



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Electronique



## THESE DE DOCTORAT

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité : Electronique

Option : Signaux et Systèmes de Communications

Par :

**Mr. KHERICI Cheikh**

***Etude comparative des différentes méthodes de multiplexage  
optique pour les télécommunications.***

Soutenue le 14 Janvier 2021

Devant le jury composé de :

MAHDJOUB Zoubir	Professeur.	Université de Sidi Bel-Abbès.	Président
KANDOUCI Malika	Professeur.	Université de Sidi Bel-Abbès.	Directrice de thèse
LASRI Boumédiène	Professeur.	Université de Saïda.	Examineur
CHAMA Zouaoui	Professeur.	Université de Sidi Bel-Abbès.	Examineur
GARADI Ahmed	M.C.A.	Université de Saïda.	Examineur
BERKA Mohammed	M.C.A.	Université de Mascara.	Examineur

***Année 2020/2021.***

## Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier chaleureusement Madame **Malika KANDOUCI**, **Professeur** à l'Université de Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès (UDL) - Faculté du génie électrique, ma directrice de thèse, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions et son expérience dans ce domaine de recherche. Je lui exprime ici toute ma gratitude pour sa patience, sa gentillesse, ses qualités humaines et sociales, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'elle m'a prodigué.

J'exprime mes vifs remerciements à monsieur **Zoubir MAHDJOUR**, **Professeur** à l'Université de Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès (UDL) - Faculté des Sciences, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse et pour ses conseils lors de ma participation aux conférences tenues au Maroc.

Je souhaite remercier ici monsieur **Boumédiène LASRI**, **Professeur** à l'Université Moulay Tahar de SAÏDA - Faculté de génie électrique, de m'avoir fait l'honneur d'accepter la lourde tâche de rapporteur de ce travail de thèse.

Je remercie de même monsieur **Zouaoui CHAMA**, **Professeur** à l'Université de Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès (UDL) - Faculté de génie électrique, qui a accepté de faire partie de ce jury et a bien voulu évaluer mon travail de thèse de doctorat.

Monsieur **Ahmed GARADI**, Maître de Conférences A à l'Université Moulay Tahar de SAÏDA- Faculté de Technologie, m'a honoré en acceptant la charge de rapporteur, je l'en remercie.

Monsieur **Mohammed BERKA**, Maître de Conférences A à l'Université de MASCARA- Faculté de Technologie, a accepté de participer à ce jury de thèse et évaluer mes résultats, je l'en remercie également.

## *Dédicaces*

*Tout d'abord je rends grâce à Allah de m'avoir donné la force et le courage  
de terminer ce travail.*

*Je dédie ce travail :*

*A ma mère « Que Dieu l'accueille dans son vaste paradis ! Allah yarhamha »  
et mon père pour leurs encouragements permanents,  
et leur soutien moral.*

*A ma petite famille et toutes mes sœurs et tous mes frères.*

## Table des matières

<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
<i>Chapitre I</i> : .....	<b>4</b>
<i>Les différentes techniques de multiplexages optiques dans les télécommunications.</i> .....	<b>4</b>
<b>I.1 Introduction</b> : .....	<b>5</b>
<b>I.2 Notions sur la fibre optique</b> : .....	<b>5</b>
I.2.1 Définition de la fibre optique : .....	5
I.2.2 Différents types de la fibre optique : .....	6
I.2.3 Caractéristiques de la fibre optique : .....	6
I.2.3.1 Atténuation : .....	6
I.2.3.2 Dispersion chromatique : .....	7
I.2.3.3 Dispersion modale de polarisation : .....	7
I.2.3.4 Bande passante : .....	8
I.2.3.5 Effets non linéaires : .....	8
I.2.4 Avantages de la fibre optique : .....	9
I.2.5 Applications de la fibre optique : .....	9
<b>I.3 Les différentes techniques de multiplexages</b> : .....	<b>10</b>
I.3.1 Le multiplexage par répartition en fréquence (MRF) .....	10
I.3.1.1 Avantages et inconvénients du FDM : .....	11
I.3.1.2 Applications du multiplexage par répartition en fréquence (FDM) : .....	11
I.3.2 Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) : .....	11
I.3.2.1 Principe de l'OFDM : .....	12
I.3.3 Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence codé (COFDM) : .....	13
I.3.3.1 Applications de l'OFDM et le COFDM : .....	13
I.3.4 Le multiplexage par répartition en temps (TDM) : .....	14
I.3.4.1 Le multiplexage TDM synchrone : .....	14
I.3.4.2 Le multiplexage TDM asynchrone (STDMA) : .....	15
I.3.4.3 Avantages et inconvénients du TDM : .....	15
I.3.4.4 Applications du TDM : .....	15
I.3.5 Le multiplexage optique par répartition en temps (OTDM) : .....	16
I.3.5.1 Avantages et inconvénients de l'OTDM : .....	17
I.3.5.2 Applications de l'OTDM : .....	17
I.3.6 Le multiplexage par répartition de codes (MRC) : .....	18
I.3.6.1 Avantages et inconvénients du CDM : .....	18

I.3.6.2 Applications du CDM :	19
I.3.7 L'accès multiple par répartition de code optique (OCDMA) :	19
I.3.7.1 Classification des systèmes OCDMA :	19
I.3.7.2 Fonctionnement de l'OCDMA :	20
I.3.7.2.1 L'OCDMA cohérent :	20
I.3.7.2.2 L'OCDMA incohérent :	20
I.3.7.3 Configuration de l'OCDMA :	20
I.3.7.3.1 OCDMA à séquence directe (DS-OCDMA) :	21
I.3.7.3.2 OCDMA par saut de fréquence (FH-OCDMA) :	21
I.3.7.3.3 OCDMA par saut de temps (TH-OCDMA) :	21
I.3.7.4 Les codes de l'OCDMA :	21
I.3.7.4.1 Codes bipolaires ( <i>Bipolar Codes</i> ) - OCDMA Cohérent :	22
I.3.7.4.1.1 Code Walsh-Hadamard ( <i>W-H</i> ):	22
I.3.7.4.1.2 Codes m-Séquence ( <i>m-Sequence</i> ) :	23
I.3.7.4.1.3 Codes Gold ( <i>Gold Codes</i> ):	23
I.3.7.4.2 Codes OCDMA 1-D ( <i>OCDMA-Incohérent</i> ) :	24
I.3.7.4.2.1 Codes Optiques Orthogonaux ( <i>OOC</i> ) :	24
I.3.7.4.2.2 Codes premiers ( <i>Prime Codes</i> ) :	25
I.3.7.4.2.3 Codes double poids ( <i>Double Weight : DW</i> ) :	25
I.3.7.4.3 Codes OCDMA 2-D ( <i>OCDMA-Incohérent</i> ) :	26
I.3.7.5 Encodeurs et décodeurs optiques pour l'OCDMA :	26
I.3.7.6 Formats de modulation pour l'OCDMA :	28
I.3.7.7 Avantages et inconvénients de l'OCDMA :	28
I.3.8 Le multiplexage en longueur d'onde WDM :	28
I.3.8.1 Principe de fonctionnement du multiplexage WDM :	30
I.3.8.2 Principaux types du multiplexage WDM :	30
I.3.8.3 Avantages et inconvénients du WDM :	31
I.3.9 Le multiplexage DWDM ( <i>Dense-WDM</i> ) :	31
I.3.9.1 Avantages et inconvénients du DWDM :	32
I.3.10 Le multiplexage U-DWDM ( <i>Ultra-DWDM</i> ) :	33
I.3.11 Le multiplexage CWDM ( <i>Coarse WDM</i> ) :	34
I.3.11.1 Avantages et inconvénients du CWDM :	35
I.3.12 Le multiplexage en longueur d'onde étendu WWDM :	36
I.3.13 Le multiplexage à insertion/extraction optique (OADM) :	36
I.3.13.1 Le principe de fonctionnement de l'OADM :	36

I.3.13.2 Application de l'OADM : .....	37
<b>I.4 Comparaison : .....</b>	<b>37</b>
<b>I.5 Conclusion : .....</b>	<b>43</b>
<b>Chapitre II : .....</b>	<b>44</b>
<b><i>Les réseaux PON et les techniques du multiplexage hybride.....</i></b>	<b>44</b>
<b>II.1 Introduction : .....</b>	<b>45</b>
<b>II.2 Les réseaux optiques passifs (PON) : .....</b>	<b>45</b>
II.2.1 Architecture point-à-point (P2P) : .....	46
II.2.2 Architecture point à multipoint active (P2M) : .....	46
II.2.3 Architecture point à multipoint passive (P2M-PON) : .....	47
II.2.4 Différentes topologies du réseau PON : .....	48
II.2.5 La technologie de FTTx : .....	49
II.2.6 TDM PON : .....	52
II.2.6.1 APON (ATM PON) : .....	53
II.2.6.2 EPON (Ethernet PON) : .....	54
II.2.6.3 GPON (Gigabit PON) : .....	55
II.2.6.4 10 GEPON : .....	56
II.2.6.5 XG-PON : .....	57
II.2.6.6 XGS-PON : .....	58
II.2.6.7 NG-PON2 : .....	59
II.2.6.8 Comparaison entre les différents standards du réseau PON : .....	61
II.2.7 WDM PON : .....	63
II.2.8 CWDM PON : .....	64
II.2.9 OFDMA PON : .....	65
II.2.10 OCDMA PON : .....	67
II.2.11 OTDM PON : .....	68
<b>II.3 Les techniques du multiplexage hybride : .....</b>	<b>69</b>
II.3.1 Le système hybride OTDM/WDM-PON : .....	70
II.3.2 Le système hybride OCDMA/OTDM-PON : .....	71
II.3.3 Le système hybride OCDMA/WDM-PON : .....	73
II.3.4 Le système hybride OFDMA/OCDMA-PON : .....	75
II.3.5 Le système hybride OFDMA/WDM-PON : .....	77
II.3.6 Le système hybride OFDMA/OTDM-PON : .....	78
II.3.7 Comparaison entre les différents systèmes hybrides [83,84,85,86,87]: .....	81
<b>II.4 Conclusion : .....</b>	<b>84</b>

<b>Chapitre III :</b> .....	<b>85</b>
<b>Simulation et interprétations des résultats.</b> .....	<b>85</b>
<b>III.1 Introduction :</b> .....	<b>86</b>
<b>III.2 Etude du système WDM-PON :</b> .....	<b>86</b>
III.2.1 Description du système simulé :.....	86
III.2.2 Paramètres de simulation : .....	88
III.2.3 Etude de l'impact de la longueur de la liaison et de la puissance sur le système : ..	89
III.2.4 Etude de l'impact du format de modulation sur le système WDM-PON : .....	93
<b>III.3 Etude du système CWDM-PON :</b> .....	<b>95</b>
III.3.1 Description du système simulé :.....	95
III.3.2 Paramètres de simulation : .....	98
III.3.3 Etude de l'impact de la longueur de la liaison et de la puissance sur le système : ..	98
III.3.4 Etude de l'impact du format de modulation sur le système CWDM-PON : .....	101
<b>III.4 Comparaison entre le système WDM-PON et le système CWDM-PON :</b> .....	<b>102</b>
<b>III.5 Etude du système hybride :</b> .....	<b>107</b>
III.5.1 Etude du système OTDM : .....	107
III.5.1.1 Description du système simulé : .....	107
III.5.1.2 Paramètres de simulation : .....	109
III.5.1.3 Etude de l'impact de la longueur de la liaison et le débit sur le système : .....	109
III.5.1.4 Etude de l'impact du format de modulation sur le système OTDM : .....	111
III.5.2 Le système hybride OTDM/WDM : .....	111
III.5.2.1 Description du système simulé : .....	111
III.5.2.2 Paramètres de simulation : .....	112
III.5.2.3 Etude de l'impact de la longueur de la liaison sur le système hybride : .....	113
III.5.3 Comparaison entre le système OTDM et le système OTDM/WDM : .....	113
<b>III.6 Comparaison entre le WDM, le CWDM et l'OTDM :</b> .....	<b>115</b>
<b>III.7 Conclusion :</b> .....	<b>116</b>
<b>Conclusion générale et perspectives :</b> .....	<b>119</b>
<b>Références :</b> .....	<b>124</b>
<b>ملخص:</b> .....	<b>129</b>
<b>Abstract:</b> .....	<b>129</b>
<b>Résumé :</b> .....	<b>130</b>

## Liste des figures

FIGURE I- 1 : CONSTRUCTION DE LA FIBRE OPTIQUE.....	5
FIGURE I- 2 : EFFET DE LA DISPERSION MODALE DE POLARISATION.....	8
FIGURE I- 3 : LES TYPES DE MULTIPLEXAGE.....	10
FIGURE I- 4 : PRINCIPE DU MULTIPLEXAGE FDM.....	11
FIGURE I- 5 : LE PRINCIPE DE L'OFDM [28].....	12
FIGURE I- 6 : L'OFDM PAR RAPPORT AU FDM CONVENTIONNEL [29].....	13
FIGURE I- 7 : PRINCIPE DU MULTIPLEXAGE TDM.....	14
FIGURE I- 8 : PRINCIPE DU STDM.....	15
FIGURE I- 9 : PRINCIPE DU MULTIPLEXAGE OTDM [36].....	17
FIGURE I- 10 : LE PRINCIPE DU MULTIPLEXAGE CDM.....	18
FIGURE I- 11 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE LIAISON OCDMA.....	19
FIGURE I- 12 : LES DIFFERENTES CLASSES DE L'OCDMA.....	20
FIGURE I- 13 : REGISTRE A DECALAGE A RETROACTION LINEAIRE DE DEGRE P [40].....	23
FIGURE I- 14 : GENERATEUR DU CODE GOLD [40].....	24
FIGURE I- 15 : PRINCIPE DU CODAGE TEMPOREL.....	24
FIGURE I- 16 : LES DIFFERENTS DISPOSITIFS D'ENCODAGE ET DE DECODAGE POUR LE SYSTEME OCDMA : ENCODAGE/DECODAGE AWG (A), ENCODAGE/DECODAGE FBG (B), ENCODAGE OFDL (C) [40].....	27
FIGURE I- 17 : LE PRINCIPE DU MULTIPLEXAGE WDM.....	29
FIGURE I- 18 : PRINCIPE DU MULTIPLEXAGE ET DEMULTIPLEXAGE PAR RESEAU DE DIFFRACTION.....	30
FIGURE I- 19 : LE PRINCIPE DE AWG (A) ; LE PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRE MACH-ZEHNDER (B).....	31
FIGURE I- 20 : LONGUEURS D'ONDES DWDM (BANDE C ET L).....	32
FIGURE I- 21 : PRINCIPE DU MULTIPLEXAGE CWDM.....	34
FIGURE I- 22 : LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'OADM.....	37
FIGURE II- 1 : ARCHITECTURE POINT A POINT D'UN RESEAU D'ACCES OPTIQUE.....	46
FIGURE II- 2 : ARCHITECTURE POINT A MULTIPOINT ACTIF D'UN RESEAU D'ACCES OPTIQUE.....	47
FIGURE II- 3 : ARCHITECTURE POINT A MULTIPOINT PASSIF (P2M-PON) D'UN RESEAU D'ACCES OPTIQUE.....	48
FIGURE II- 4 : LES TOPOLOGIES D'UN RESEAU PON.....	49
FIGURE II- 5 : LES DIFFERENTS TYPES DE FTTH [65].....	51
FIGURE II- 6 : LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU TDM PON.....	52
FIGURE II- 7 : LE PRINCIPE DU BPON.....	54
FIGURE II- 8 : LE PRINCIPE DE L'EPON.....	55
FIGURE II- 9 : LE PRINCIPE DU GPON.....	56
FIGURE II- 10 : LE PRINCIPE DU 10 GEAPON.....	57
FIGURE II- 11 : LE PRINCIPE DU XG-PON.....	57
FIGURE II- 12 : LE PRINCIPE DU XGS-PON (P2MP).....	58
FIGURE II- 13 : LE PRINCIPE DU NG-PON2 TWDM (P2MP).....	60
FIGURE II- 14 : LE PRINCIPE DU NG-PON2 WDM (P2P).....	61
FIGURE II- 15 : ARCHITECTURE TYPIQUE DU WDM PON.....	64
FIGURE II- 16 : ARCHITECTURE TYPIQUE DU CWDM PON.....	65
FIGURE II- 17 : ARCHITECTURE TYPIQUE DE L'OFDMA PON.....	66
FIGURE II- 18 : ARCHITECTURE TYPIQUE DE L'OCDMA PON.....	68
FIGURE II- 19 : ARCHITECTURE TYPIQUE DE L'OTDM PON.....	69
FIGURE II- 20 : ARCHITECTURE TYPIQUE EN AVAL DU SYSTEME HYBRIDE OTDM/WDM-PON.....	71
FIGURE II- 21 : ARCHITECTURE TYPIQUE EN AVAL DU SYSTEME HYBRIDE OCDMA/OTDM-PON.....	73
FIGURE II- 22 : ARCHITECTURE TYPIQUE EN AVAL DU SYSTEME HYBRIDE OCDMA/WDM-PON.....	74
FIGURE II- 23 : ARCHITECTURE TYPIQUE EN AVAL DU SYSTEME HYBRIDE OFDMA/OCDMA-PON.....	76
FIGURE II- 24 : ARCHITECTURE TYPIQUE EN AVAL DU SYSTEME HYBRIDE OFDMA/WDM-PON.....	78
FIGURE II- 25 : ARCHITECTURE TYPIQUE EN AVAL DU SYSTEME HYBRIDE OFDMA/OTDM-PON.....	79
FIGURE III- 1 : SCHEMA DU SYSTEME WDM-PON POUR QUATRE UTILISATEURS (OLT).....	87
FIGURE III- 2 : SCHEMA DU SYSTEME WDM-PON POUR QUATRE UTILISATEURS (ONU).....	87
FIGURE III- 3 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L = 20 KM (WDM-PON DOWNSTREAM).....	89
FIGURE III- 4 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L = 20 KM (WDM-PON UPSTREAM).....	90
FIGURE III- 5 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L = 60 KM (WDM-PON DOWNSTREAM).....	90
FIGURE III- 6 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L = 60 KM (WDM-PON UPSTREAM).....	91

