1379-1385.
- [7] W. Hung, & al., “An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream re-modulated OOK data using injection-locked FP laser”, PTL, 15, (2003), pp. 1476-1478.
- [8] N. Deng, & al., “A novel wavelength modulated transmitter and its application in WDM-PON”, OFC, MF79, (2004).

- [9] G. Lu, & al., "Use of downstream IRZ signal for upstream data re-modulation in a WDM passive optical network", OFC, OFI8 (2005).
 - [10] Y. Tian, & al., "Optical VPN in PON based on DPSK erasing/rewriting and DPSK/IM formatting using a single Mach-Zehnder modulator", ECOC, Tu4.5.6 (2006).
 - [11] A.CHENIKA, & al, "A Novel architecture of an optical high-speed access network WDM-PON using NRZ-DQPSK/ASK modulation", ICNCRE'13, ISBN: 978-81-925233-8-5,vol, 1, Algeria, 2013, pp 396-398.
-

Nouvelle architecture du réseau d'accès haut débit WDM-PON, utilisant la modulation NRZ-DQPSK/ASK.

CHENIKA Abdelfettah, TEMMAR Abdelkader, OUALD SAADI Hocine, BOUTALEB Abdelmadjid.
achenika@ito.dz; a_temmar@hotmail.com; oshocine@yahoo.fr; boutaleb_abdelmadjid@yahoo.fr.

Laboratoire de Recherche Appliquée en TIC (*LaRATIC*); INTTIC, Oran (ALGERIE).

Résumé — Le travail présenté dans cet article traite la faisabilité à transmettre 40 Gbps de données dans le downlink (OLT-ONU) et 10Gbps dans le Uplink (ONU-OLT) à travers un réseau d'accès optique WDM-PON de 30 km de fibre mono mode (SMF-28). La méthode développée repose sur la comparaison de deux systèmes de mêmes caractéristiques, mais la différence est dans le format de modulation utilisée dans les OLTs. Dans la première liaison étudiée, on utilise le NRZ-ASK pour le sens descendant et la re-modulation NRZ-ASK/ASK dans le sens montant, tandis que dans la deuxième, on utilise le NRZ-DQPSK pour le sens descendant et la re-modulation NRZ- DQPSK/ASK dans le sens inverse.

Mots clefs — Fibre optique mono mode (SMF), Réseau Optique Passif (PON), Systèmes de transmission multiplexés en longueur d'onde (WDM), Nonreturn-to-zero (NRZ), Amplitude Shift Keying (ASK), Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK), Détection différentielle, Fibre bidirectionnelle.

I. INTRODUCTION

L'introduction de la fibre optique dans les réseaux d'accès constitue une avancée majeure pour satisfaire la demande croissante en débit d'information des abonnés. Les réseaux d'accès optiques passifs (PON: Passif Optical Network) permettent actuellement de fournir un débit de 100 Mbps par utilisateur et de recevoir plusieurs services simultanément [1]. Ils mettent en œuvre une longueur d'onde pour la voie descendante et une autre longueur d'onde pour la voie montante. La technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) apparaît progressivement dans les réseaux d'accès optiques et semble être une technique adoptée à moyen terme même si d'autres techniques tels l'OCDMA (Optical Code Division Multiple Access) pourraient voir le jour à plus long terme [2]. L'association des deux technologies, WDM et PON semble donc inévitable pour accompagner l'augmentation du débit chez l'abonné [3].

Dans une configuration PON WDM, chaque ONU (Optical Network Unit) reçoit le débit supporté par la longueur d'onde qui lui est attribuée. Ainsi, on peut imaginer que les différentes porteuses optiques peuvent être modulées par des signaux électriques avec des débits différents suivant les services demandés par les utilisateurs: c'est le concept de multiservice/multi-débit. Lors du déploiement de réseaux PON WDM, des ensembles de longueurs d'onde pourront être utilisés pour transmettre des offres de services spécifiques et on pourra ainsi créer des sous-réseaux optiques dans une

infrastructure à fibre optique unique. Un réseau PON WDM doit être donc flexible, évolutif en bande passante et en nombre d'utilisateurs et être économiquement concevable.