FIGURE III- 7 : FACTEUR DE QUALITE Q EN FONCTION DE LA LONGUEUR L .....	91
FIGURE III- 8 : TEB EN FONCTION DE LA LONGUEUR L .....	92
FIGURE III- 9 : OSNR EN FONCTION DE LA LONGUEUR L .....	92
FIGURE III- 10 : FACTEUR DE QUALITE Q EN FONCTION DE LA PUISSANCE DU LASER.....	92
FIGURE III- 11 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L = 20 KM (RZ-WDM-PON DOWNSTREAM).....	93
FIGURE III- 12 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L = 20 KM (RZ-WDM-PON UPSTREAM).....	94
FIGURE III- 13 : COMPARAISON ENTRE WDM-PON <sub>NRZ</sub> ET WDM-PON <sub>RZ</sub> .....	94
FIGURE III- 14 : SCHEMA DU SYSTEME CWDM-PON POUR QUATRE UTILISATEURS (OLT).....	95
FIGURE III- 15 : SCHEMA DU SYSTEME CWDM-PON POUR QUATRE UTILISATEURS (ONU).....	96
FIGURE III- 16 : SCHEMA DE LA FIBRE BIDIRECTIONNELLE ET LE SPLITTER (RN).....	97
FIGURE III- 17 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L = 20 KM ET P= -12 DBM .....	99
FIGURE III- 18 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L = 20 KM ET P= -12 DBM .....	99
FIGURE III- 19 : FACTEUR DE QUALITE Q EN FONCTION DE LA LONGUEUR L .....	100
FIGURE III- 20 : OSNR EN FONCTION DE LA LONGUEUR L .....	100
FIGURE III- 21 : TEB EN FONCTION DE LA LONGUEUR L .....	100
FIGURE III- 22 : FACTEUR DE QUALITE Q EN FONCTION DE LA PUISSANCE.....	101
FIGURE III- 23 : COMPARAISON ENTRE CWDM-PON <sub>NRZ</sub> ET CWDM-PON <sub>RZ</sub> .....	102
FIGURE III- 24 : COMPARAISON ENTRE LE WDM-PON <sub>RZ</sub> ET LE CWDM-PON <sub>RZ</sub> .....	103
FIGURE III- 25 : COMPARAISON ENTRE LE WDM-PON <sub>NRZ</sub> ET LE CWDM-PON <sub>NRZ</sub> .....	103
FIGURE III- 26 : COMPARAISON ENTRE LE WDM-PON <sub>NRZ</sub> ET LE CWDM-PON <sub>NRZ</sub> .....	104
FIGURE III- 27 : BLOC D'EMISSION A 4 UTILISATEURS OTDM AVEC LE SUPPORT DE TRANSMISSION.....	107
FIGURE III- 28 : BLOC DE RECEPTION A 4 UTILISATEURS OTDM .....	108
FIGURE III- 29 : VARIATION DU FACTEUR DE QUALITE Q EN FONCTION DE LA LONGUEUR ET DU DEBIT. ...	109
FIGURE III- 30 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L = 360 KM ET DEBIT = 20 GBPS. ....	110
FIGURE III- 31 : BLOC D'EMISSION DU SYSTEME HYBRIDE OTDM/WDM.....	112
FIGURE III- 32 : BLOC DE RECEPTION DU SYSTEME HYBRIDE OTDM/WDM.....	112
FIGURE III- 33 : VARIATION DU FACTEUR DE QUALITE Q EN FONCTION DE LA LONGUEUR .....	113
FIGURE III- 34 : VARIATION DU TAUX D'ERREUR BINAIRE TEB EN FONCTION DE LA LONGUEUR.....	113
FIGURE III- 35 : COMPARAISON ENTRE LE SYSTEME OTDM/WDM ET LE SYSTEME OTDM .....	114
FIGURE III- 36 : COMPARAISON ENTRE LE SYSTEME OTDM/WDM ET LE SYSTEME OTDM .....	114
FIGURE III- 37 : DIAGRAMME DE L'CEIL POUR L'OTDM/WDM SUR 120 KM ET 160 GBPS (A).....	115
FIGURE III- 38 : COMPARAISON ENTRE LES SYSTEMES : OTDM <sub>RZ</sub> , CWDM <sub>RZ</sub> ET WDM <sub>RZ</sub> .....	116
FIGURE III- 39 : VARIATION DU FACTEUR Q EN FONCTION DE LA PUISSANCE DU LASER .....	116

## Liste des tableaux

TABLEAU I- 1 : LA GRILLE DU DWDM [58]. .....	32
TABLEAU I- 2 : LA GRILLE DU CWDM [58].....	35
TABLEAU I- 3 : COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS TYPES DE MULTIPLEXAGES.....	39
TABLEAU II- 1 : LES COMBINAISONS DE DEBIT EN AVAL/AMONT POUR LE BPON (IUT-T G.983.1).....	53
TABLEAU II- 2 : PLAGE DES LONGUEURS D'ONDES UTILISEES POUR LE NG-PON2. ....	59
TABLEAU II- 3 : L'ATTENUATION ENTRE L'ONU ET L'OLT.....	59
TABLEAU II- 4 : COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS RESEAUX PON. [66,67,68,69,70,71] .....	62
TABLEAU II- 5 : COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS SYSTEMES HYBRIDES.....	81
TABLEAU III- 1 : PARAMETRES DU SYSTEME WDM-PON.....	88
TABLEAU III- 2 : L'IMPACT DU TYPE DE FORMAT DE MODULATION SUR LE SYSTEME WDM-PON. ....	93
TABLEAU III- 3 : PARAMETRES DU SYSTEME CWDM-PON.....	98
TABLEAU III- 4 : L'IMPACT DU TYPE DE FORMAT DE MODULATION SUR LE SYSTEME CWDM-PON. ....	101
TABLEAU III- 5 : COMPARAISON ENTRE LE WDM-PON ET LE CWDM-PON.....	106
TABLEAU III- 6 : PARAMETRES DU SYSTEME OTDM.....	109

## Liste des abréviations

ADSL	: Asymmetrical Digital Subscriber Line
AES	: Advanced Encryption Standard
AM	: Amplitude Modulation
ASK	: Amplitude Shift Keying
ATM	: Asynchronous Transfer Mode
AWG	: Arrayed Waveguide Grating
BIBD	: Balanced Incomplete Block Design
BPON	: Broadband Passive Optical Network
CA-TV	: Cable Television
CD	: Chromatic Dispersion
CDM	: Code Division Multiplexing
CDMA	: Code Division Multiple Access.
CO	: Central Office
CWDM	: Coarse Wavelength Division Multiplexing
DAB	: Digital Audio Broadcasting
DCF	: Dispersion Compensating Fiber
DEMUX	: Demultiplexer
DGD	: Differential Group Delay
DPSK	: Differential Phase Shift Keying
DS	: Direct Sequence
DSP	: Digital Signal Processing
DVB-T	: Digital Video Broadcasting Terrestrial
DWDM	: Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	: Erbium Doped Fiber Amplifier
EPON	: Ethernet Passive Optical Network
EPS	: Extended Prime Sequences
EQC	: Extended Quadratic Congruence
EV-DO	: Evolution Data Optimized
FBG	: Fiber Bragg Grating
FDMA	: Frequency Division Multiple Access.
FFT	: Fast Fourier Transform
FH	: Frequency Hopping
FOADM	: Multiplexage Fixe à Insertion/Extraction Optique
FPGA	: Field Programmable Gate Array
FP-LD	: Fabry-Perot Laser Diode
FSAN	: Full-Service Access Network
FSK	: Frequency Shift Keying
FTTB	: Fiber To The Building
FTTC	: Fiber To The Curb
FTTCab	: Fiber To The Cabinet
FTTCell	: Fibre To The Cell

FTTH : Fiber To The Home  
FTTLA : Fiber To The Last Amplifier  
FTTN : Fiber To The Node/Neighborhood  
FTTO : Fiber To The Office  
FTTP : Fiber To The Premises  
FTTS : Fiber To The Street  
FWM : Four Wave Mixing  
GEPON : Gigabit Ethernet PON  
GPON : Gigabit Passive Optical Network  
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers  
IFFT : Inverse Fast Fourier Transform  
LAN : Local Area Network  
LDPC : Low Density Parity Check  
LED : Light Emitting Diode.  
LTE : Long Term Evolution  
MAI : Multiple Access Interference  
MAN : Metropolitan Area Network  
MD : Multi Diagonal  
MDW : Modified Double Weight  
MRT : Multiplexage par Répartition dans le Temps  
MUX : Multiplexer  
MZM : Mach-Zehnder Modulator  
NGPON2 : 2<sup>nd</sup> Next-Generation Passive Optical Network  
NRZ : Non-Return to Zero  
NT : Network Termination  
NZDSF : Non-Zero Dispersion Shifted Fiber  
OADM : Optical Add-Drop Multiplexer  
OC : Optical Carrier  
OCDMA : Optical Code Division Multiple Access  
ODN : Optical Distribution Network  
OFDL : Optical Fiber Delay Lines  
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
OFDMA : Orthogonal Frequency Division Multiple Access  
OLT : Optical Line Terminal  
ONT : Optical Network Termination  
ONU : Optical Network Unit  
OOC : Optical Orthogonal Code  
OOK : On-Off Keying  
OSNR : Optical Signal to Noise Ratio.  
OTDM : Optical Time Division Multiplexing  
OXC : Optical Cross-Connect  
P2M : Point-to-Multi-Point

P2P : Point-to-Point  
PC : Prime Codes  
PMD : Polarisation Mode Dispersion  
PON : Passive Optical Network  
PRBS : Pseudo Random Binary Sequence  
PSK : Phase Shift Keying  
PX10 : Débit de 1 Gbps jusqu'à 10 km  
PX20 : Débit de 1 Gbps jusqu'à 20 km  
QAM : Quadrature Amplitude Modulation  
RN : Remote Node  
RNIS : Réseau Numérique à Intégration de Service  
ROADM : Multiplexage Reconfigurable à Insertion/Extraction Optique  
RTPC : Réseau Téléphonique Public Commuté  
RZ : Return to Zero  
SAC : Spectral Amplitude Coding.  
SBS : Stimulated Brillouin Scattering  
SDH : Synchronous Digital Hierarchy  
SMF : Single Mode Fiber  
SNR : Signal to Noise Ratio.  
SONET : Synchronous Optical Network Technologies  
SPM : Self-Phase Modulation  
STDM : Statistical Time Division Multiplexing  
TDMA : Time Division Multiple Access.  
TEB : Taux d'Erreur Binaire.  
TH : Time Hopping  
TWDM : Time and Wavelength Division Multiplexing  
UDWDM : Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing  
WAN : Wide Area Network  
WDM : Wavelength Division Multiplexing.  
WH : Wavelength Hopping  
W-H : Walsh-Hadamard  
WiMax : World-wide inter-operability for Micro-wave Access  
WWDM : Wide Wavelength Division Multiplexing  
XPM : Cross Phase Modulation  
ZCC : Zero Cross Correlation

## **Introduction Générale**

Aujourd'hui, le domaine des télécommunications a connu un développement énorme notamment dans les transmissions par fibres optiques à large bande (*broadband*). L'étalement de la bande passante signifie qu'une large gamme de fréquences est disponible pour transmettre des informations, plus la gamme de fréquences disponibles est large, plus la quantité d'informations pouvant être envoyées à un moment donné sera élevée.

Les nouvelles technologies de transmission et la mise en réseau ont connu une croissance considérable au cours de la dernière décennie notamment la 5<sup>ème</sup> génération, l'internet des objets (*IoT*), des villes intelligentes ainsi qu'une industrie bien plus efficace qui demandent une gigantesque bande passante et un très haut débit de l'ordre de 1 Tbps et qui s'accompagnent d'une large gamme de solutions innovantes [1].

L'innovation technologique la plus récente dans les communications par fibre optique est le multiplexage optique. Le multiplexage en longueur d'onde (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*) est l'une des technologies qui a permis un essor rapide de la communication optique. Alors que le débit par canal en multiplexage temporel (TDM) a augmenté de 2,5 Gbit/s à 10 Gbit/s et va bientôt atteindre 40 Gbit/s [2], le WDM et ses dérivés sont basés sur la multiplication de la capacité de transmission des fibres optiques par la combinaison de 2 à 160 canaux sur une même fibre dans une bande spectrale de 1300 à 1600 nm et doivent être correctement espacés pour éviter les interférences entre eux. Ce dernier a réduit fortement le coût par bit, favorisant l'augmentation de la capacité de transmission des réseaux à longue distance ; l'avantage le plus important pour le WDM est que chaque canal optique peut transporter n'importe quels formats de transmission et peuvent être envoyés simultanément et indépendamment sur la même fibre, sans avoir besoin d'une structure de signal commune [3].

Le système DWDM (*Dense WDM*) nous permet de transporter plusieurs longueurs d'ondes allant jusqu'à 160 canaux sur une distance pouvant atteindre 1000 km avec un très haut débit de l'ordre de 1 Tbps [4]. Il ressemble au U-DWDM. L'espacement entre les canaux est inférieur à 0,8 nm (*soit 100 GHz*). Ce petit espacement permet de transmettre simultanément plus d'informations. L'inconvénient majeur dans ce type de multiplexage est que le système est affecté par les effets non linéaires, comme le mélange à quatre ondes (*FWM : Four Wave*

*Mixing*) et la modulation de phase croisée (*XPM : Cross Phase Modulation*) due à l'espacement entre les canaux qui provoquent des interférences entre les canaux adjacents [5] et en plus, il nécessite un dispositif d'amplification de type EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) qui est coûteux. Ce système est utilisé comme un dorsal de transmission point à point et on peut l'appliquer dans le réseau optique synchrone à circuits commutés (*SONET, SDH*) [6].

On parle de Coarse WDM (*CWDM*), lorsque l'espacement entre les canaux est de 20 nm. L'avantage de ce type de multiplexage est son coût, car cela permet l'utilisation des lasers non refroidis qui ne nécessitent pas une régulation en température, en plus la tolérance dans un laser CWDM va jusqu'à  $\pm 3$  nm, tandis que dans un laser DWDM, la tolérance est beaucoup plus serrée [7]. Le nombre de canaux est fixé à 18 canaux non amplifiés sur une longueur de 150 km au maximum (*définis par l'ITU*) [8]. En pratique, 8 longueurs d'ondes sont généralement utilisées avec un débit de 10 Gbps (*de 1471 à 1611 nm*) [9]. Ce système est utilisé dans les réseaux LAN et MAN [10].

L'OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*) est une autre solution pour le multiplexage optique, cette technique repose sur des codes à savoir les codes optiques orthogonaux (*Orthogonal Optical Code*), qui sont les mieux adaptés pour ce système à des fins de sécurité. Elle est flexible dans la mise en réseau disposant d'un accès aléatoire et pouvant prendre en charge des débits multiples en permettant une meilleure compatibilité avec les systèmes WDM et TDM [11]. Cette technique de multiplexage peut également fonctionner de manière asynchrone (*comme dans les applications sans fil*), sans collision de paquets.

Les systèmes hybrides tels que le WDM/OTDM, le WDM/OCDMA, l'OTDM/OCDMA ...etc., présentent de meilleures performances notamment du côté prix (*peu coûteux*), une meilleure qualité de données reçues ainsi que la faisabilité d'intégration dans le réseau de transmission. Dans cette thèse, nous nous focalisons sur ces techniques hybrides car elles sont récentes et plus adéquates dans l'heure actuelle et surtout à leurs applications dans les réseaux PON (*Passive Optical Network*). [12]

Plusieurs travaux ont été proposés pour ce type de multiplexage notamment l'auteur [13] a proposé un système hybride WDM/OTDM intégré dans le réseau PON qui fonctionne à un débit de 160 Gbps. Ce dernier a été évalué avec succès par rapport au système WDM PON sur une distance de 352,89 km avec un taux d'erreur binaire TEB de  $10^{-10}$ . L'auteur [14], a proposé un système hybride OCDMA/WDM PON avec une modulation DPSK sur une

distance de 8 km et un débit de 2,5 Gbps avec un TEB de  $10^{-9}$ . Les résultats de comparaison ont révélé que le système hybride OCDMA/WDM présente de meilleures performances en utilisant la technique de détection directe. Pour le système OFDM/OCDMA, l'auteur [15], propose une technique de multiplexage hybride de type SAC-OCDMA avec OFDM, ce système utilise un code multi-diagonal (MD) qui donne une bonne performance basée sur le taux d'erreur binaire (TEB) sur une longue distance. En conséquence, le constat d'une amélioration du TEB de  $10^{-4}$  pour l'OFDM-OCDMA par rapport aux systèmes OCDMA ordinaires sur une distance de 100 km, alors que le débit de données atteint 10 Gbps avec un TEB souhaité.

L'objectif de cette thèse est de faire une comparaison détaillée de performances entre les différentes techniques de multiplexage optiques et d'apporter une contribution aux nouveaux systèmes hybrides en tenant compte de la distance, du débit, du type de modulation, de l'amplification entre autres, et d'étudier la possibilité de leurs applications au réseau PON.

La thèse est structurée comme suit :

Dans le premier chapitre, une fois les notions de base sur la fibre optique rappelées, nous mettons en évidence les différentes techniques de multiplexages optiques et suite à cela, nous établissons une comparaison entre les différents types de multiplexage optique.

Le second chapitre concerne les réseaux PON et les systèmes hybrides notamment le WDM/OTDM, le WDM/OCDMA ainsi que l'OTDM/OCDMA. Ce chapitre sera consacré à l'étude en détail des performances de chaque système en recherchant la technique appropriée à intégrer pour son application dans le réseau PON.

Le troisième chapitre, quant à lui, est consacré aux différentes simulations du système hybride et son comportement en termes de taux d'erreur binaire (TEB), de facteur de qualité  $Q$  ainsi que l'OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*). Une comparaison détaillée sera évaluée entre les différentes techniques du multiplexage optique afin de choisir la meilleure pour une contribution efficace dans le réseau PON. Une conclusion générale des travaux de cette thèse résumera les différentes études et contributions présentées dans ce contexte et introduira les perspectives des travaux également futurs.

## *Chapitre I :*

*Les différentes techniques de multiplexages optiques dans les télécommunications.*

## I.1 Introduction :

A l'heure actuelle, les télécommunications ont connu un grand essor notamment les nouvelles technologies telles que la 5<sup>ème</sup> génération, les smart cities, les NG-PON2, ...etc. Le besoin en matière de bande passante et du débit exige de résoudre le problème de la multiplication des lignes de transmission et d'empilement des répéteurs-régénérateurs. La technique du multiplexage optique tel que le WDM et ses dérivés (DWDM, U-DWDM, CWDM, WWDM, ...etc.) a changé totalement le comportement de la liaison optique. Cette technique permet de multiplier plusieurs signaux de couleurs différentes (ou canaux) en même temps et à travers une seule fibre [16].

Dans ce chapitre, nous passons en revue les notions sur la fibre optique en décrivant brièvement leurs caractéristiques, leurs avantages et inconvénients, ensuite nous allons étudier en détail les différents types du multiplexage optique ainsi que leurs domaines d'application.

## I.2 Notions sur la fibre optique :

### I.2.1 Définition de la fibre optique :

La fibre optique est un guide d'onde qui permet de transmettre plusieurs signaux (couleurs) entre deux extrémités à travers la lumière qui est guidée dans le cœur. Le cœur est constitué en majorité de dioxyde de silicium ( $SiO_2$ ) [17], enrichi avec d'autres éléments. Il est entouré par la gaine optique fabriquée en silicium, son indice de réfraction est inférieur à celui du cœur. Cela permet justement à la lumière de se réfléchir. La gaine optique est protégée par une enveloppe, fabriquée en plastique (figure I-1).

La fibre optique est divisée en deux catégories [18] :

- Fibre monomode à saut d'indice ( $\varnothing$  cœur = 8 – 10  $\mu m$ ,  $\varnothing$  gaine optique = 125  $\mu m$ ) ;
- Fibre multimode à saut d'indice et à gradient d'indice (  $\varnothing$  cœur = 62.5  $\mu m$ ,  $\varnothing$  gaine optique = 125  $\mu m$ ).

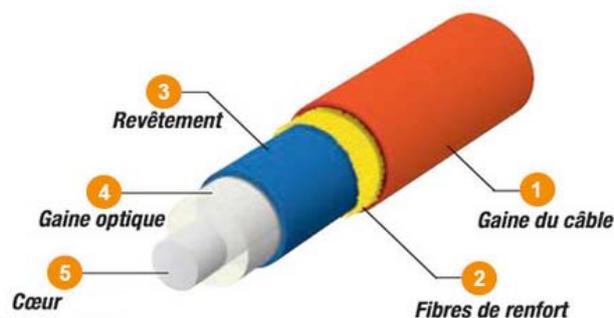


Figure I- 1 : Construction de la fibre optique.

La transmission de la lumière à travers la fibre optique se fait par ce que l'on appelle le phénomène de la réflexion totale (*total internal reflection*), phénomène qui survient lorsqu'un rayon lumineux arrive sur la surface de séparation de deux milieux d'indices différents (*cœur et gaine optique*) avec un angle d'incidence supérieur à une valeur critique [19].

La loi de la réflexion totale est donnée par *Snell* :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{Equation I.1}$$

Avec :  $n_1 > n_2$ , où :

$n_1$  : Indice du cœur.

$n_2$  : Indice de la gaine optique.

$\theta_1$  : Angle d'incidence.

$\theta_2$  : Angle de réfraction.

### **I.2.2 Différents types de la fibre optique :**

Plusieurs types de fibres optiques sont recommandées par l'UIT-T comme suit :

1. G-651 : Fibres multimodes à 850 nm ;
2. G-652 : Fibre monomode standard à 1310 nm optimisée ;
3. G-652c : Fibre à faible pic d'eau pour le CWDM ;
4. G-653 : Zero Dispersion point Shifted à 1550 nm, provoque facilement le FWM ;
5. G-654 : Coupe de w/l décalé, câble sous-marin ;
6. G-655 : Dispersion non nulle décalée (*bande C*), la dispersion limite la distance à 100 km et empêche le FWM (*Four Wave Mixing*) ;
7. G-655b : NZDSF avancé (*S, C band*).

### **I.2.3 Caractéristiques de la fibre optique :**

#### **I.2.3.1 Atténuation :**

Dans la fibre optique, l'atténuation est une perte de transmission due aux longues distances. Elle est exprimée par le rapport de la puissance optique d'entrée  $P_i$  et la puissance optique de sortie  $P_o$  de l'unité logarithmique du décibel.

Dans les communications par fibre optique, l'atténuation est généralement exprimée en décibels par unité de longueur (c.à.d. *dB/km*) [20] :

$$\alpha_{dB} L = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad \text{Equation I.2}$$

Où  $\alpha_{dB}$  : est l'atténuation du signal par unité de longueur en *dB*, et  $L$  : est la longueur de fibre.

L'atténuation varie avec la longueur d'onde de la lumière. Une fibre monomode typique offre une atténuation de :

- 2,0 à 2,5 dB/km  $\Rightarrow$  850 nm ;
- 0,4 à 0,5 dB/km  $\Rightarrow$  1300 nm ;
- 0,25 à 0,30 dB/km  $\Rightarrow$  1550 nm.

### **I.2.3.2 Dispersion chromatique :**

La dispersion chromatique (CD) ou *intra-modale* est définie comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km. Elle est la somme de deux dispersions : la dispersion du matériau et la dispersion due au guidage de l'onde [21].

Elle entraîne différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises. Cet étalement devient relativement important à certaines distances.

L'élargissement  $\tau$  est calculé selon la formule suivante :

$$\tau = DC(ps.nm^{-1}.km^{-1}) * L(km) * \Delta\lambda(nm) \quad \text{Equation I.3}$$

Où :

- DC : Le coefficient de dispersion chromatique ( $ps.nm^{-1}.km^{-1}$ ) ;
- L : La longueur de la fibre ( $km$ ) ;
- $\Delta\lambda$  : La largeur spectrale de la source ( $nm$ ).

### **I.2.3.3 Dispersion modale de polarisation :**

Le fait de la dispersion modale est dû à l'asymétrie (*non-homogénéité*) du profil d'indice dans le cœur lors de la fabrication de la fibre. Ceci induit un effet photoélastique, qui provoque une biréfringence et une polarisation variable, cela excite les deux modes à la fois et chacun d'entre eux a sa propre vitesse de propagation. Ce décalage de temps de propagation est appelé le DGD (*Differential Group Delay*), (figure I-2).

Le DGD est une variable aléatoire qui suit une loi de *Maxwell* [22]. Sa valeur est donnée par la formule suivante :

$$\langle \Delta\tau \rangle = coef_{PMD}\sqrt{L} \quad [ps] \quad \text{Equation I.4}$$

Où :  $coef_{PMD}$  : est le coefficient de PMD en  $ps/\sqrt{km}$ .

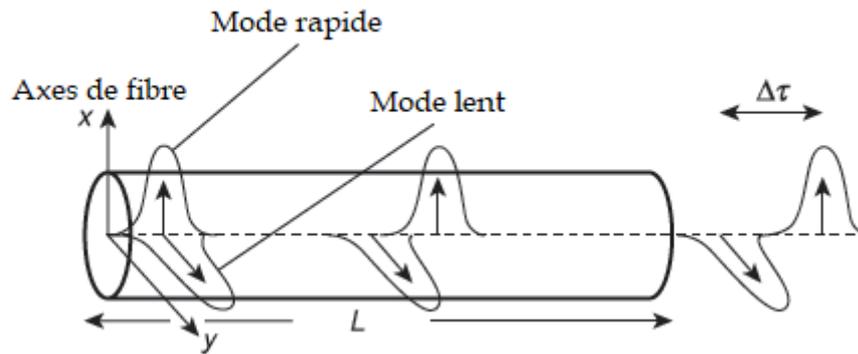


Figure I- 2 : Effet de la dispersion modale de polarisation.

#### I.2.3.4 Bande passante :

C'est un intervalle de fréquence sur lequel le signal ne subit pas un affaiblissement supérieur à une certaine valeur en dB (généralement 3 dB  $\Rightarrow A(f)$  à 50%).  $W$  est aussi la bande de fréquence où les signaux sont correctement reçus.

La bande passante dépend du type de fibre, la fibre monomode permet d'avoir un débit beaucoup plus important que la fibre multimode.

La capacité  $C$  : est la quantité maximale d'informations (en bits) pouvant être transmise sur le support optique en 1 seconde. Elle est donnée par la loi de Shannon 1948 :

$$C = W \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad \text{Equation I.5}$$

#### I.2.3.5 Effets non linéaires :

Dans les transmissions optiques, on distingue plusieurs types d'effets non-linéaires tels que l'effet Kerr, l'effet Raman et l'effet Brillouin, entre autres. Ces effets sont en général une nuisance pour les réseaux de télécommunication car ils dégradent les performances du signal transmis (pour les applications WDM) en entraînant une auto concentration instable du faisceau lumineux [23] provoquée par l'implémentation de fonctionnalités tout optique dans les réseaux optiques ainsi que l'amplification de signaux [24, 25].

La Diffusion Brillouin Simulée (SBS : Stimulated Brillouin Scattering), entraîne une perte de puissance de crête et de l'OSNR, diaphonie (interférences) optique en particulier dans les systèmes DWDM bidirectionnels ainsi que la diminution du taux d'erreurs binaires TEB. La solution est d'élargir le spectre de la source lumineuse [26]. Dans la dernière partie de ce travail de thèse, nous tenons en compte ces effets notamment l'auto-modulation de phase (SPM : Self Phase Modulation) et le mélange à quatre ondes (FWM : Four Wave Mixing).

### **I.2.4 Avantages de la fibre optique :**

La fibre optique présente plusieurs avantages notamment dans le domaine des télécommunications, car elle possède une large bande passante et peut transmettre de très hauts débits sur une longue distance, parmi ces avantages :

1. Petite taille et poids ;
2. Grande bande passante ( $> 50$  GHz pour 1 km de longueur) ;
3. Longues liaisons non répétées ( $> 70$  km en fonctionnement).
4. Sources lumineuses peu coûteuses disponibles.
5. Isolation électrique ;
6. Immunité aux interférences et à la diaphonie ;
7. Sécurité d'informations ;
8. Faible perte de transmission ( $5$  dB/km à  $<0,25$  dB/km typique) ;
9. Robustesse et flexibilité ;
10. Fiabilité du système et facilité d'entretien ;
11. Faible coût potentiel ;
12. Évolutivité future.

### **I.2.5 Applications de la fibre optique :**

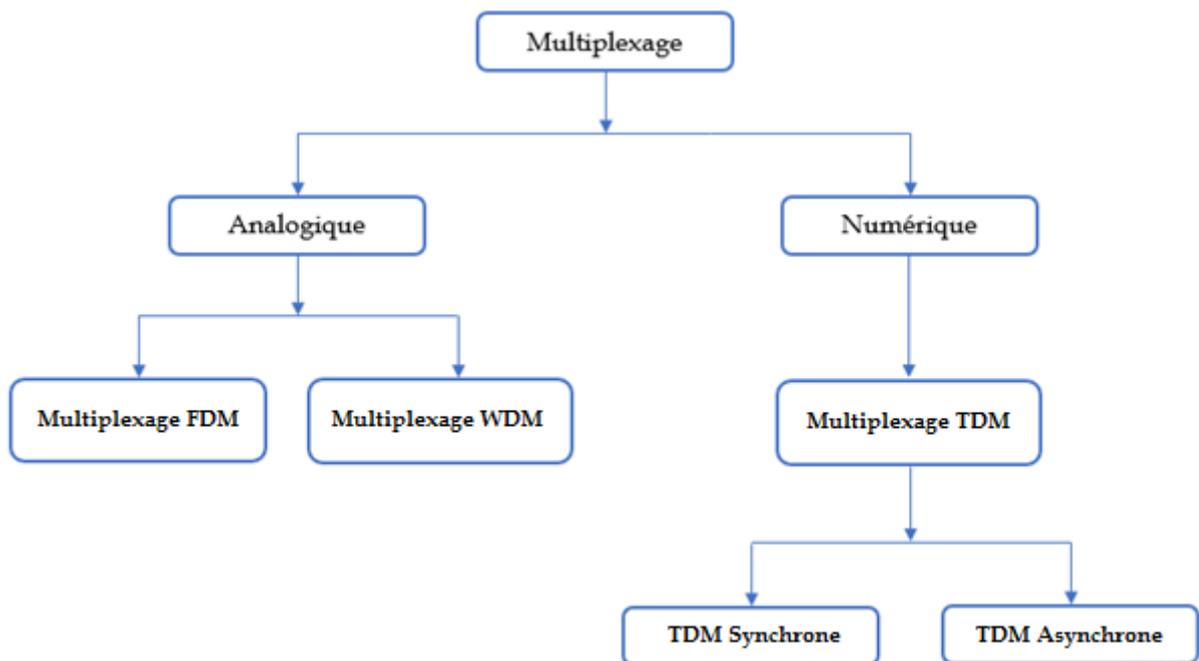
Le domaine d'application de la fibre optique est vaste. Ses différents avantages permettent son utilisation dans de multiples applications dans le domaine des télécommunications à savoir :

1. Réseau dorsal (*Backbone*).
2. Téléphones interurbains.
3. FTTH (*Fiber To The Home*).
4. Réseaux MAN, WAN.
5. Câbles sous-marins.
6. Zones EMI élevées (*lignes électriques, rails, routes*).
7. Communication d'usine/ Automatisation.
8. Régions avec forts risques de foudre.
9. Applications militaires.
10. Communication sécurisée.
11. Médecine.

### **I.3 Les différentes techniques de multiplexages :**

Le multiplexage permet de transférer plus d'un message via le même canal de communication. Dans ce contexte, le canal est une fibre optique. Parmi ces techniques traditionnelles du multiplexage, on cite le multiplexage temporel (*TDM : Time Division Multiplexing*) et le multiplexage fréquentiel (*FDM : Frequency Division Multiplexing*) (figure I-3).

Le TDM permet d'affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant une courte durée. Le multiplexage TDM permet alors de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal. Par contre, dans le multiplexage par répartition en fréquence (FDM), chaque source transfère ses signaux en même temps dans une plage de fréquences allouée.



**Figure I- 3 : Les types de multiplexage.**

#### **I.3.1 Le multiplexage par répartition en fréquence (MRF)**

Ce multiplexage nous permet l'envoi des signaux dans une plage de fréquences allouée avec un écart de fréquence approprié entre deux signaux adjacents afin d'éviter le chevauchement. La probabilité de collision est faible car les signaux sont envoyés dans un temps imparti.

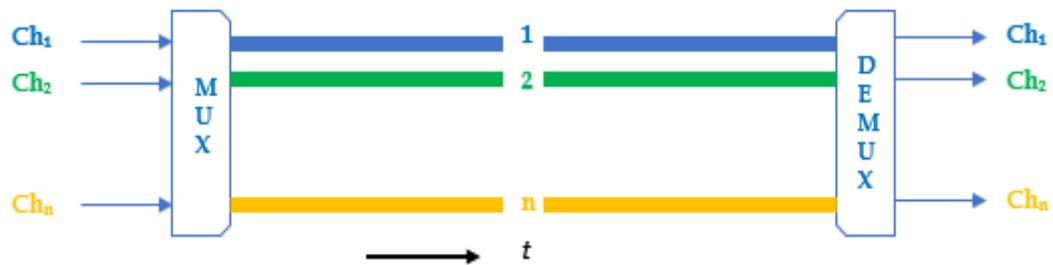


Figure I- 4 : Principe du multiplexage FDM.

### I.3.1.1 Avantages et inconvénients du FDM :

On utilise cette technique analogique pour faciliter l'envoi de plusieurs signaux simultanément sur un canal de communication. Parmi les avantages de cette technique nous citons :

- La transmission de plusieurs signaux simultanément.
- La facilité du processus de démodulation.
- Pas de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur.

L'inconvénient majeur de ce multiplexage est la nécessité d'un canal de communication à large bande passante.

### I.3.1.2 Applications du multiplexage par répartition en fréquence (FDM) :

Etant donné que le FDM est une technique analogique, il est utilisé généralement pour la radiodiffusion FM (*Frequency Modulation*) et AM (*Amplitude Modulation*), les téléphones cellulaires de la première génération ainsi que la radiodiffusion télévisuelle.

### I.3.2 Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) :

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de codage des signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous-porteuses. Le principe de ce multiplexage est de moduler le signal numérique qu'on veut transmettre sur un grand nombre de sous-porteuses. L'orthogonalité des sous-porteuses entre elles nous permet la transmission d'un maximum d'information sur une portion de fréquence donnée tout en évitant le phénomène de chevauchement et d'interférences. Cette technique présente une haute efficacité spectrale, elle est adoptée dans la plupart des applications à très haut débit [27].

### I.3.2.1 Principe de l'OFDM :

La modulation de l'OFDM est basée dans l'émission sur la transformée rapide inverse de Fourier (*IFFT*) et à la réception sur la transformée rapide de Fourier (*FFT*) (voir figure I-5). Cette modulation consiste à multiplexer le flux de données de haut débit  $R$  à  $M$  flux de débit  $\frac{R}{M}$  en modulant parallèlement  $M$  porteuses orthogonales à bande étroite, augmentant ainsi la durée totale du symbole par un facteur  $M$  [28].

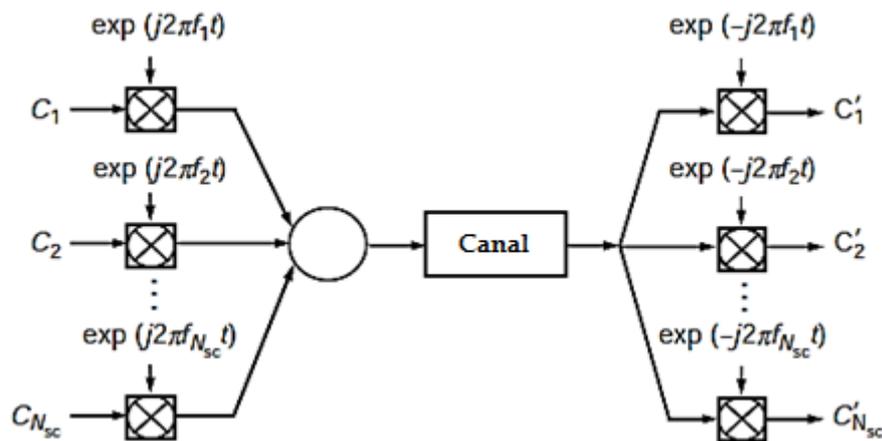


Figure I- 5 : Le principe de l'OFDM [28].

Le signal OFDM transmis est exprimé en bande de base par :

$$x(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \sum_{m=0}^{M-1} C_{m,n} e^{\frac{j2\pi mt}{T}} \Pi_T(t - nT) \quad \text{Equation I.6}$$

Avec :

$\Pi_T$  : fonction porte définie par :  $\begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq t \leq T. \\ 0, & \text{si non.} \end{cases}$

Il est indispensable d'appliquer la transformée rapide de Fourier (*FFT*) pour la restauration du signal et la suppression de la porteuse.

La figure I-6, montre une grande économie de bande passante par rapport au *FDM* conventionnel. Étant donné que la caractéristique orthogonale permet une efficacité spectrale élevée, ce dernier (*l'OFDM*) n'est pas affecté par les interférences électromagnétiques entre les canaux adjacents, ceci permet ainsi une transmission de données à grande vitesse sur un canal dispersif [29].

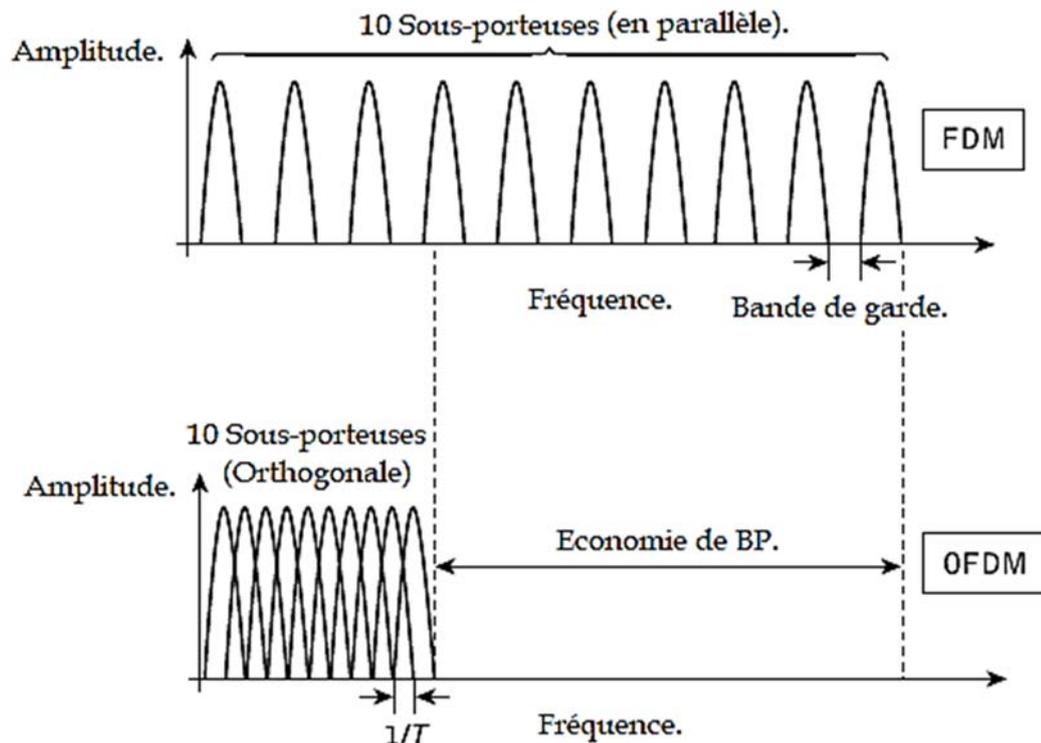


Figure I- 6 : L'OFDM par rapport au FDM conventionnel [29].