Dans le but d'augmenter les débits dans les liaisons optiques, un certain nombre de formats de modulation avancés ont été adoptés pour leur efficacité et leur pouvoir de lutter contre les effets des dispersions chromatiques (DC), de polarisation (PMD) et des effets non linéaires [4]. Plusieurs formats de modulations orthogonaux ont été déployés dans les transmissions montantes et descendantes des réseaux d'accès, tel que la DPSK (Differential Phase Shift Keying) dans le downstream et la modulation OOK (On-Off keying) dans le upstream, la FSK (Frequency Shift Keying) dans le sens descendant et l'ASK dans le sens montant, ainsi l'utilisation de DPSK dans les deux sens [5-8].

En outre, l'utilisation de la DQPSK (Differential quadrature phase-shift keying) dans le down-stream et l'ASK (amplitude shift keying) dans le upstream est une solution alternative qui permet de réduire le coût d'implémentation, la complexité d'entretien et la puissance d'énergie d'émission [9].

Récemment, la re-modulation a été proposée pour réaliser la centralisation de porteuse optique, où on utilise une seule source lumineuse afin de réduire le coût de l'émetteur chez le client [10]. Notre travail consiste donc à proposer une architecture d'un système WDM-PON qui transmet à travers une fibre monomode SMF de 30 km des données de 40 Gbps utilisant la modulation NRZ-DQPSK en downlink et la re-modulation DQPSK/ASK de 10 Gbps en uplink. Afin d'évaluer notre système, nous le comparons à un autre système WDM-PON de mêmes caractéristiques utilisant la modulation ASK/ASK. Notons que les simulations sont faites par l'outil OptSim 4.7 en prenant compte des effets des dispersions de Rayleigh et de Brillouin présentées dans la fibre bidirectionnel.

II. NOUVEAUX FORMATS DE MODULATION OPTIQUE: THEORIE ET IMPLEMENTATION.

La demande croissante qui ne cesse d'augmenter en grande capacité pour les systèmes de télécommunication optique, fait appel à l'évolution de 10 Gbps vers le 40 Gbps ou plus, tout en maintenant la qualité de signal. Les systèmes de télécommunication optique ont principalement employé la modulation OOK (On/Off Keying) à savoir le NRZ ou le RZ. À mesure que les

débits augmentent, l'inefficacité de ces formats de modulation du point de vue largeur spectrale devient plus évidente. Avec des débits dépassant les 40 Gbps, la DC dans la fibre limite la portée du système. D'autres effets tels que la PMD deviennent significatifs à 40 Gbps. Parmi les formats utilisés dans les transmissions optiques et qui présentent une efficacité spectrale, on cite la modulation duobinaire et la QPSK. La largeur de bande théorique exigée pour transmettre un signal de R symboles/sec sans ISI (Interférence Inter de Symbole) est R/2 Hz [11].

La modulation duobinaire diminue la largeur de bande du signal transmis à une valeur inférieure de cette limite en présentant un certain ISI. Cependant, le taux de transmission est 1 bit par symbole et donc le débit symbolique égale le débit binaire. La QPSK est plus efficace, parce qu'elle transmet 2 bits par symbole et par conséquent le taux de symbole est la moitié du débit binaire et la largeur de bande théorique exigée est 1/4 du débit binaire (Fig 1).