**NB :** Le décodage OFDM nécessite une synchronisation très précise de la fréquence du récepteur avec celle de l'émetteur, sans cela, il advient une déviation en fréquence qui engendre une perte de l'orthogonalité des sous-porteuses.

### I.3.3 Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence codé (COFDM) :

Le COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) est un système de multiplexage basé sur un codage correcteur d'erreurs (*code convolutif*). Quand l'OFDM divise le canal de transmission en plusieurs sous-canaux, et émet les données dans chaque sous canal, l'information émise subit une forte atténuation. Pour corriger ce problème de la forte atténuation, le système COFDM introduit un codage correcteur d'erreur associé à un entrelacement dans une chaîne de transmission OFDM.

#### I.3.3.1 Applications de l'OFDM et le COFDM :

L'OFDM et le COFDM sont adoptés par plusieurs standards tels que [30,31] :

- Le DAB (*Digital Audio Broadcasting*), utilise le COFDM ;
- Le DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*), utilise le COFDM ;
- Le WiMax (*World wide inter-operability for Micro-wave Access*);
- Le standard IEEE 802.16 ;

- Le Wifi (IEEE 802.11) ;
- 4G-LTE (Long Term Evolution);
- ADSL (Asymmetrical Digital Subscriber Line), utilise le COFDM ;
- La Transmission des données via des lignes électriques, utilise le COFDM.

### I.3.4 Le multiplexage par répartition en temps (TDM) :

Le multiplexage temporel (TDM : *Time Division Multiplexing*) est une technique de multiplexage numérique qui permet à un ou plusieurs émetteurs de transmettre plusieurs débits binaires faibles ou moyens (*voix, données et vidéo*) sur le même support de transmission à haute vitesse. Cependant les signaux fonctionnent avec la même fréquence à des moments différents (*c'est l'inverse avec le FDM*).

Ce multiplexage permet, entre autres, de passer des flux synchrones ou asynchrones sur une liaison synchrone [32]. Cependant, le TDM présente certains inconvénients, le plus important étant que la technologie électronique existante ne peut multiplexer qu'à environ 10 Gbps. [33]

La figure I-7 ci-dessous, montre le principe du multiplexage temporel, dont les signaux échantillonnés sont combinés dans des trames (*frames*) et chaque trame dispose d'un créneau horaire (*time slot*).

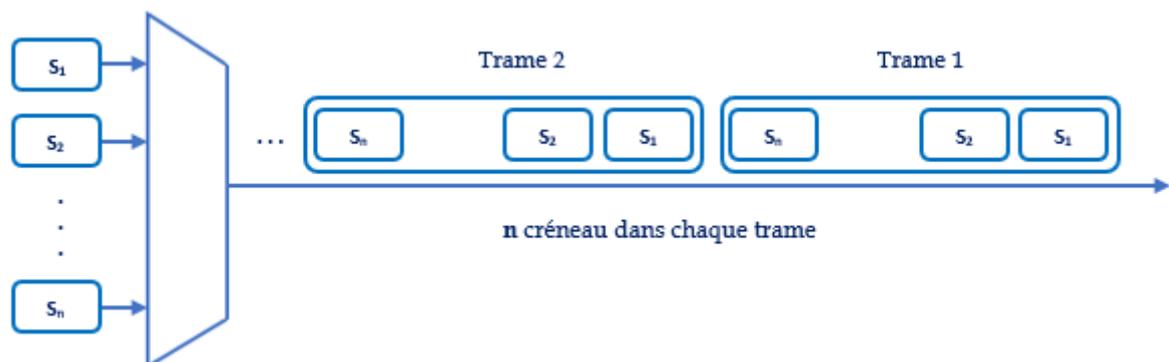


Figure I- 7 : Principe du multiplexage TDM.

Le multiplexage TDM peut être mis en œuvre de deux façons : le TDM synchrone et le TDM asynchrone (ou *STDM : Statistical Time Division Multiplexing*).

#### I.3.4.1 Le multiplexage TDM synchrone :

En TDM synchrone, le terme synchrone a une signification différente de la transmission synchrone, ici la synchronisation signifie que le multiplexeur alloue exactement le même intervalle de temps à chaque circuit à tout moment, qu'un circuit a quelque chose à transmettre

ou pas. Les créneaux horaires (*time slots*) sont regroupés en trames et chaque trame se compose d'un cycle complet d'intervalles de temps comme indique la figure I-7.

#### I.3.4.2 Le multiplexage TDM asynchrone (STDM) :

Le TDM asynchrone est appelé aussi le TDM Statistique (*STDM : Statistical Time Division Multiplexing*). Il est différent du TDM synchrone, ici les intervalles de temps sont alloués dynamiquement en fonction de la vitesse de la source ou de leur état (*prêt*). Cela permet d'économiser beaucoup plus la capacité du canal.

La figure I-8, montre le principe du TDM asynchrone.

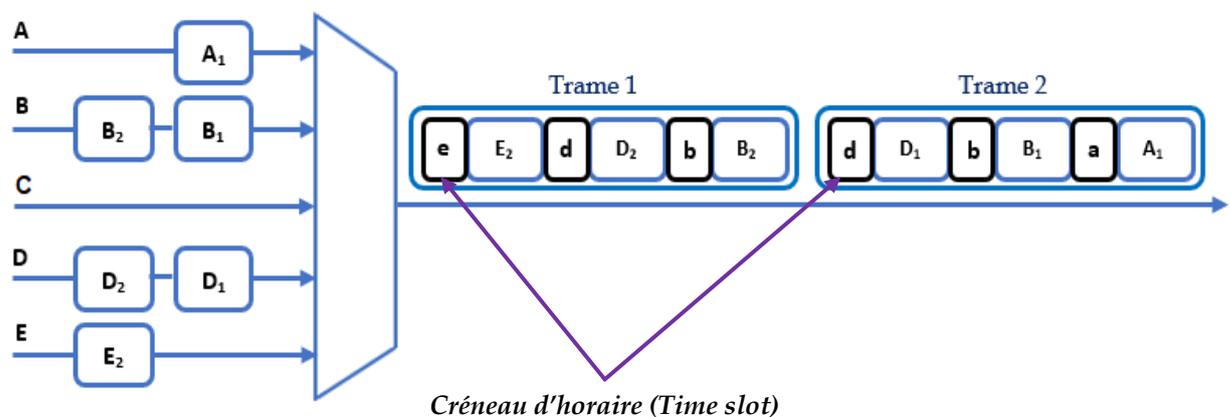


Figure I- 8 : Principe du STDM.

#### I.3.4.3 Avantages et inconvénients du TDM :

Il y a quelques avantages du multiplexage temporel qui sont donnés comme suit :

- Plus flexible que le multiplexage par répartition en fréquence (FDM).
- Les circuits ne sont pas complexes.
- Pas de diaphonie.
- Chaque canal possède la totalité de la bande passante BP.

Il y a quelques inconvénients du multiplexage temporel qui sont donnés comme suit :

- La synchronisation est nécessaire dans ce multiplexage.
- Complexe à mettre en œuvre.

#### I.3.4.4 Applications du TDM :

Il y a quelques applications du multiplexage temporel qui sont donnés comme suit :

- Les lignes téléphoniques RNIS (*Réseau Numérique à Intégration de Service*).
- Le RTPC (*Réseau Téléphonique Public Commuté*).

- Les lignes téléphoniques filaires.

### **I.3.5 Le multiplexage optique par répartition en temps (OTDM) :**

Le multiplexage OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*) est un outil robuste qui surmonte la limitation de la bande passante des composants électroniques et optoélectroniques et augmente le débit binaire du signal transmis. C'est une solution pour surmonter les effets non linéaires associés au système WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) qui fût introduit au début des années 1990. Ce système utilise uniquement une approche dans le domaine temporel. L'avantage du système OTDM est de combiner de nombreuses données optiques au débit de base  $B$  dans le domaine temporel pour obtenir un débit associé plus élevé ( $N \times B$ ), où  $N$  est le nombre de canaux [34]. Dans le récepteur, le signal OTDM est séparé dans de nombreux canaux.

La figure I-9 représente un schéma de principe du système OTDM à  $N$  canaux. Le train d'impulsions optiques d'une diode laser est divisé en  $N$  trajets. Dans chaque canal, le train d'impulsions est modulé individuellement par un signal de données électrique créant  $N$  canaux de données au format optique *RZ* (*Retour à Zéro*). L'émetteur OTDM utilise le format de modulation *RZ* au lieu du *NRZ* (*Non-Retour à Zéro*) car l'énergie des impulsions *RZ* est concentrée dans un intervalle de temps plus court qu'une période de bits. Chaque impulsion est retardée d'une fraction de la période d'horloge  $\Delta t$  et synchronisée. Pour éviter la diaphonie entre les canaux, la source laser doit pouvoir générer des impulsions optiques d'une durée  $< 1/N$  de la période d'horloge [35]. Pour multiplexer un signal optique de période  $T$  ps pour le canal  $N$ , le retard requis  $\Delta t$  pour chaque trajet est :

$$\Delta t_i = i \times \frac{T}{N} (ps), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N - 1. [36] \quad \text{Equation I.7}$$

Où  $\Delta t_i$  : est le retard de son chemin.

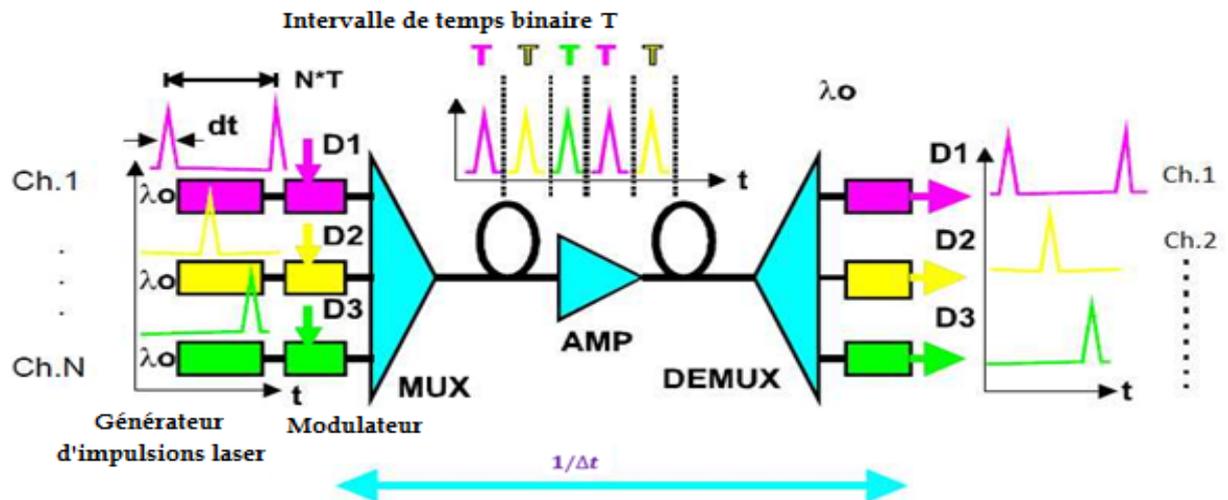


Figure I- 9 : Principe du multiplexage OTDM [36].

### I.3.5.1 Avantages et inconvénients de l'OTDM :

L'OTDM présente plusieurs avantages notamment en ce qui concerne la bande passante, la mise en œuvre ainsi que la possibilité d'intégration dans le système WDM tout en remédiant aux effets non-linéaires (*voir les chapitres 2 et 3*). Ces avantages sont donnés comme suit [37] :

- Bande passante flexible ;
- Surmonte l'effet non linéaire associé au WDM ;
- Le système est très simple à mettre en œuvre ;
- La capacité totale du réseau OTDM monocanal = DWDM ;
- Equipement de nœud terminal pas complexe.
- Peut fonctionner à la fois :
  - ✓ 1500 nm (comme WDM) en raison de l'EDFA ;
  - ✓ 1300 nm ;

La dispersion dans ce système est une grande préoccupation car la distance de transmission des signaux OTDM est limitée par la dispersion de la fibre en raison de l'utilisation des impulsions optiques *ultra-courtes* ( $\sim 1\text{ps}$ ) commandées par un débit binaire relativement élevé.

### I.3.5.2 Applications de l'OTDM :

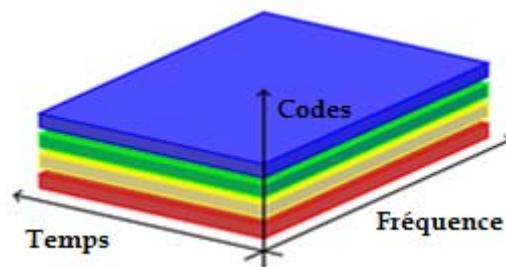
Le système OTDM est utilisé généralement dans le réseau PON (*Passive Optical Network*) en particulier dans le système hybride assemblé avec le système WDM (*OTDM/WDM*) afin de minimiser les effets non-linéaires et de maîtriser la bande passante des composants électroniques [38].

Le dernier chapitre, les performances du système hybride OTDM/WDM. Seront détaillées.

### **I.3.6 Le multiplexage par répartition de codes (MRC) :**

Le multiplexage CDM (*Code Division Multiplexing*) est très différent du Multiplexage OTDM et FDM. Dans ce système, chaque utilisateur possède l'accès à toute la bande passante pendant toute la durée. Il est basé sur l'étalement du spectre et utilise différents codes CDM pour distinguer les différents utilisateurs.

La figure I-10 illustre le fonctionnement du multiplexage CDM, les utilisateurs utilisent différents codes pour les distinguer au niveau du récepteur. Les données sont disponibles sur le canal partagé, mais seuls les utilisateurs associés à un code particulier peuvent accéder aux données [39].



**Figure I- 10 : Le principe du multiplexage CDM.**

Quand le CDM est utilisé pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager un même canal de communication, la technologie est appelée accès multiple par répartition de code (CDMA : *Code Division Multiple Access*).

#### **I.3.6.1 Avantages et inconvénients du CDM :**

L'avantage le plus important c'est la protection des données (*car seul l'expéditeur du récepteur connaît le code d'étalement*) ainsi que l'élimination des interférences entre symboles.

L'inconvénient du CDM est que la bande passante transmise de chaque utilisateur est plus grande que le débit de données numériques de la source. La solution est de mettre la largeur de la bande occupée approximativement égale au débit codé. Par conséquent, l'émetteur et le récepteur nécessitent un circuit électronique complexe [39].

### I.3.6.2 Applications du CDM :

Plusieurs variantes du CDM notamment le CDMA et l'OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*) ont été utilisées dans des domaines différents, à savoir les systèmes radiofréquences (*Micro-wave*), les technologies 2G et 3G de la téléphonie cellulaire qui utilisent le CDMA, ainsi que l'accès pour le haut débit via la norme EV-DO (*Evolution Data Optimized*). L'OCDMA et ses variantes sont utilisées généralement dans les transmissions par fibre optique, son rôle principal est d'augmenter le nombre d'utilisateurs ainsi que de sécuriser les données via différentes façons de coder l'information à transmettre.

### I.3.7 L'accès multiple par répartition de code optique (OCDMA) :

L'OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*) est une technique de multiplexage tout optique qui encode/décodes les signaux en utilisant des composants optiques passifs. Cette technique permet de gérer efficacement la bande passante. Son utilisation dans les réseaux optiques permet de gérer ou « manager » des données volumineuses telles que les multimédias (*voix, vidéo, image, audio, ...etc.*). Les codes optiques orthogonaux (*OOC : Optical Orthogonal Code*) sont les plus adaptés pour ce type de multiplexage à des fins de sécurité.

Le schéma de principe d'une liaison OCDMA est illustré dans la figure I-11 ci-dessous en utilisant la fibre optique comme milieu de transmission.

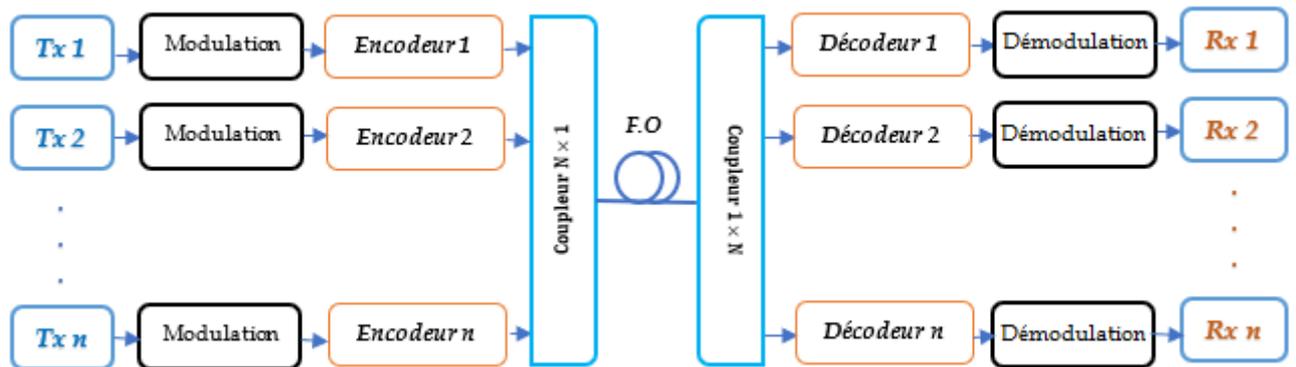


Figure I- 11 : Schéma de principe d'une liaison OCDMA système synchrone.

#### I.3.7.1 Classification des systèmes OCDMA :

Dans ce système de multiplexage, il existe deux classifications de l'OCDMA notamment cohérent/incohérent. La figure I-12, montre les différents types de l'OCDMA, qui sont classés en fonction de la nature de la superposition du signal optique.

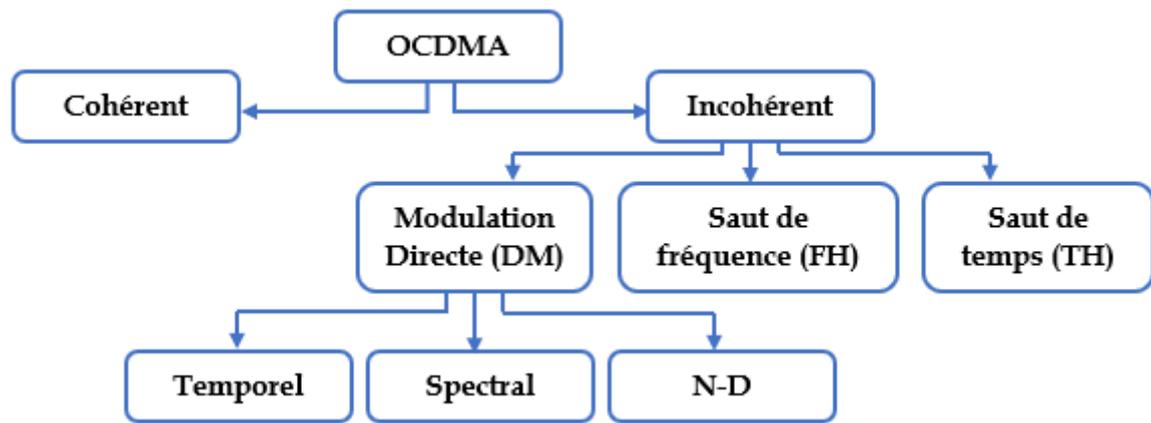


Figure I- 12 : Les différentes classes de l'OCDMA.

### I.3.7.2 Fonctionnement de l'OCDMA :

La superposition des signaux optiques permet la classification de l'OCDMA comme cohérente ou incohérente.

#### I.3.7.2.1 L'OCDMA cohérent :

L'OCDMA cohérent utilise la propriété cohérente de la lumière et met en œuvre le codage bipolaire du signal optique, c'est à dire le codage de la phase et de l'amplitude des signaux optiques [40].

Ce type d'OCDMA utilise des séquences de code bipolaire  $(-1, +1)$ , dont les données sont codées en amplitude et en phase. Les codes utilisés dans ce cas sont des codes orthogonaux (*Gold et Walsh*) [41]. L'inconvénient de cette technique est l'écrasement de la phase des signaux bipolaires durant la transmission par le canal optique à détection directe dont l'implémentation de cette dernière est généralement complexe, difficile et coûteuse [42].

#### I.3.7.2.2 L'OCDMA incohérent :

Dans cette technique, le décodage est réalisé dans le domaine temporel ou spectral en utilisant des séquences de codes unipolaires  $(0, 1)$ . Elle utilise une détection directe de la quantité positive de la puissance reçue. Cette technique est plus simple à mettre en œuvre (*coût bas*), car elle utilise des sources de lumière incohérente telle que la diode électroluminescente (*LED*) [42].

### I.3.7.3 Configuration de l'OCDMA :

Les systèmes OCDMA incohérents sont de trois types à savoir l'OCDMA à séquence directe (DS-OCDMA), l'OCDMA par saut de fréquence (FH-OCDMA) et par saut de temps (TH-OCDMA).

### **I.3.7.3.1 OCDMA à séquence directe (DS-OCDMA) :**

L'OCDMA à séquence directe (*DS-OCDMA : Direct Sequence OCDMA*) est une technique dont la modulation se fait par la multiplication des données à transmettre avec un code : ce qu'on appelle la modulation directe du signal. Afin d'obtenir de bonnes performances et lutter contre les interférences d'accès multiples (*MAI*) et une faible probabilité d'erreur, il faut utiliser des codes optiques orthogonaux (*OOC : Optical Orthogonal Code*) qui présentent une bonne propriété de corrélation [43].

L'OCDMA à séquence directe (*DS-OCDMA*) compte trois catégories : l'OCDMA temporel, l'OCDMA spectral et l'OCDMA N-dimensionnel (*N-D*). Dans l'OCDMA temporel, les données sont multipliées par un code temporel dont la variation du code est temporelle, par contre dans l'OCDMA spectral, le code spectral est envoyé pour la donnée « 1 » et rien pour « 0 ». L'OCDMA N-dimensionnel est une approche pour augmenter le nombre d'utilisateurs, cette approche utilise deux dimensions ou plus pour coder l'information.

### **I.3.7.3.2 OCDMA par saut de fréquence (FH-OCDMA) :**

Dans cette technique (*FH-CDMA : Frequency Hopping*), les données de chaque utilisateur sont envoyées sur des fréquences différentes dont le choix se fait aléatoirement. Le système FH-OCDMA est réparti comme suit [44,45] :

- **Le SFH-OCDMA :** *Slow Frequency Hopping OCDMA* : dans ce système la séquence de code est envoyée sur la même fréquence mais le changement de cette dernière se fait après la transmission de plusieurs bits de données.
- **Le FFH-OCDMA :** *Fast Frequency Hopping OCDMA* : dans ce système la séquence de code est envoyée sur plusieurs fréquences, signifié par le terme « *Fast ou rapide* ».

### **I.3.7.3.3 OCDMA par saut de temps (TH-OCDMA) :**

L'OCDMA par saut de temps (*TH-OCDMA : Time Hopping*) : ici la transmission de la donnée n'est pas faite de manière continue, une séquence pseudo-aléatoire définit la position temporelle de la donnée à transmettre [46].

### **I.3.7.4 Les codes de l'OCDMA :**

Le codage dans le système OCDMA est basé sur des codes qui tiennent en compte les caractéristiques d'autocorrélation et d'intercorrélation du signal à coder afin de faire la distinction entre le signal et les interférences d'accès multiples (*MAI*).

L'implantation d'un code OCDMA nécessite le respect des conditions suivantes :

- Avoir une longueur  $L$  constante pour tous les codes.
- Avoir un poids  $W$  constant.
- La cardinalité  $C$  : est le nombre maximal d'utilisateurs que peut supporter un code (le bon choix du code).
- Avoir une faible intercorrélacion entre deux séquences de codes.

En outre, l'orthogonalité des codes optiques est importante car elle présente une bonne propriété de corrélation [43].

#### I.3.7.4.1 Codes bipolaires (*Bipolar Codes*) - OCDMA Cohérent :

Les codes bipolaires utilisent des impulsions à deux états (+1 ou -1). L'exploitation de ces codes dépend de l'auto-corrélation et l'inter-corrélation ainsi que le mode synchrone ou asynchrone. Ces conditions permettent de contrôler les effets des interférences d'accès multiple (MAI) sur le taux d'erreurs binaires (TEB) à la réception.

Les codes bipolaires les plus utilisés sont les codes de *Walsh-Hadamard*, *m-Séquence* et *Gold* qui utilisent des propriétés de corrélation [42].

##### I.3.7.4.1.1 Code Walsh-Hadamard (W-H):

Ce code est sous forme d'une matrice composée de lignes qui sont le code de *Walsh* selon l'ordre de *Hadamard*. Les éléments de cette matrice de *Walsh* sont  $\pm 1$  et sont définis récursivement par :

$$H(i + 1) = \begin{bmatrix} H(i) & H(i) \\ H(i) & -H(i) \end{bmatrix} \quad \text{Equation I.8}$$

Où  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  avec  $H(0) = +1$ .

En utilisant cette expression de récursivité, nous pouvons déduire :

$$H(1) = \begin{bmatrix} +1 & +1 \\ +1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$H(2) = \begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 \end{bmatrix}$$

.....

On remarque dans ce code que l'orthogonalité est parfaite, cela nous permet d'éliminer les interférences d'accès multiples (MAI) à condition que la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur soit parfaite. Ce code est généralement utilisé dans les applications 2G et les communications multi-porteuses [42].



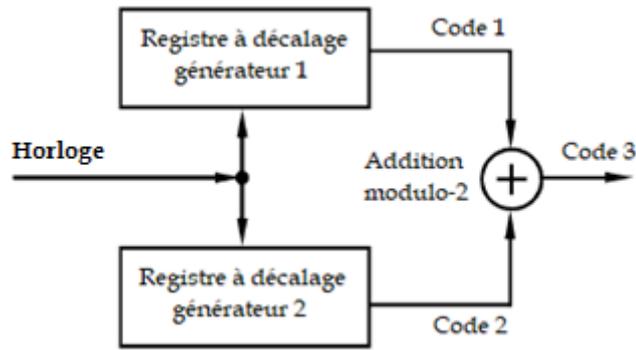


Figure I- 14 : Générateur du code Gold [40].

#### I.3.7.4.2 Codes OCDMA 1-D (OCDMA-Incohérent) :

Le principe du codage temporel est que le temps bit du signal à envoyer est divisé en  $N$  intervalles appelés « chips » et chaque chip contient une puissance positive ou nulle [47], où  $\sum N = L$  : est la longueur du code. On donne à tous les chips non nuls la même puissance et celle-ci doit être normalisée à une valeur de « 1 », nous appellerons ces chips : « chip unité », où  $\sum \text{chip unité} = W$  (le poids du code).

Dans ce système DS-OCDMA, l'émetteur envoie le code lorsque la donnée est « 1 » et n'envoie rien si la donnée est « 0 ». La figure I-15 ci-dessous, montre un exemple du codage temporel, avec un code :  $L = 8$  et  $W = 4$ .

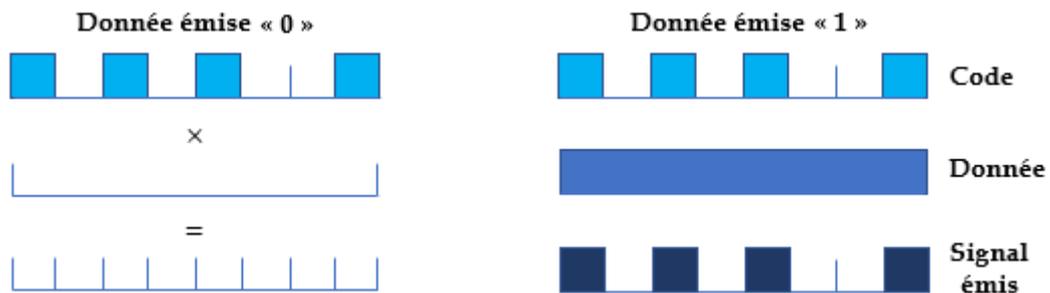


Figure I- 15 : Principe du codage temporel.

Il est à noter que les codes unipolaires sont les plus utilisés dans l'OCDMA contrairement aux codes bipolaires qui sont utilisés dans le CDMA Hertzien.

#### I.3.7.4.2.1 Codes Optiques Orthogonaux (OOC) :

Les codes optiques orthogonaux (OOC) se divisent en trois catégories, il s'agit de l'OOC symétrique à poids constant (*Constant-weight Symmetric OOCs*), l'OOC asymétrique à poids constant (*Constant-weight Asymmetric OOCs*), et, l'OCC à poids variable (*Variable-weight OOCs*). Les codes optiques orthogonaux sont des codes de séquences de (0,1) et  $(L, W, \lambda_a, \lambda_c)$ , où  $L$  :

représente la longueur du code (*nombre de chips*),  $W$  : signifie le poids du code (*nombre de chips unité*),  $\lambda_a$  : est le facteur d'autocorrélation et  $\lambda_c$  : le facteur d'intercorrélation [48].

La capacité de multiplexage (*le nombre maximal de séquences de code OOC*) est donnée par la formule suivante :

$$C \leq \left\lfloor \frac{L-1}{W(W-1)} \right\rfloor \quad \text{Equation I.12}$$

Où  $\lfloor \cdot \rfloor$  : est la partie entière par la valeur inférieure.

L'autocorrélation et l'intercorrélation périodiques de chaque mot de code sont données dans l'équation I-13 et I-14 ci-dessous :

$$\theta_{XX}(\tau) = \sum_{i=0}^{L-1} x_i \cdot x_{i \oplus \tau} = \begin{cases} W & \tau = 0 \\ \leq \lambda_a & 1 \leq \tau \leq L-1 \end{cases} \quad \text{Equation I.13}$$

$$\theta_{XY}(\tau) = \sum_{i=0}^{L-1} x_i \cdot y_{i \oplus \tau} \leq \lambda_c \quad 0 \leq \tau \leq L-1 \quad \text{Equation I.14}$$

**NB :** Pour avoir une meilleure orthogonalité possible pour les OOCs il faut que  $\lambda_a = \lambda_c = 1$ .

Pour la construction du code OOC-1D, on utilise deux méthodes de génération de codes 1D OOC. Parmi ces méthodes : « Méthode Greedy Algorithm » et « BIBD : Balanced Incomplete Block Design » [49].

#### **I.3.7.4.2.2 Codes premiers (Prime Codes) :**

Les *Prime Codes* sont caractérisés par une seule grandeur qui est le poids du code  $W = P$  contrairement aux codes OOCs qui sont définis par plusieurs paramètres. La longueur du code est :  $L = P^2$  et le nombre d'utilisateurs est :  $N = P$ . Donc la forme du code PC (*Prime Code*) est :  $PC(P^2, P)$ . Ces Prime Codes (*ou PC*) permettent aussi d'obtenir des séquences plus courtes avec une meilleure capacité de multiplexage et une taille du code inférieure ou égale aux OOCs. L'avantage du PC est que les valeurs d'intercorrélations sont moins intéressantes contrairement aux codes OOCs [49]. On distingue quatre types du PC, il s'agit de : Séquences premières (*PS*), Séquences premières étendues (*Extended Prime Sequences :EPS codes*), Codes congruents quadratiques (*Quadratic Congruence codes : QC codes*) et les codes congruents quadratiques étendus (*Extended Congruence Quadratic codes :EQC codes*).

#### **I.3.7.4.2.3 Codes double poids (Double Weight : DW) :**

Le code DW est représenté par une matrice H de K lignes (*le nombre d'utilisateurs*) et L colonnes (*la longueur minimale du code*). Cette famille de codes est basée sur la construction matricielle ainsi que le mappage.

La matrice du code est représentée comme suit :

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Equation I.15}$$

La combinaison des chips des séquences est 1,2,1 pour les 3 colonnes. Afin d'augmenter le nombre d'utilisateurs ( $K$  lignes) et la longueur du code ( $L$  colonnes) avec le maintien de l'intercorrélacion maximale égale à 1, [50] ont proposé de doubler les colonnes  $L$  et les lignes  $K$  de la matrice  $H_1$  :

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & H_1 \\ H_1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Equation I.16}$$

Il existe des variantes du code DW tels que le code double poids modifié (*Modified Double Weight : MDW*) qui est utilisé pour les services « triple play » (voix, vidéo, données) dans les réseaux étendus (*WAN*) contrairement au DW qui est utilisé dans les réseaux locaux (*LAN*) ainsi que le code double poids amélioré (*Enhanced Double Weight : EDW*) qui est utilisé pour la transmission multi-débits [51,52].

#### I.3.7.4.3 Codes OCDMA 2-D (OCDMA-Incohérent) :

Les codes bidimensionnels (*OCDMA 2-D incohérent*) permettent d'augmenter le nombre d'utilisateurs face aux codes unidimensionnels qui en possèdent un nombre limité. Plus le nombre d'abonnés dans un réseau est important, plus les interférences d'accès multiple (*MAI*) augmentent et plus le taux d'erreur binaire (*TEB*) augmente. Les auteurs [53,54] ont développé des codes 2-D à saut de longueur d'onde/étalement dans le temps (*Wavelength-Hopping/Time-Spreading : WH/TS*) qui donnent de meilleurs résultats par rapport aux systèmes 1-D et les systèmes hybrides OCDMA/WDM [55]. Ces codes améliorent beaucoup plus les performances du réseau et simplifient également le contrôle de la gestion du réseau en réduisant le temps de traitement ainsi que la complexité et le coût de la mise en œuvre.

Les codes bidimensionnels sont basés généralement sur des codes orthogonaux (*OOC*) et des codes premiers (*PC*). Parmi les variantes de codes 2-D, nous citons par exemple : le Multi-Wavelength OCC, le Wavelength-Hopping Prime Codes and Extended Wavelength-Hopping Prime Codes, l'OOC/PC codes, ...etc.

#### I.3.7.5 Encodeurs et décodeurs optiques pour l'OCDMA :

Dans l'OCDMA, plusieurs techniques d'encodages et de décodages permettent de générer et de reconnaître de manière fiable les séquences de code appropriées. Cependant la

mise en œuvre de ces dernières augmente le coût et la complexité des systèmes de transmission. Parmi les techniques les plus utilisées et appropriées dans ce type de multiplexage, on trouve les réseaux de Bragg (*Fiber Bragg Grating : FBG*), les Grilles de guides d'ondes (*Arrayed Waveguide Grating : AWG*) ainsi que les lignes optiques à retard (*Optical Fiber Delay Lines : OFDL*). La figure I-16, représente les différents dispositifs d'encodage et de décodage pour le système OCDMA.

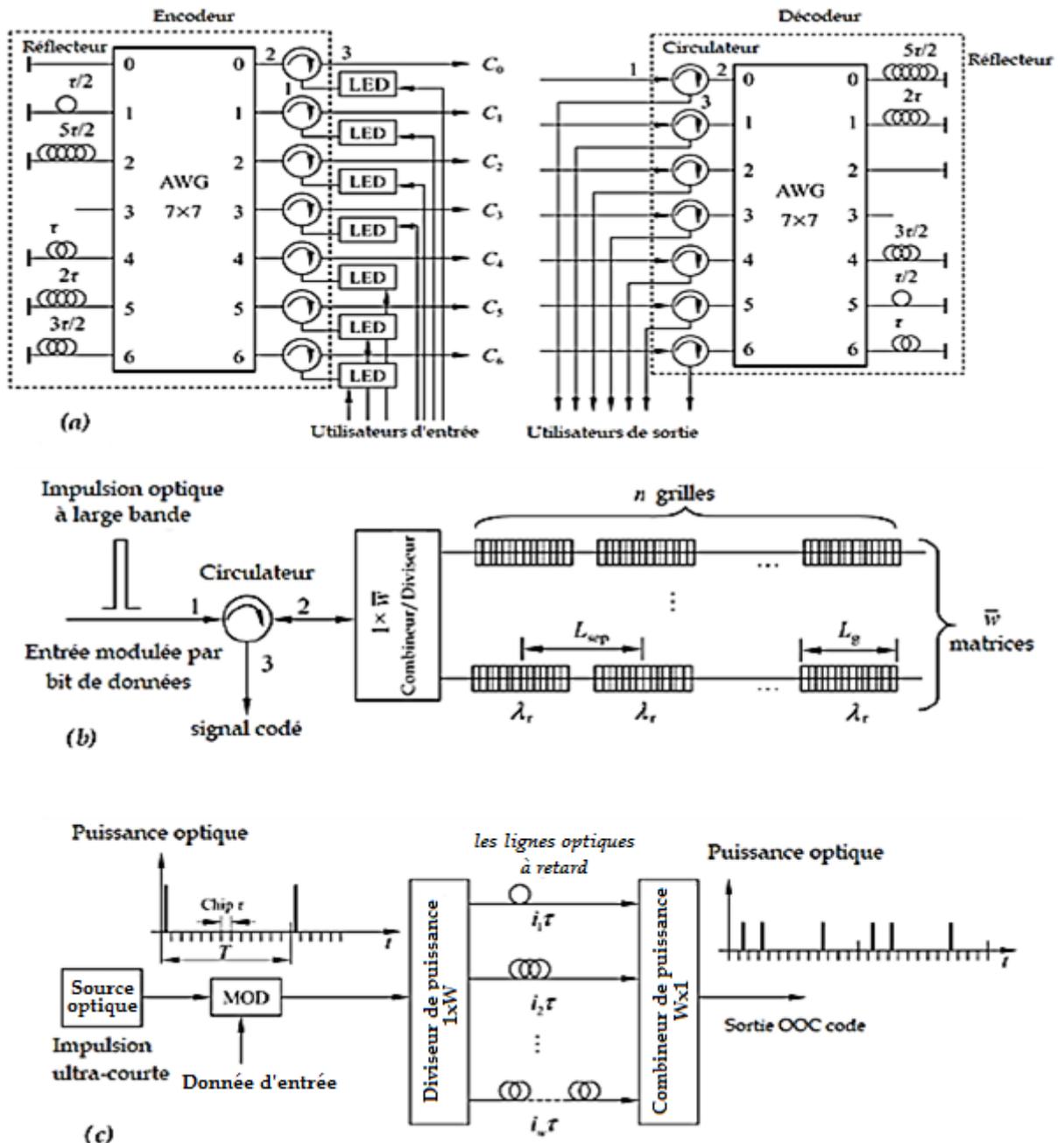


Figure I- 16 : Les différents dispositifs d'encodage et de décodage pour le système OCDMA : Encodage/Décodage AWG (a), Encodage/Décodage FBG (b), Encodage OFDL (c) [40].