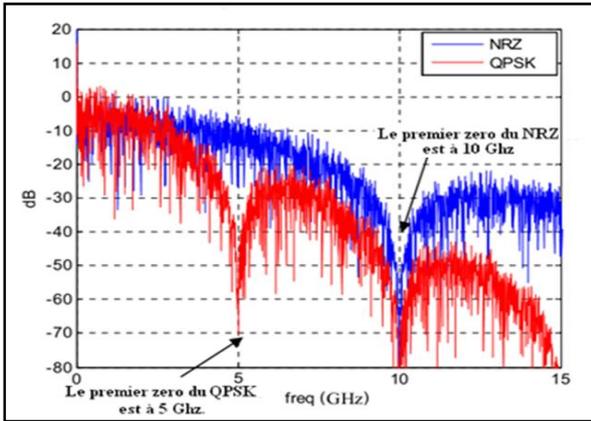


Fig 1: Présentation spectrale des signaux NRZ et DQPSK pour un débit de 10 Gbps.

A. La modulation QPSK

Dans la QPSK, l'information est codée dans la phase de la porteuse optique et l'amplitude du signal demeure constante. Un signal QPSK peut être représenté comme suit :

$$x(t) = \cos(2\pi f_c t + \theta(k)) \tag{1}$$

Avec $kT \leq t \leq (k+1)T$
et

$$\theta(t) = \begin{cases} \pi/4 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,0) \\ 3\pi/4 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,0) \\ 5\pi/4 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,1) \\ 7\pi/4 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,1) \end{cases} \tag{2}$$

f_c est la fréquence porteuse, $\theta(t)$ est la phase dans l'intervalle de temps $[kT, (k+1)T]$, et $(I(k), Q(k))$ est le $k^{ème}$ symbole à transmettre. La valeur T_b est le temps d'un bit et donc $T = 2T_b$ est la période de symbole.

Cette constellation de symboles (Fig 2) est produite en utilisant un modulateur MZ. Ce dernier est constitué de deux modulateurs MZM en parallèle. Le deuxième modulateur est suivi d'un modulateur optique PM

pour créer un déphasage de $\pi/2$ entre les deux faisceaux lumineux (Fig 3b) [12].

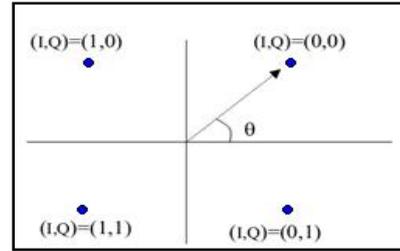


Fig 2: La constellation de la modulation QPSK.

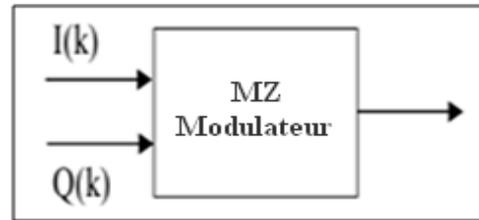


Fig 3.a: Schéma bloc du transmetteur QPSK optique .

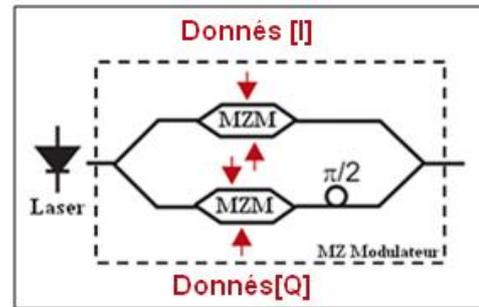


Fig 3.b: Architecture du modulateur optique QPSK.

À la réception, en observant la phase, le récepteur peut déterminer le symbole qui a été transmis. Cependant, un oscillateur local dont la fréquence et la phase sont assorties à la fréquence et à la phase du signal reçu est exigé.

$$\hat{\theta}(k) = x(t)\cos(2\pi f'_c t + \phi) \tag{3}$$

$$\hat{\theta}(k) = \cos((f_c - f'_c)t + \theta(k) - \phi) \tag{4}$$

Ici, $\hat{\theta}(k)$ est la phase estimée par le récepteur, f'_c est la fréquence de l'oscillateur local et ϕ sa phase. Par conséquent, pour avoir une évaluation exacte de la phase transmise, la fréquence de l'oscillateur local doit être égale à la fréquence de la porteuse $f_c = f'_c$, et la phase de l'oscillateur local $\phi = 0$. Cette synchronisation est difficile à réaliser aux fréquences optiques, pour cela la DQPSK est une solution pour dépasser ce problème.

B. La modulation DQPSK:

La DQPSK fournit une alternative prometteuse à la QPSK puisqu'elle transmet 2 bits/Symbole et présente une complexité réduite du système comparé à un système de QPSK. En plus, elle est tolérante à la dispersion chromatique (CD), dispersion modale de polarisation (PMD), et a une efficacité spectrale élevée.

Dans la DQPSK, on code le changement de phase d'une période à l'autre et non la valeur de la phase. Dans ce cas, le récepteur doit détecter des changements de phase et pas les valeurs absolues de phases, ce qui permet d'éviter la synchronisation au récepteur. Le signal transmis est comme suite :

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta(k)) \quad (5)$$

avec $kT \leq t \leq (k+1)T$
 et

$$\theta(k) - \theta(k-1) = \begin{cases} \pi & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,0) \\ 3\pi/2 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,0) \\ 0 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,1) \\ \pi/2 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,1) \end{cases} \quad (6)$$

La figure 4 montre la constellation d'un signal DQPSK où on présente le changement de phase et non pas la phase elle-même.

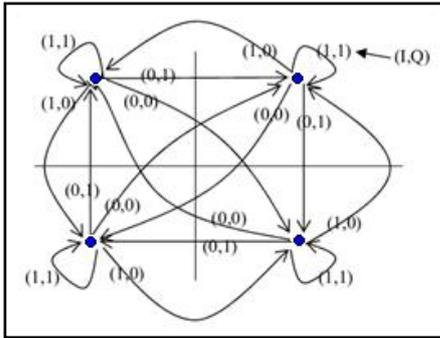


Fig 4: La constellation de la modulation DQPSK.

À la différence de la QPSK, dans la DQPSK avant de moduler les symboles à transmettre $(X(k), Y(k))$ on doit passer par un précodage qui permet de créer les symboles $(I(k), Q(k))$ comme le montre la figure 5. La fonction du codeur est donnée par les équations logiques suivantes :

$$I(k) = \overline{X(k)} \overline{Y(k)} I(k-1) + \overline{X(k)} Y(k) Q(k-1) + X(k) \overline{Y(k)} I(k-1) + X(k) Y(k) Q(k-1) \quad (7)$$

$$Q(k) = \overline{X(k)} \overline{Y(k)} Q(k-1) + \overline{X(k)} Y(k) Q(k) + X(k) \overline{Y(k)} Q(k-1) + X(k) Y(k) Q(k-1) \quad (8)$$

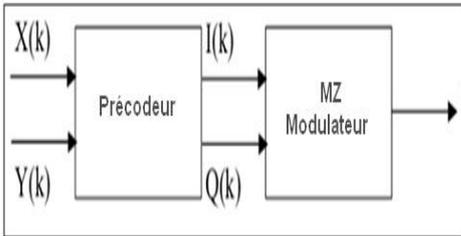


Fig 5: Schéma bloc du transmetteur DQPSK optique.

Du côté du récepteur, pour pouvoir récupérer les symboles envoyés, on utilise la détection différentielle qui permet d'assurer le décodage des données envoyées, la figure 6 résume le schéma bloc du récepteur. Pour plus de détail, consultez [13].

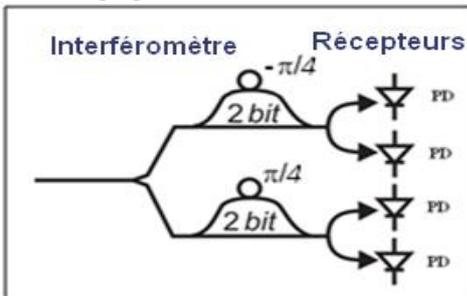


Fig 6: Schéma bloc du récepteur DQPSK optique.