### **I.3.7.6 Formats de modulation pour l'OCDMA :**

On distingue plusieurs formats de modulation optiques dans le système OCDMA, à savoir : le ASK (*Amplitude Shift Keying*), le PSK (*Phase Shift Keying*), le FSK (*Frequency Shift Keying*), et la modulation Tout-Ou-Rien (*On-Off-Keying : OOK*). L'OOK est un type identique au format RZ. Les formats de modulation plus utilisés dans ce contexte sont les formats de modulation NRZ-OOK et RZ-OOK et ce pour leurs bonnes performances du côté OSNR au niveau du récepteur [56].

### **I.3.7.7 Avantages et inconvénients de l'OCDMA :**

Le terme « *tout optique* » signifie que l'OCDMA utilise des composants optiques passifs faciles à intégrer dans les réseaux PON sans faire appel aux convertisseurs électriques/optiques (*E/O*). Parmi les avantages du multiplexage OCDMA, cette technique offre un haut niveau de sécurité et de confidentialité à cause de l'exploitation des codes orthogonaux pour chiffrer l'information. La connexion entre les utilisateurs se fait de manière asynchrone. Cette technique permet d'augmenter le transfert de données et assure la distribution simultanée de différents services « *triple play* » (*données, voix et vidéo*).

Les systèmes OCDMA souffrent de quelques limitations telles que :

- Il est difficile de faire la distinction entre les données et le bruit du canal entre les utilisateurs.
- La capacité à générer le maximum de codes est limitée.
- Correction d'erreur.
- L'impossibilité d'utiliser des codes bipolaires, contrairement au domaine de la radiofréquence.

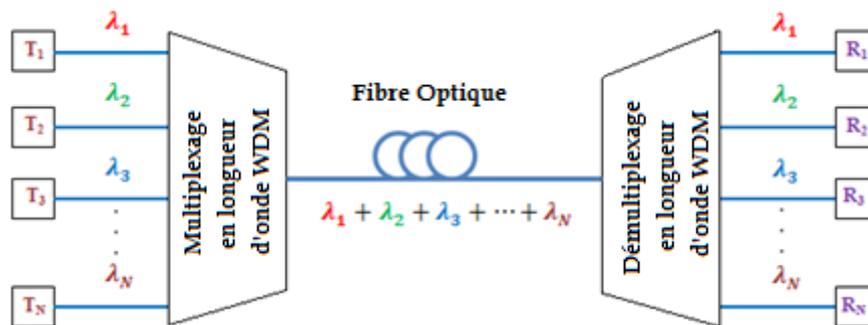
### **I.3.8 Le multiplexage en longueur d'onde WDM :**

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde (*Wavelength Division Multiplexing : WDM*) est une technique qui permet d'exploiter la totalité de la bande passante dans la fibre optique et d'augmenter la capacité du réseau. Avec le système WDM, les signaux ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ ) sont transmis sur la même fibre. Les signaux provenant de différentes sources sont combinés par un multiplexeur et ensuite introduits dans une fibre optique, cela signifie que chaque canal a sa propre bande passante dédiée et que tous les signaux arrivent en même temps au lieu d'être divisés et transmis dans des intervalles de temps. Ensuite, les canaux

combinés sont séparés dans l'unité de réception par un démultiplexeur et détectés par un photo-détecteur (voir figure I-17).

Le principal objectif du système WDM est d'augmenter le débit binaire et la distance de transmission, cependant il existe de nombreux problèmes pour le système WDM tels que les effets de diaphonies et les effets non linéaires du mélange à quatre ondes (*Four Wave Mixing : FWM*) et la modulation de phase croisée (*Cross Phase Modulation : XPM*), en raison de l'espacement entre les canaux (*1,6 nm ou 0,8 nm*) qui provoque des interférences entre les canaux adjacents qui peuvent être évitées [57].

Les amplificateurs optiques de type EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) sont indispensables afin de maintenir la puissance correcte du signal et de permettre un OSNR suffisant pour un taux d'erreur binaire (TEB) acceptable. Un autre problème majeur dans les systèmes WDM est la gestion de la dispersion ce que sollicite d'utiliser une fibre compensatrice DCF (*Dispersion Compensating Fiber*).



**Figure I- 17 : Le principe du multiplexage WDM.**

La norme ITU-T G 692 définit la plage de longueurs d'ondes dans la fenêtre de transmission de 1530 à 1565 nm (la bande C).

On peut calculer l'espacement entre les longueurs d'ondes selon la formule suivante :

$$v = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \Delta v = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \quad \text{Equation I.17}$$

Où :  $c$  : la vitesse de la lumière ;

$\Delta \lambda$  : la différence entre les longueurs d'ondes ;

$\Delta v$  : l'espacement entre les canaux.

Le multiplexage en longueurs d'onde se fait à l'aide d'un coupleur WDM (*composant optique*) ou multiplexeur de longueurs d'onde (*Mux*). La même chose pour le démultiplexage en longueurs d'onde qui se fait à l'aide d'un coupleur WDM ou démultiplexeur de longueurs d'onde (*Démux*).

*Remarque* : Certains types de composants sont symétriques et peuvent agir comme Mux ou Demux, d'autres pas.

### I.3.8.1 Principe de fonctionnement du multiplexage WDM :

Le multiplexage ou démultiplexage est basé sur deux mécanismes, il s'agit de la diffraction et de l'interférence. Les réseaux (*Grating*) de diffraction sont utilisés comme démultiplexeurs pour séparer les longueurs d'onde ou comme multiplexeurs pour les combiner (voir figure I-18).

L'interférence est une technique de filtrage des longueurs d'ondes soit par interférence constructive ou destructive.

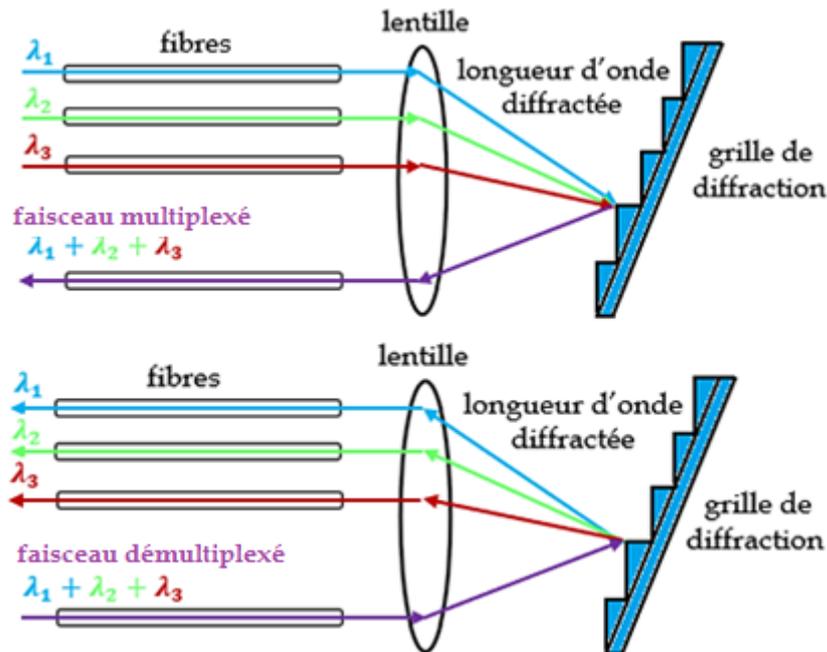


Figure I- 18 : Principe du multiplexage et démultiplexage par réseau de diffraction.

### I.3.8.2 Principaux types du multiplexage WDM :

Parmi les types de multiplexage, on trouve les réseaux de Bragg (*Fiber Bragg Grating* : *FBG*), l'interféromètre *Fabry-Pérot*, l'interféromètre *Mach-Zehnder*, les filtres interférentiels à couches diélectriques minces, les filtres acoustiques-optiques accordables ainsi que les Grilles de guides d'ondes (*Arrayed Waveguide Grating* : *AWG*). Les filtres transmettent certaines longueurs d'ondes et en réfléchissent d'autres, cependant les *AWG* et les interféromètres sont basés sur des coupleurs en entrée et d'autres en sortie (voir figure I-19).

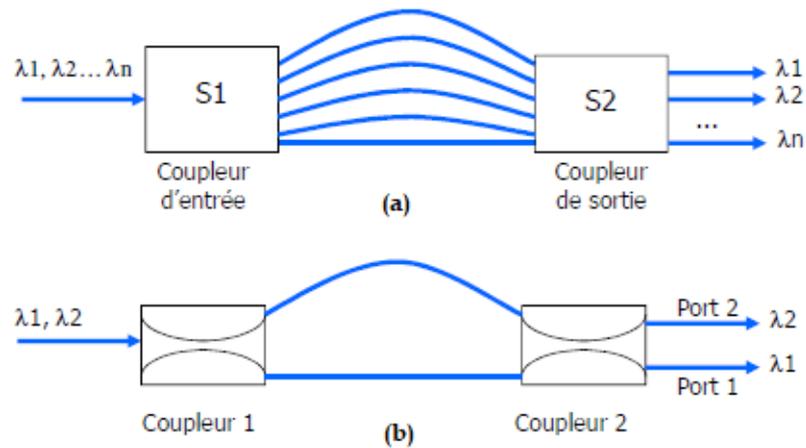


Figure I- 19 : Le principe de AWG (a) ; le principe de l'interféromètre Mach-Zehnder (b).

### I.3.8.3 Avantages et inconvénients du WDM :

Parmi leurs avantages, on trouve que le système WDM répond aux besoins de débits et de taux de partage dans le réseau d'accès. La limite imposée par le système TDM exige d'utiliser ce type de multiplexage en affectant une longueur d'onde pour chaque utilisateur. Ce dernier permet de supporter différents types de clients notamment le FTTx (*Fiber To The Home, Building, Cube, ...x*), xDSL, Wireless, Ethernet, SONET, ...etc.

L'inconvénient de ce type de multiplexage est qu'il exige des amplificateurs de type EDFA lorsque la distance augmente, ce dispositif est coûteux. Ce système est affecté aussi par les effets non-linéaires tels que le FWM, le XPM ainsi que le problème de la gestion de la dispersion chromatique (*Chromatic Dispersion : DC*) qui demande l'addition d'une autre fibre appelée fibre compensatrice DCF.

### I.3.9 Le multiplexage DWDM (*Dense-WDM*) :

Le DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) est une technique de multiplexage optique qui permet d'augmenter la capacité de la bande passante. Il fonctionne en combinant plusieurs longueurs d'ondes simultanément sur une seule fibre. L'espacement entre deux canaux (*c.à.d. entre deux longueurs d'ondes*) est d'environ  $0,8\text{nm}$  (100 GHz),  $0,4\text{ nm}$  (50 GHz),  $0,2\text{nm}$  (25 GHz) et  $0,1\text{ nm}$  (12,5 GHz). Les systèmes à 50 GHz ( $0,4\text{ nm}$ ) et à 25 GHz ( $0,2\text{ nm}$ ) permettent d'obtenir respectivement 80 et 160 canaux optiques. Autrefois, on utilisait des canaux espacés de  $0,8\text{ nm}$  (100 GHz), ce qui permet de compter environ 40 longueurs d'onde dans la bande C. Cette technologie reste la seule déployée dans les réseaux télécoms longue distance [58].

Le tableau I-1 et la figure I-20 ci-dessous, illustrent la grille et la bande (C et L) du DWDM, dont la grille représente les fréquences et les longueurs d'ondes centrales nominales.

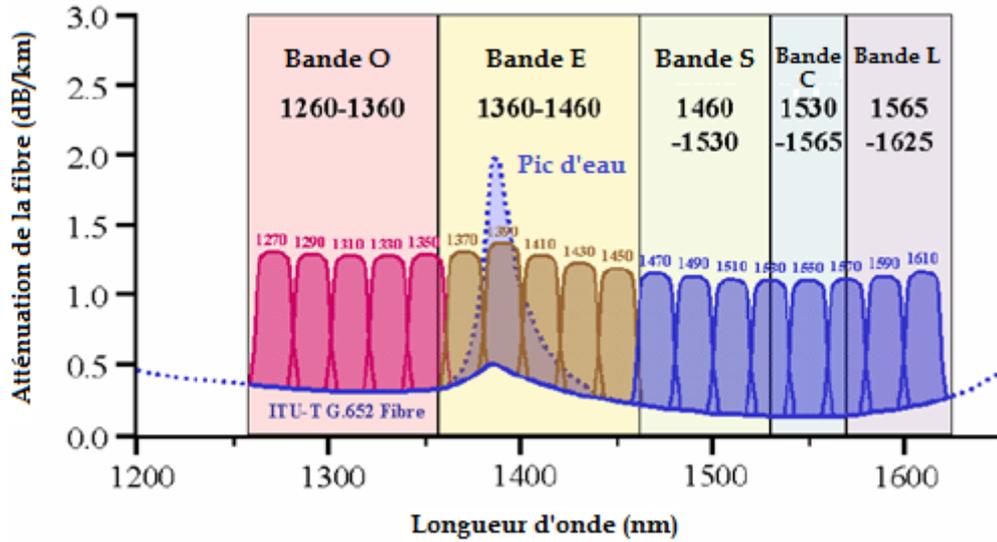


Figure I- 20 : Longueurs d'ondes DWDM (bande C et L).

Tableau I- 1 : La grille du DWDM [58].

Fréquences centrales nominales (GHz) pour espacements de :				Longueurs d'ondes centrales nominales approximatives (nm)
12,5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz	
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.33
195.8875	-	-	-	1530.43
195.8750	195.875	-	-	1530.53
195.8625	-	-	-	1530.63
195.8500	195.850	195.85	-	1530.72
195.8375	-	-	-	1530.82
195.8250	195.825	-	-	1530.92
195.8125	-	-	-	1531.02
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.12
195.7875	-	-	-	1531.21
195.7750	195.775	-	-	1531.31
195.7625	-	-	-	1531.41
195.7500	195.750	195.75	-	1531.51
195.7375	-	-	-	1531.60
195.7250	195.725	-	-	1531.70
195.7125	-	-	-	1531.80
195.7000	195.700	195.70	195.7	1531.90
195.6875	-	-	-	1532.00
195.6750	195.675	-	-	1532.09
195.6625	-	-	-	1532.19

### I.3.9.1 Avantages et inconvénients du DWDM :

Le DWDM présente le même avantage que le système WDM. Il répond aux besoins de débits et exploite largement la totalité de la bande passante à cause du petit espacement entre

les canaux (0.4, 0.2, 0.1 nm), il permet donc la circulation de plusieurs longueurs d'ondes jusqu'à atteindre 160 canaux.

Le DWDM minimise l'implantation des dispositifs ou des composants plus encombrants comme les répéteurs et les régénérateurs. On trouve plusieurs applications de ce type de multiplexage notamment l'utilisation dans le domaine sous-marin (*longue distance*), les réseaux WAN ainsi que le réseau dorsal (*backbone*).

Cette technologie présente des inconvénients, entre autres :

- La diaphonie entre les canaux à cause des petits espacements.
- Les effets non-linéaires comme le FWM et le XPM.
- Les longues distances qui exigent plusieurs amplificateurs optiques en ligne tel que l'EDFA qui coûte cher.
- La gestion de la dispersion, ...etc.
- Le format de modulation RZ qui nécessite un spectre de fréquence plus grand par rapport à un format de modulation NRZ. Cela limite la capacité totale de la fibre en exigeant un espacement accru entre les canaux adjacents dans ce système. Dans ce sens, une comparaison entre les deux formats de modulation sera discutée dans le troisième chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous abordons les systèmes hybrides tels que OTDM/WDM et leurs contributions à faire face à ces limitations tout en donnant de meilleures performances.

### **I.3.10 Le multiplexage U-DWDM (*Ultra-DWDM*) :**

Le multiplexage ultra DWDM (*U-DWDM*) est utilisé principalement dans les communications optiques sans fil, c'est une meilleure solution pour fournir des très hauts débits avec un faible taux d'erreurs binaire TEB. Il s'agit d'une technologie qui peut transmettre plusieurs signaux simultanément sur une seule fibre avec un espacement entre les canaux très étroit (0.4 nm soit 50 GHz, 0,1 nm soit 12,5 GHz). Le système à 12,5 GHz (0,1 nm) permet d'obtenir jusqu'à 400 canaux optiques dans la bande U (1625–1675 nm).

Donc ce système est très puissant, il demande des circuits programmables comme le FPGA (*Field Programmable Gate Array : FPGA*) et la DSP (*Digital Signal Processing : DSP*) pour des longues distances (*Long Haul*) par rapport au système DWDM [59].

Il est utilisé beaucoup plus dans les réseaux PON (*Passive Optical Network*), les réseaux sans fil et les réseaux sous-marins.

Les types de modulation les plus adaptés pour ce multiplexage sont la modulation d'amplitude en quadrature (*Quadrature Amplitude Modulation* : QAM) et la modulation par déplacement de phase en quadrature (*Quaternary Phase-Shift Keying* : QPSK) [59].

### I.3.11 Le multiplexage CWDM (*Coarse WDM*) :

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière (*Coarse Wavelength Division Multiplexing* : CWDM) est un schéma de multiplexage dont les longueurs d'onde sont combinées en un seul câble à fibre optique sans interférence (voir la figure I-21). C'est une bonne solution pour ajouter plus de services sur une seule sortie sans interrompre d'autres services aux clients. Le CWDM fonctionne à une largeur de bande plus élevée que le WDM, où la longueur d'onde de fonctionnement s'étend de 1270 nm à 1610 nm (bandes O, E, S, C, L) et couvre 18 canaux CWDM avec un espacement entre les canaux de 20 nm. Ce système est utilisé dans les réseaux locaux (LAN) et métropolitains (MAN) [60].

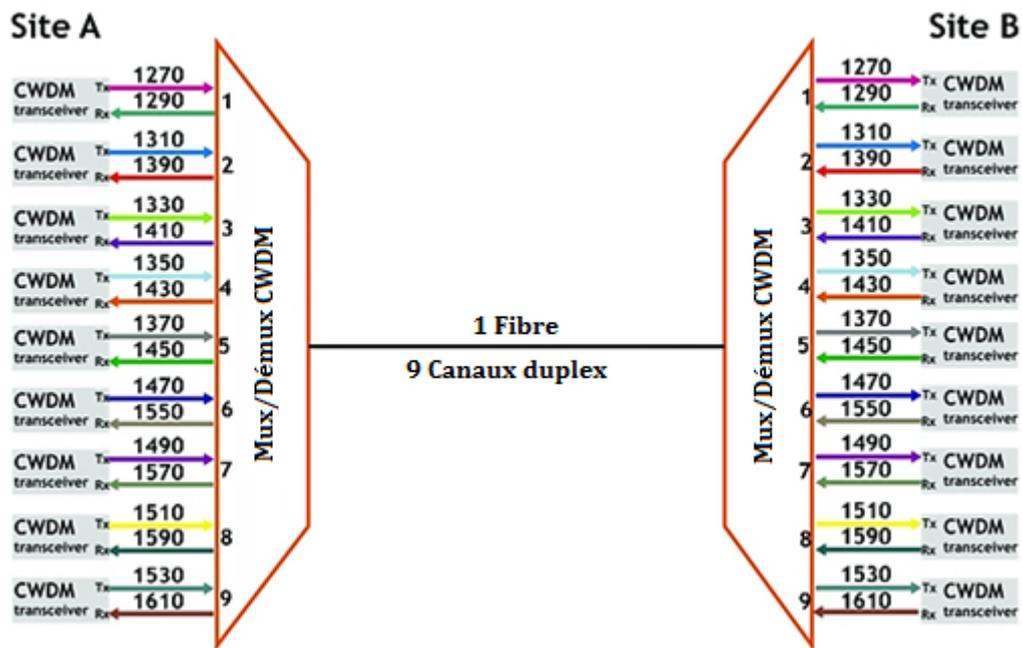


Figure I- 21 : Principe du Multiplexage CWDM.