III. TRAVAUX DE SIMULATIONS

A. Architecture du réseau :

On présente ci-dessous les travaux de simulations d'un réseau d'accès optique PON-WDM amélioré réalisé avec le simulateur des systèmes optiques Optsim pour témoigner la praticabilité de la structure de réseau et l'amélioration apportée par l'utilisation de la modulation DQPSK en downlink et la re-modulation DQPSK/ASK en uplink. En effet, le travail effectué dans ce papier permet de faire une comparaison entre deux réseaux PON-WDM de même caractéristiques, la différence se situe dans le type de modulation utilisée dans le downstream des deux systèmes, où en utilise la modulation classique NRZ-ASK pour le premier tandis que le deuxième utilise la modulation NRZ-DQPSK.

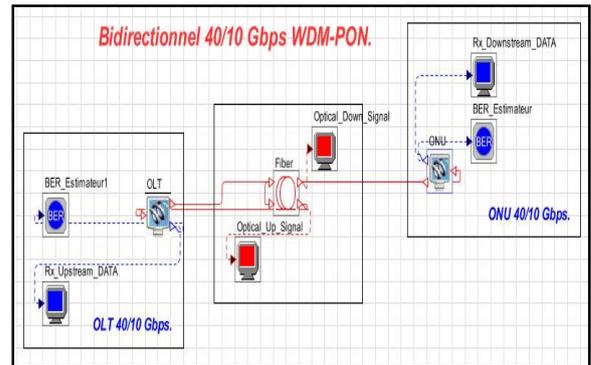


Fig 7 : Architecture du système WDM-PON simulé.

La figure 7 présente l'architecture générale du système simulé, comprenant une terminaison de ligne optique OLT (Optical Line Terminal), une unité optique du réseau ONU, connectées entre eux par une fibre optique bidirectionnelle standard (SMF-28) de 30 km. Le signal de downstream généré par l'OLT est envoyé à travers la fibre optique vers l'ONU qui représente le client final, les données montantes seront re-modulées par la porteuse descendante après une conversion de polarisation (H/V) (Horizontale/Verticale) au niveau d'ONU, et seront transmises vers l'OLT. Notons que le facteur d'affaiblissement dans la fibre est de 0.2 dB/km, l'effet de la dispersion chromatique n'est pas simulé puisque la compensation de cette dernière est parfaitement maîtrisée par plusieurs méthodes dédiées à cela. Tous les effets non linéaires de la fibre sont pris en compte dans cette étude, ainsi les effets de la dispersion de Rayleigh et de Brillouin présentés dans la fibre bidirectionnelle.

L'émetteur NRZ-DQPSK 40 Gbps est composé d'une source laser CW (Continuous Wave) qui permet de générer la porteuse optique polarisée horizontalement de puissance $P_e = 0$ dBm à la fréquence de 194 THz. Les données sont générées par le générateur de séquence aléatoires PRBS d'ordre 2^7-1 de longueur de 512 bits. Après le précodage différentiel ces données sont modulées optiquement à travers deux modulateurs Mach-Zehnder montés en parallèle. Chacun des deux modulateurs doit fonctionner en mode de polarisation nulle [14], où l'intensité optique de sortie du chaque MZM est minimale, l'un des deux modulateurs est suivi par un modulateur de

phase PM pour créer un déphasage de $\pi/2$ entre les deux faisceaux lumineux (Fig 3.b).

Le signal downstream NRZ-DQPSK 40Gbps est démodulé par un détecteur différentiel en utilisant deux MZDI (Mach-Zehnder Dual-arm Interfero-meter) suivis par deux photodiodes chacun (Fig 6). Chaque MZDI a un retard de 50 ps ($2T_b$) puisque le débit symbolique de la DQPSK est de 20GSym/s.

L'émetteur d'ONU utilise le principe de la re-modulation DQPSK/ASK, en récupérant une partie du signal optique descendant, on le polarise verticalement, puis est réinjecté dans le modulateur MZM afin de moduler les données upstream en amplitude (NRZ-ASK).