L'idée de base du CWDM est l'utilisation des composants optiques à faible coût pour une transmission sans amplificateur. Le tableau I-2 montre la grille spécifiée par l'UIT-T G.692 sur toute la région spectrale.

Tableau I- 2 : La grille du CWDM [58].

Longueurs d'ondes centrales nominales (nm) Pour un espacement de 20 nm.
1270
1290
1310
1330
1350
1370
1390
1410
1430
1450
1470
1490
1510
1530
1550
1570
1590
1610

### I.3.11.1 Avantages et inconvénients du CWDM :

Comparé au DWDM, le CWDM offre moins de canaux que les systèmes DWDM cela permet d'économiser et de réduire le coût des composants notamment les amplificateurs, les lasers, ...etc. Ce système offre un grand avantage lors de la mise en œuvre dans le réseau d'accès optique.

Il est moins coûteux et consomme moins d'énergie qu'un système DWDM parce qu'il utilise des lasers non refroidis à faible coût c.à.d. les émissions laser se produisent sur huit canaux à huit longueurs d'onde définies (*en pratique, on utilise seulement 8 longueurs d'ondes*). La tolérance (*l'imprécision ou la variabilité de la longueur d'onde*) dans un laser CWDM va jusqu'à  $\pm 3$  nm, tandis que dans un laser DWDM, la tolérance est beaucoup plus serrée [61].

Dans le système CWDM, l'amplification n'est pas indispensable car les longueurs d'onde utilisées dans ce système ne sont pas affectées par le pic d'eau (*Water peak*) qui provoque une forte atténuation des longueurs d'onde proche de 1383 nm (*selon la recommandation de l'IUT Février 2006*) [61].

En termes de performances, il est à noter que le CWDM n'est pas à comparer avec la technologie DWDM basée sur la fibre optique de longue distance, mais plutôt avec certaines applications spécifiques (*capacité, flexibilité et faible coût*).

Ce système présente aussi plusieurs inconvénients, et parmi eux, on trouve :

- Le nombre de canaux limité.
- L'utilisation pour les courtes distances.
- Le domaine d'application de ce système n'est pas aussi vaste.

Il est largement utilisé dans les télécommunications (*réseaux FTTx, PON, EPON, GPON*), la radiodiffusion et la télévision (*Cable Television : CATV*), les réseaux d'entreprise, les réseaux de campus et d'autres domaines.

### **I.3.12 Le multiplexage en longueur d'onde étendu WWDM :**

Le multiplexage WWDM (*Wide Wavelength Division Multiplexing*) est une technique qui ressemble beaucoup au multiplexage CWDM mais il est restrictif car il n'autorise que quatre canaux au maximum à utiliser.

Le WWDM fonctionne à une largeur de bande qui s'étend de 1275,7 nm à 1349,2 nm (*bande O*) et couvre 4 canaux WWDM avec un espacement entre les canaux de 24,5 nm. Ce type de multiplexage est utilisé pour des fibres multimodes et monomodes.

### **I.3.13 Le multiplexage à insertion/extraction optique (OADM) :**

Le multiplexage *add-drop* optique (*Optical Add-Drop Multiplexing : OADM*) est un dispositif qui permet d'ajouter ou de supprimer des longueurs d'ondes multiplexées en attribuant une longueur d'onde pour chaque destination. Le but de l'utilisation de ce type de multiplexage est pour réduire le traitement du signal (*qui est effectué par d'autres dispositifs*) et la forte atténuation supportée par les amplificateurs optiques en simplifiant leurs configurations et en diminuant le coût total des réseaux afin de mettre « *le tout optique* ».

#### **I.3.13.1 Le principe de fonctionnement de l'OADM :**

L'OADM supprime sélectivement une longueur d'onde d'une quantité de longueurs d'onde dans une fibre sur le canal. Il ajoute ensuite dans la même direction de flux de données de la même longueur d'onde, mais avec un contenu de données différent. La figure I-22, illustre le principe de fonctionnement de l'OADM.

La facilité de mise en œuvre en réseau permet de gérer les systèmes d'anneaux DWDM et U-DWDM à cause de leurs capacités et distances.

On distingue deux types de l'OADM, il s'agit le FOADM (*multiplexage fixe à insertion/extraction optique*) et le ROADM (*multiplexage reconfigurable à insertion/extraction optique*) – voir figure I-22 [62].

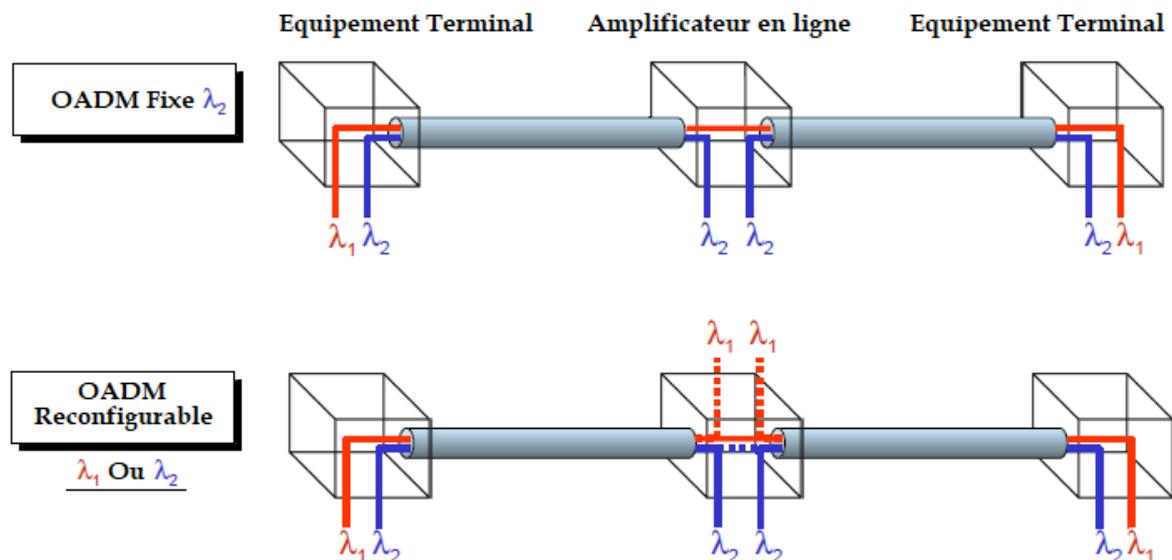


Figure I- 22 : Le principe de fonctionnement de l'OADM.

### I.3.13.2 Application de l'OADM :

Ce type de multiplexage est utilisé dans les systèmes de transmission longue distance en particulier dans les systèmes DWDM et U-DWDM conventionnels, aussi dans les réseaux étendus (WAN : *Wide Area Network*) grâce au faible coût et à la flexibilité.

L'OADM permet de commuter différentes longueurs d'ondes aux différents endroits grâce à la connexion optique croisée (*Optical Cross-Connect : OXC*). Il est adapté aux différentes connexions dynamiques de réseaux ainsi qu'aux standards ATM, SDH et les routeurs IP, ... etc.

### I.4 Comparaison :

Le tableau I-3, illustre une comparaison entre les différents types de multiplexage, cette comparaison tient compte des caractéristiques suivantes :

- *Le type de multiplexage (Analogique/Numérique).*
- *La capacité et la distance.*
- *Le coût.*
- *Espacement entre les longueurs d'ondes.*
- *Le type de code.*
- *L'encodage/le décodage.*
- *L'amplification.*

- *Le format de modulation.*
- *Le type de modulation.*
- *Le type de support de transmission (fibre, câble, sans fil, radio ... etc.).*
- *Avantages et inconvénients.*
- *Le domaine d'application.*

**Remarque:** Il est à noter que certains types de multiplexage ne sont pas à comparer avec d'autres technologies plus robustes tels que le DWDM et le U-DWDM basées sur l'utilisation d'une fibre optique de longue distance, mais plutôt avec certaines applications spécifiques notamment la capacité, la flexibilité, les avantages, les inconvénients, le domaine d'application et le faible coût.

**Tableau I- 3 : Comparaison entre les différents types de multiplexages.**

Type de multiplexage	Caractéristiques		
<b>TDM</b>	1. Multiplexage analogique et numérique.	2. Interférence faible ou négligeable.	3. Circuit plus simple.
	4. Utilise des impulsions pour la synchronisation.	5. Efficace et flexible.	6. Chaque canal possède la totalité de la BP.
	7. Utilisé pour les lignes téléphoniques RNIS ( <i>Réseau Numérique à Intégration de Service</i> ).	8. Utilisé pour le RTPC ( <i>Réseau Téléphonique Public Commuté</i> ) et l'ATM.	9. Complexe à mettre en œuvre.
<b>OTDM</b>	1. Bande passante flexible.	2. Surmonte l'effet non linéaire associé au WDM.	3. Très simple à mettre en œuvre.
	4. La capacité totale du réseau OTDM monocanal = DWDM.	5. Equipement de nœud terminal pas complexe.	6. Peut fonctionner à la fois : <i>1500 nm (comme WDM) en raison de l'EDFA et 1300 nm.</i>
	7. Utilisé dans les réseaux PON ( <i>Passive Optical Network</i> ).	8. Utilisé pour les systèmes hybrides OTDM/WDM.	9. Limité par la dispersion de la fibre en raison de l'utilisation des impulsions optiques <i>ultra-courtes</i> (~ 1ps).
<b>FDM</b>	1. Multiplexage analogique.	2. Plusieurs signaux sont transmis simultanément.	3. Processus de démodulation est facile.
	4. Pas de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur.	5. Bande de garde est requise.	6. Efficacité spectrale est faible.
	7. Utilisé dans la radiodiffusion FM et AM.	8. Utilisé pour les GSM ( <i>1G</i> ).	9. Besoin d'un canal à large bande passante.
<b>OFDM</b>	1. Codage numérique sous forme de multiples sous-porteuses.	2. Pas de chevauchement et d'interférences à cause de l'orthogonalité des sous-porteuses.	3. Haute efficacité spectrale.
	4. Economie de la BP par rapport au FDM.	5. Décodage nécessite une synchronisation très précise de la fréquence.	6. Utilise la transformée rapide inverse de Fourier ( <i>IFFT</i> ) à l'émission.
	7. Transmission de données à grande vitesse sur un canal dispersif.	8. Résume les multi-trajets.	9. Utilise la transformée rapide de Fourier ( <i>FFT</i> ) à la réception.
	10. Améliore le taux d'erreur binaire TEB.	11. Affecté par les distorsions non-linéaires.	12. Utilisé pour les WiMax, 4G, 5G, xDSL, WDM <i>1Tbit/s</i> .
<b>COFDM</b>	1. Utilise le codage correcteur d'erreur <i>LDPC</i> .	2. Meilleure efficacité spectrale.	3. Utilisé dans l'ADSL ( <i>Asymmetrical Digital Subscriber Line</i> ).

Chapitre I : Les différentes techniques de multiplexages optiques dans les télécommunications.

	4.Utilisé pour la compensation de la dispersion de mode de polarisation (PMD) dans la fibre.	5.Affecté par les distorsions non-linéaires.	6.Utilisé dans DVB-T2 ( <i>Digital Video Broadcasting Terrestrial</i> ).
	7.Meilleur pour les fibres monomodes (SMF).	8.Utilisé dans la transmission des données via des lignes électriques.	9.Utilisé dans DAB ( <i>Digital Audio Broadcasting</i> ).

Type de multiplexage	Caractéristiques		
CDM	1.La protection des données.	2.L'émetteur et le récepteur nécessitent un circuit électronique complexe.	3.Résistance aux interférences (IES).
	4.Une faible consommation d'énergie.	5.Multiplexage Numérique.	6.Utilisé pour les technologies 2G et 3G.
	7.Utilisé pour l'accès à haut débit via la norme EV-DO ( <i>Evolution Data Optimized</i> ).	8.Utilisé pour les systèmes radiofréquences ( <i>Micro-wave</i> ).	-
OCDMA	1.Utilise le mode asynchrone.	2.Augmente le nombre d'utilisateurs.	3.Sécurise les données via différentes façons de coder l'information.
	4.Gère efficacement la bande passante.	5.Technique tout optique qui <i>encode/décode</i> les signaux en utilisant des composants optiques passifs.	6.Utilisé dans les réseaux PON.
	7.Gère les données volumineuses ( <i>voix, vidéo, audio, ...etc.</i> ).	8.Assure la distribution simultanée de différents services « <i>triple play</i> » ( <i>données, voix et vidéo</i> ).	9.Utilise des codes optiques orthogonaux (OOC) à des fins de sécurité.
	10.Difficile de distinguer entre les données et le bruit du canal.	11.La capacité à générer le maximum de codes est limitée.	12.La correction d'erreur un peu complexe.
	13.Difficile d'utiliser des codes bipolaires.	14.Utilise des types de modulation : ASK, PSK, FSK et OOK.	-
WDM	1.Multiplexage analogique.	2.Exploite la totalité de la bande passante.	3.Augmente la capacité du réseau.
	4.Un débit très élevé ( <i>320 Gbps - 1.28 Tbps</i> ).	5.Utilise la bande C : <i>1530 à 1565 nm</i> .	6.Supporte jusqu'aux <i>32 longueurs d'ondes</i> .
	7.Utilise des dispositifs qui sont un peu coûteux.	8.Grand taux de partage dans le réseau d'accès.	9.Utilise des coupleurs ( <i>composants optiques</i> ) pour le multiplexage et démultiplexage.
	10.Utilise les réseaux de Bragg : <i>FBG</i> et les interféromètres : <i>Fabry-Pérot, Mach-Zehnder</i> .	11.Utilise les filtres interférentiels à couches diélectriques minces et les filtres acoustique-optique accordable.	12.Utilise les Grilles de guides d'ondes ( <i>Arrayed Waveguide Grating : AWG</i> ).

Chapitre I : Les différentes techniques de multiplexages optiques dans les télécommunications.

	13.Affecté par les effets de diaphonies et les effets non linéaires ( <i>FWM, XPM</i> ).	14.Existence des interférences entre les canaux adjacents dues au petit espacement entre les canaux.	15.Les amplificateurs optiques de type <i>EDFA</i> sont indispensables.
	16.Problème de la gestion de la dispersion.	17.Supporte différents types de clients notamment le <i>FTTx (Fiber To The Home, Building, Cube, ...x)</i> , <i>xDSL</i> , <i>Wireless</i> , <i>Ethernet</i> , <i>SONET</i> , ...etc.	18.Utilise le format de modulation <i>RZ</i> .

Type de multiplexage	Caractéristiques		
<b>DWDM</b>	1.Multiplexage analogique.	2.Exploite la totalité de la bande passante.	3.Augmente la capacité du réseau.
	4.Un débit très élevé ( <i>3 Tbps - 12 Tbps</i> ).	5.Utilise la bande C et L : <i>1530 à 1625 nm</i> .	6.Supporte jusqu'aux <i>160 longueurs d'ondes</i> .
	7.Minimise l'implantation des répéteurs et régénérateurs.	8.Utilise le format de modulation <i>NRZ</i> .	9.Déployé dans les réseaux télécoms longue distance.
	10.Utilisé dans le domaine sous-marin ( <i>longue distance</i> ).	11.Utilisé pour les réseaux WAN ainsi que le réseau dorsal ( <i>backbone</i> ).	12.Affecté par la diaphonie entre les canaux à cause des petits espacements.
	13.Les effets non-linéaires tels que le <i>FWM</i> et le <i>XPM</i> ne sont pas négligeables.	14.Les longues distances exigent plusieurs amplificateurs optiques en ligne tel que l' <i>EDFA</i> qui coûte cher.	15.Problème de la gestion de la dispersion.
<b>U-DWDM</b>	1.Multiplexage analogique.	2.Fournit des très hauts débits : <i>10 Tbps - 40 Tbps</i> .	3.Faible taux d'erreurs <i>TEB</i> .
	4.Utilise la bande U : <i>1625-1675 nm</i> .	5.Espacement entre les canaux très étroit : <i>0.4 nm et 0.1 nm</i> .	6.Supporte jusqu'au : <i>400 canaux optiques</i> .
	7.Augmente la capacité du réseau.	8.Très robuste qui demande des circuits programmables tels que : le <i>FPGA (Field Programmable Gate Array)</i> et la <i>DSP (Digital Signal Processing)</i> .	9.Utilisé pour des longues distances ( <i>Long Haul</i> ).
	10.Utilisé beaucoup plus dans les réseaux <i>PON (Passive Optical Network)</i> .	11.Utilisé dans les réseaux sans fil et les réseaux sous-marins.	12.Utilise les types de modulation suivants : la modulation d'amplitude en quadrature <i>QAM</i> et la modulation par déplacement de phase en quadrature <i>QPSK</i> .
<b>CWDM</b>	1.Multiplexage analogique.	2.Fournit des hauts débits : <i>2,5 Gbps - 5 Gbps</i> .	3.Fonctionne à une largeur de bande plus élevée que le <i>WDM, DWDM</i> et <i>U-DWDM</i> .

Chapitre I : Les différentes techniques de multiplexages optiques dans les télécommunications.

	4.Utilise les bandes O, E, S, C, L : 1270 nm - 1610 nm.	5.Couvre 18 canaux optiques ( <i>en pratique 8 canaux</i> ).	6.Espacement entre les canaux : 20 nm.
	7.Utilisé dans les réseaux locaux (LAN), les réseaux d'entreprise et métropolitains (MAN).	8.Utilise des composants optiques à faible coût pour une transmission sans amplification.	9.Offre un grand avantage lors de la mise en œuvre dans le réseau d'accès optique.
	10.Moins coûteux et consomme moins d'énergie qu'un système DWDM.	11.Utilise des lasers non refroidis à faible coût.	12.Longueurs d'onde utilisées ne sont pas affectées par le pic d'eau ( <i>Water peak</i> ).
	13.Le nombre des canaux est limité par rapport aux DWDM et U-DWDM.	14.Utilisé pour les courtes distances.	15.Utilisé dans les réseaux FTTx, PON, la radiodiffusion et la télévision (CATV).

Type de multiplexage	Caractéristiques		
WWDM	1.Multiplexage analogique.	2.Fournit des hauts débits : 2 Gbps - 4 Gbps.	3.Grande largeur de bande.
	4.Utilise la bande O : 1275,7 nm à 1349,2 nm.	5.Couvre 4 canaux optiques.	6.Espacement entre les canaux : 24,5 nm.
	7.Utilisé pour des fibres multimodes et monomodes.	8.Moins coûteux et consomme moins d'énergie.	9.Utilisé pour les courtes distances.
OADM	1.Dispositif qui permet d'ajouter ou de supprimer des longueurs d'ondes multiplexées.	2.Permet de réduire le traitement du signal ( <i>qui est effectué par d'autres dispositifs</i> ).	3.Réduit la forte atténuation supportée par des amplificateurs optiques.
	4.Simplifie la configuration des composants optiques.	5.Réduit le coût total des réseaux afin de mettre : « <i>le tout optique</i> ».	6.Flexible pour l'acheminement des longueurs d'ondes.
	7.Facile de mettre en œuvre et en réseau.	8.Permet de gérer les systèmes d'anneaux DWDM et U-DWDM.	9.Grande capacité.
	10.Utilisé dans des longues distances.	11.Facile à configurer.	12.Adapté aux standards ATM, SDH et les routeurs IP.