Afin de pouvoir étudier la qualité du système, on ajoute un bruit optique à la réception (côté OLT et ONU) et on fait varier sa puissance.

B. Résultats de simulations:

De ce qui suit, nous présentons les résultats de simulation du réseau étudié.

La figure 8.a présente la variation du BER en fonction de l'OSNR du réception pour le système ASK/ASK. Il est clair que lorsque le niveau du bruit augmente la qualité du système est médiocre, le signal d'information est submergé dans le bruit et donc la décision est difficile puisque le signal est modulé en amplitude et comme le bruit agit sur l'amplitude donc la détection des niveaux du signal devienne délicate. La dégradation du système lorsqu'on simule les effets de dispersions de Rayleigh et de Brillouin est presque nulle dans le downstream, tandis qu'on mesure une pénalité de 0.5 dB dans le upstream. Ceci semble logique puisque cet effet est plus agissant sur le signal montant.

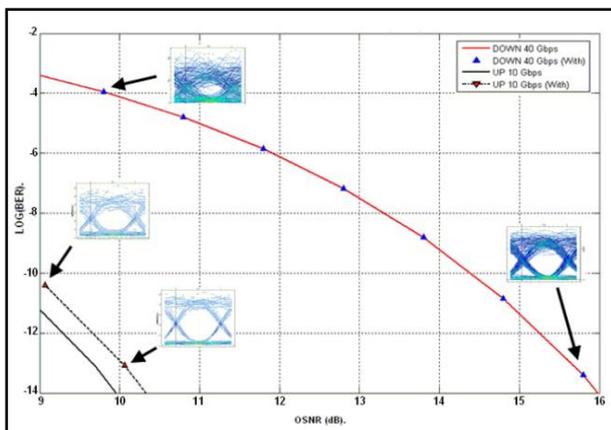


Fig 8.a : Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système NRZ-ASK 40Gbps/NRZ-ASK 10Gbps.

La variation de la qualité de liaison descendante et montante aux différentes valeurs d'OSNR est présentée sur la figure 8.b. L'influence des dispersions de Rayleigh et de Brillouin est transparente pour le système utilisant la modulation DQPSK/ASK, ceci est dû à la non-variation de la puissance optique du signal descendant qui influe sur le signal montant.

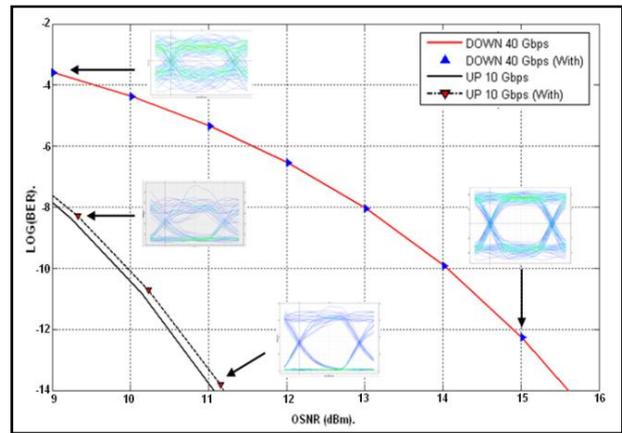


Fig 8.b : Variation de BER en fonction de l'OSNR pour le système NRZ-DQPSK 40Gbps/NRZ-ASK 10Gbps.

En comparant les deux figures, on remarque que le système basé sur la modulation DQPSK présente un gain de 0.5 dB en downstream ce qui favorise l'utilisation de cette dernière dans les nouveaux réseaux d'accès optique.

IV. CONCLUSION

Dans ce travail nous avons procédé à une comparaison de deux systèmes WDM-PON utilisant deux formats de modulations différents (NRZ-ASK/ASK et NRZ-DQPSK/ASK) sur une distance de 30 km pour un débit binaire descendant de 40 Gbps. La transmission ascendante re-module directement les données upstream sur la porteuse descendante ce qui permet d'éviter l'utilisation d'un nouveau laser au niveau du client. Cette architecture peut être un fort candidat pour les réseaux optiques d'accès de nouvelle génération. Ce travail est fait au laboratoire d'optoélectronique d'Institut National des Télécommunications et des Technologies de l'Information et de la Communication d'Oran, ALGERIE.

RÉFÉRENCES

- [1] S-J.Park, C-H.Lee, K-T.Jeong, H-J.Park, J-G.Ahn, et K-H.Song, "Fiber-to-the-Home Services Based on WDM-PON", *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 11, P. 2582-2591, 2004.
- [2] I. Fsaïfes, C. Lepers, R. Gabet, M. Douay et P. Gallion, "Performance Analysis of Quadratic Congruence Codes using Superstructured Fiber Bragg Gratings for Flexible Data Rate Coherent DS-OCMA System", *J. Opt. Netw.*, vol. 7, no. 7, p. 692-703, 2008.
- [3] G-K.Chang, A.Chowdhury, Z.Jia, H-C.Chien, M-F.Huang, J.Yu, et G.Ellinas, "Key Technologies of WDM-PON for Future Converged Optical Broadband Access Networks", *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 1, no. 4, p. C35-C50 2009.
- [4] R.S. Vodhanel, A.F.Elrefaie, M.Z.Igbal, R.E.Wagner, J.L.Gimlett, S.Tsuji, "Performance of directly modulated DFB laser in 10Gb/s ASK, FSK and DPSK lightwave systems," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 8, pp 1379-1385, 1990.
- [5] W. Hung, et al., "An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream re-modulated OOK data using injection-locked FP laser", *PTL*, 15, pp. 1476-1478 (2003).
- [6] N. Deng, et al., "A novel wavelength modulated transmitter and its application in WDM-PON", *OFC, MF79*, (2004).
- [7] G. Lu, et al., "Use of downstream IRZ signal for upstream data re-modulation in a WDM passive optical network", *OFC, OF18* (2005).
- [8] Y. Tian, et al., "Optical VPN in PON based on DPSK erasing/rewriting and DPSK/IM formatting using a single Mach-Zehnder modulator", *ECOC, Tu4.5.6* (2006).

- [9] J. Zhao, et al., "A Novel Re-modulation Scheme to Achieve Colorless High-Speed WDM PON with Enhanced Tolerance to Chromatic Dispersion and Re-modulation Misalignment", OFC, OWD2 (2005).
- [10] An Vu Tran, Chang-Joon Chae; Tucker R.S., "Ethernet PON or WDM PON: A Comparison of Cost and Reliability", TENCON 2005.
- [11] J. G. Proakis, "Digital Communication Systems", McGraw Hill.
- [12] A. H. Gnauck, P. J. Winzer, "Optical Phase Shift Keyed Transmission", J. of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 1, Jan 2005.
- [13] Jay (Y.C.) Hsieh, "A Thermal Demodulator for 42.7 Gb/s NRZ-DPSK Signal" ECOC'05 paper.
- [14] RSoft Design Group, "OptSim Models Reference: Volume I Sample Mode", www.rsoftdesign.com.

Résumé :

Un réseau d'accès large bande offre aux utilisateurs plusieurs services à grande vitesse tel que l'Internet haut débit, les multimédias, la télémédecine et l'enseignement à distance. L'introduction de la fibre optique dans les réseaux d'accès (FTTx) constitue une avancée majeure pour satisfaire la demande croissante en débit d'informations des abonnés. Les réseaux d'accès optiques passifs (PON: Passive Optical Network) permettent actuellement de fournir un débit de 100 Mb/s par utilisateur et de recevoir plusieurs services simultanément. Des groupes de travail sont en place pour normaliser la prochaine génération de PON qui permettra des accès de l'ordre du Gigabit/s.

Dans cette optique, cette thèse porte sur les réseaux d'accès optiques exploitant le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM). Nous proposons d'étudier l'évolution de l'architecture WDM PON en termes de bande passante en considérant l'introduction de nouveaux formats de modulation.

Le travail de cette thèse consistera donc à proposer des systèmes de transmission pour l'accès de nouvelles générations fonctionnant avec divers formats de modulation tels que la DQPSK et l'OFDM en faisant une comparaison entre les architectures en termes de qualité et débit de transmission. Des simulations numériques seront effectuées sur ces divers schémas.

Mots clefs:

La technologie FTTx (Fibre To The x), PON (Réseau Optique Passif), WDM (Multiplexage en longueur d'onde), Fibre optique bidirectionnelle, OLT (Optical Line Terminal), ONU (Optical Network Unit), DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

ملخص:

توفر شبكة الوصول حزام النطاق العريض للمستخدمين العديد من الخدمات العالية السرعة مثل الإنترنت عالية التردد، النماذج المتعددة، التطبيقات والتعليم عن بعد. إستعمال الألياف البصرية في شبكات النفاذ (تقنية FTTx) هو خطوة حاسمة لتلبية الطلب المتزايد لتدفق المعلومات من طرف المشتركين. تسمح الشبكة البصرية الخاملة (PON) حالياً بتوفير سرعة تدفق عالية تصل إلى أكثر من 100 ميجابت/ثانية لكل مستخدم و الوصول في نفس الوقت على العديد من الخدمات. مجموعات عمل تعمل على توحيد شبكات النفاذ البصرية الخاملة (PON) للجيل الجديد، وذلك بمساعدة الأبحاث إلى سرعة تدفق في حدود جيجابت/ثانية. في هذا المنظور، تركز هذه الأطروحة على تطوير شبكات النفاذ البصرية باستخدام تقنيات الأعداد والأطوال الموجية (WDM). تقوم عن خلال هذا العمل على تطوير شبكات النفاذ البصرية من نوع WDM PON من حيث عرض النطاق الترددي وذلك بإحلال مبرح تشكيل جديدة. وعليه تعمل هذه الأطروحة على اقتراح شبكات نفاذ بصرية من الجيل الجديد تعمل مع مختلف مبرح تشكيل الجديدة مثل DQPSK, OFDM وإجراء مقارنة بينها من حيث جودة الإرسال و سرعة تدفق المعلومات. سيتم إجراء الدراسة على أساس محاكاة مختلف المخططات المقترحة.

الكلمات المفتاحية:

تقنية FTTx، الشبكة البصرية الخاملة (PON)، التجميع بتقسيم الطول الموجي (WDM)، الألياف البصرية ثنائية الاتجاه، وحدة الشبكة البصرية (ONU)، المحطة البصرية الخلفية (OLT)، التصوير التفاضلي بالتعبير الترميزي للطور (DQPSK)، تقسيم التردد المتعامد (OFDM).

Abstract :

Broadband access network provides to users various high-speed services such as broadband Internet, multimedia, telemedicine and e-learning. The use of fiber in the access networks (FTTx) is a major step to satisfy the growing demand of information flow of the subscribers. Currently, the passive optical networks can offer high speed broadband at speeds of up to 100Mbps for customers and provide advanced voice and multimedia services simultaneously. Work group's are in place to normalize the next generation of PON that will allow access at Gigabit/s. In this context, this thesis focuses on the study of the optical access networks exploiting multiplexing wavelengths (WDM). We propose to study the evolution of the WDM PON architecture in terms of bandwidth by considering introducing new modulation formats.

The aim of this thesis, will be to propose new generations network access system's working with various modulation formats such as DQPSK and OFDM by making a comparison between architectures in terms of quality and transmission rate. Numerical simulations will be performed on these various proposed schemes.

Keywords :

FTTx technology (Fibre To The x), PON (Passive Optical Network), WDM (Wavelength Division Multiplexing), OLT (Optical Line Terminal), ONU (Optical Network Unit), DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), fiber bidirectional.