## **I.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons décrit les notions de base sur la fibre optique pour laquelle nous avons présenté toutes les caractéristiques de ce support de transmission, ensuite nous avons mis en évidence les différentes techniques de multiplexage optique, techniques qui sont utilisées soit dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel. Nous avons de même défini quelques codes et types d'encodage et de décodage pour le système OCDMA.

En dernier lieu, nous avons passé en revue la comparaison entre les différents types de multiplexage optique. Cette dernière a été basée sur certaines applications spécifiques notamment la capacité, la flexibilité, les avantages, les inconvénients, le domaine d'application et le faible coût.

Le second chapitre sera consacré au réseau PON et les systèmes hybrides notamment le WDM/OTDM, le WDM/OCDMA ainsi que l'OTDM/OCDMA. Dans ce chapitre, nous allons étudier en détail les caractéristiques de chaque système et lui adapter la technique appropriée qui permet l'intégration dans différents domaines d'applications et surtout dans le réseau PON.

*Chapitre II :*  
*Les réseaux PON et les*  
*techniques du multiplexage*  
*hybride.*

## II.1 Introduction :

La demande croissante de services intégrant la voix, les données et la vidéo a ouvert le chemin au développement de nouvelles techniques de transmission dans le but ultime de réaliser un réseau d'accès à large bande. Les réseaux optiques passifs (*PON*) constituent l'une des alternatives offertes aux opérateurs de télécommunications, ils permettent de délivrer des services interactifs à haut débit jusqu'au domicile. Ils ont été considérés comme étant la solution la plus économique avec l'introduction de la fibre optique dans les réseaux d'accès.

L'objectif de ce chapitre consiste à présenter les différents standards des réseaux passifs optiques (*PON*), ainsi qu'une étude détaillée des différents systèmes hybrides notamment le WDM/OTDM, le WDM/OCDMA et l'OTDM/OCDMA.

Dans un premier volet nous allons décrire les différentes architectures du réseau PON tels que : le TDM PON [A-PON (*ATM-PON*), B-PON (*Broadband-PON*), E-PON (*Ethernet-PON*), G-PON (*Gigabit-PON*)], le WDM PON ainsi que les FTTx (*Fiber To The x*) tels que : FTTH (*Fiber To The Home*), FTTB (*Fiber To The Building*), ...etc. Dans le second volet, nous aborderons la partie du multiplexage optique hybride, son architecture, son principe de fonctionnement dans les réseaux PON ainsi que les différents éléments constituant ce dernier tels que l'ONT (*Optical Network Termination*), l'OLT (*Optical Line Terminal*), l'ONU (*Optical Network Unit*), le splitter et nous présenterons les avantages et les inconvénients concernant le réseau PON et les systèmes hybrides [63].

Dans le troisième volet de ce chapitre nous présenterons une comparaison détaillée entre les différents types du multiplexage hybride.

## II.2 Les réseaux optiques passifs (*PON*) :

Le réseau optique passif (*PON*) est apparu depuis 25 ans. C'est un réseau qui transporte des données dans le domaine optique entre l'OLT et l'ONU où le chemin de transport du signal optique est passif. Afin de permettre une bonne compréhension du réseau d'accès, nous décrirons dans cette section, les différentes architectures et standards du réseau PON. On distingue trois architectures fréquemment utilisées dans le réseau d'accès, il s'agit de : [64]

1. L'architecture point à point (*P2P*).
2. L'architecture point à multipoint active (*P2M*).
3. L'architecture point à multipoint passive (*P2M-PON*).

### II.2.1 Architecture point-à-point (P2P) :

L'architecture point à point est une technique qui permet de raccorder  $N$  abonnés (*c.à.d.*  $N$  ONU) avec  $N$  fibres optiques reliant le central OLT. Chaque abonné est dédié d'une fibre optique provenant du central. Cette architecture est appelée aussi « *home run* ».

L'avantage de cette architecture est la possibilité de monter le débit et aussi d'éviter la complexité liée aux techniques de multiplexage (*en temps ou en longueur d'onde*). Dans ce type de réseau, il n'y a pas de partage des ressources matérielles en termes de fibres et d'émetteurs-récepteurs à l'OLT, elle assure une meilleure sécurité de données car la communication entre chaque abonné avec l'OLT est indépendante d'un utilisateur à un autre.

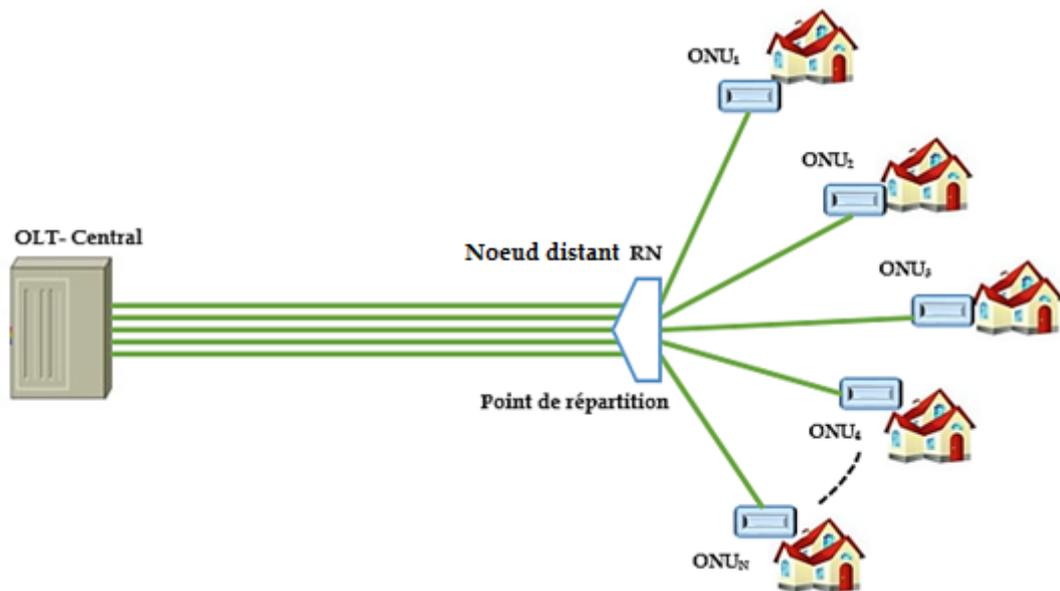


Figure II- 1 : Architecture point à point d'un réseau d'accès optique.

L'inconvénient de cette architecture est qu'elle demande un très grand nombre de fibres optiques et d'émetteurs-récepteurs optiques au niveau de l'OLT, ce qui engendre un coût très important.

### II.2.2 Architecture point à multipoint active (P2M) :

L'architecture point à multipoint active est une technique qui dépend d'un équipement Ethernet actif situé au RN (*Remote Node*) qui permet l'association des trafics provenant de plusieurs abonnés. La fibre optique entre le point de répartition RN et l'OLT est mutualisée entre plusieurs abonnés (*voir figure II-2*).

L'utilisation de cette architecture point à multipoint active est intéressante en raison de la bande passante disponible et de la portée qui peuvent être augmentées. Les interfaces Ethernet qui sont déjà standardisées permettent un grand choix des équipements.

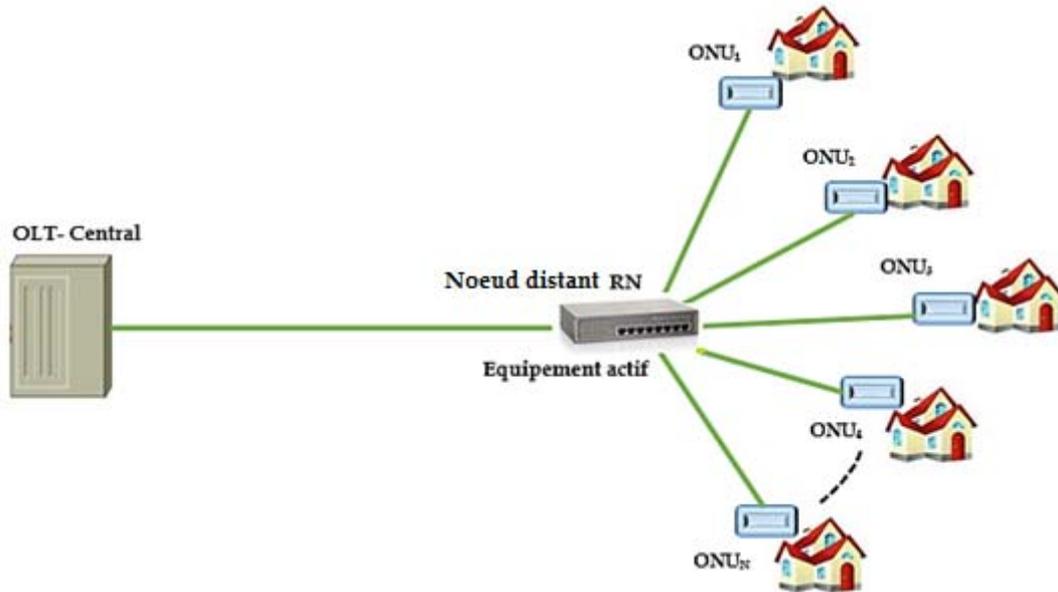
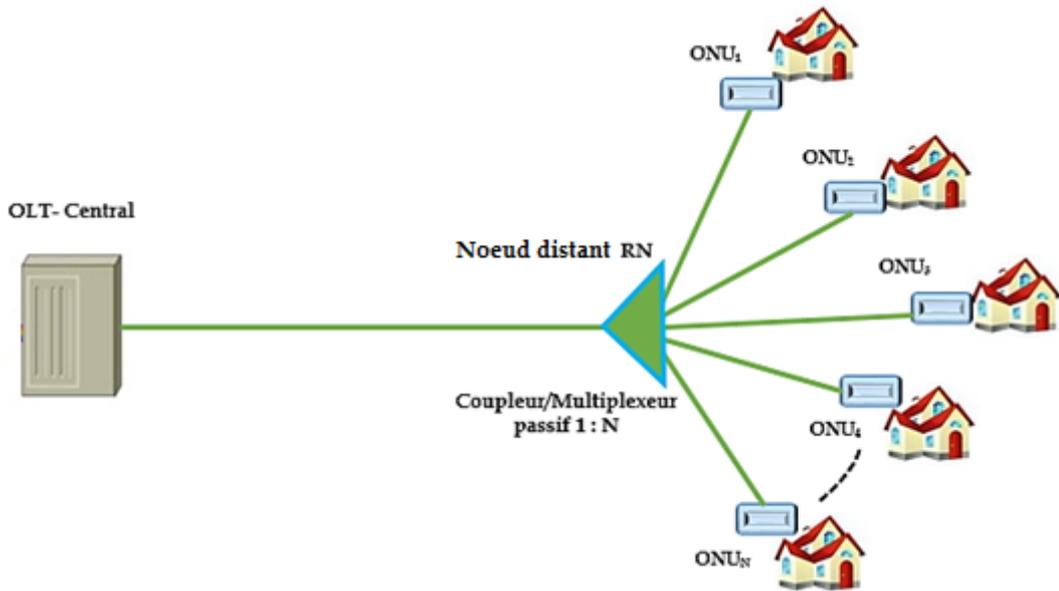


Figure II- 2 : Architecture point à multipoint actif d'un réseau d'accès optique.

L'inconvénient majeur de cette architecture, par contre, c'est la complexité d'opération c.à.d. l'alimentation électrique, l'installation, la maintenance et le coût élevé des équipements actifs.

### II.2.3 Architecture point à multipoint passive (P2M-PON) :

Dans cette architecture, la fibre optique entre l'OLT et le point de répartition RN est mutualisée entre plusieurs abonnés dont le partage se fait par des techniques de multiplexage optique (*en temps, en longueur d'onde, ou encodage, ... etc.*) ou bien des coupleurs optiques de 1 à  $N(1 : N)$ , celles-ci donnent le nom passif à cette architecture.



**Figure II- 3 : Architecture point à multipoint passif (P2M-PON) d'un réseau d'accès optique.**

Parmi les avantages de cette architecture, cette dernière est moins coûteuse du point de vue matériels par rapport à l'architecture active. Elle évite toutes les complexités liées au fonctionnement d'un équipement actif dans le réseau d'accès.

L'inconvénient de l'architecture PON est la complexité des techniques de multiplexage (*en temps, en longueurs d'onde, en code ...etc.*) ainsi que l'atténuation et la perte qui sont produites par des composants optiques passifs, et qui limitent donc la portée du réseau.

#### II.2.4 Différentes topologies du réseau PON :

Le réseau PON possède trois topologies, il s'agit de trois configurations de base (*anneau, arbre et bus*). La topologie la plus utilisée dans le réseau PON, c'est celle en arbre parce qu'elle possède un grand avantage en termes de la petite variation de la puissance du signal provenant de différentes stations. Cette topologie est considérée comme une fibre point à multipoint.

Dans la topologie en anneau, les stations sont enchaînées les unes aux autres pour former un anneau unidirectionnel. L'inconvénient de cette dernière est que si une station ONU tombe en panne, le réseau est complètement coupé (*voir la figure II-4*). Donc la solution est de mettre un réseau à double anneau.

Dans la topologie en bus, toutes les stations sont reliées à un support commun. L'inconvénient majeur de cette topologie c'est le problème de partage du support physique (*fibre optique*).

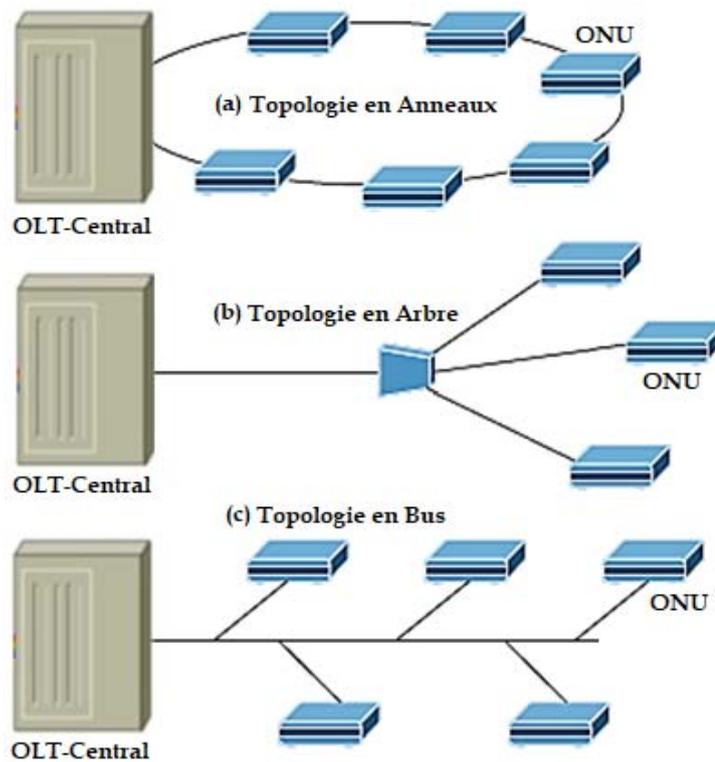


Figure II- 4 : Les topologies d'un réseau PON.

Il est à noter dans un réseau PON, qu'une telle configuration doit réduire la quantité de fibres et d'équipements au niveau du OLT-Central.

### II.2.5 La technologie de FTTx :

L'augmentation rapide du nombre d'utilisateurs d'internet a ouvert la porte à la technologie de la fibre optique en termes de ce que l'on appelle le réseau de distribution. Le FTTx (*Fiber To The x*, où *x* : *Home, Building, Curb, Street, Cabinet, ...etc.*) consiste à amener la fibre optique au plus près du client afin de disposer d'un grand débit et des nouveaux services comme la vidéo à la demande, la télévision à haute définition et de nombreux autres services exigeant le haut débit.

Les récents développements de la technologie de la fibre optique ont considérablement réduit les coûts et rendu la technologie de la fibre optique plus attrayante pour les opérateurs [64].

On distingue plusieurs types de FTTx, il s'agit de :

- FTTH : Fiber To The Home (*Fibre jusqu'au domicile*).
- FTTC : Fiber To The Curb (*Fibre jusqu'au trottoir*).

- FTTS : Fiber To The Street (*Fibre jusqu'à la rue*).
- FTTN : Fiber To The Node/Neighborhood (*Fibre jusqu'au répartiteur/quartier*).
- FTTB : Fiber To The Building (*Fibre jusqu'au bâtiment*).
- FTTCab: Fiber To The Cabinet (*Fibre jusqu'au sous-répartiteur*).
- FTTP : Fiber To The Premises (*Fibre jusqu'aux locaux*).
- FTTO : Fibre to The Office (*Fibre jusqu'au bureau*).
- FTTLA : Fiber To The Last Amplifier (*Fibre jusqu'au dernier amplificateur*).

1. **Le FTTH** : Le principe de FTTH est de relier directement le client particulier (*maison de foyer*) aux infrastructures de l'opérateur par une fibre optique partagée ou dédiée au client (*voir figure II-5*). Il utilise la technologie GPON (*Gigabit-PON*). Cette technologie offre de très haut débits, supérieurs à ceux de l'ADSL, permettant ainsi l'élimination de la saturation de la connexion en heures de pointe.

L'inconvénient de cette technique est que le développement de celle-ci est extrêmement coûteux et nécessite énormément de travaux de génie civil, surtout dans les zones rurales et éparses.

2. **Le FTTB** : Le FTTB est une technique de raccordement avec laquelle la fibre optique arrive jusqu'au bâtiment de l'abonné, dont le type de câble pour les derniers mètres c'est le cuivre et le câble coaxial. Cette technique permet de proposer des débits de *100 Mbit/s* pour des coûts nettement inférieurs à la fibre optique de bout en bout (*FTTH*).

3. **Le FTTC** : Cette technologie est très similaire au FTTN, mais l'armoire de rue est plus près de l'utilisateur, généralement à moins de *300 m*. Chaque client dispose d'une connexion via un câble coaxial ou une paire torsadée (*cuivre*).

4. **Le FTTN** : Cette technique dont la fibre arrive jusqu'au nœud est souvent considérée comme une étape intermédiaire vers le FTTH. Elle est actuellement utilisée par les fournisseurs de services de télécommunications pour fournir des services *triple play* avancés.

5. **Le FTTP** : Cette technique est utilisée dans plusieurs contextes, notamment dans le cas du FTTH et FTTB, ou lorsque le réseau de fibre comprend à la fois des foyers et des petites entreprises. Le FTTP peut être catégorisé en fonction de l'endroit où se termine la fibre optique.

Ci-dessous, nous définissons quelques terminologies pour le réseau PON qui seront utilisées par la suite :

- **OLT (Optical Line Terminal):** C'est un équipement de terminaison situé au bureau central (Central Office : CO) qui assure l'interface avec la fibre optique et qui gère les flux de trafic vers les abonnés ou en provenant de ceux-ci. L'OLT est le point d'extrémité en amont du réseau d'accès.
- **RN (Remote Node):** C'est un point de répartition qui distribue le signal optique provenant de l'OLT vers plusieurs abonnés et combine les signaux optiques provenant des abonnés vers l'OLT.
- **ONT (Optical Network Termination):** C'est un équipement optique situé chez les abonnés qui assure la fonction d'émission/réception des signaux optiques vers l'OLT ou en provenance de l'OLT. L'ONT est le point d'extrémité en aval du réseau d'accès.
- **ONU (Optical Network Unit):** Il est comme l'ONT mais situé dans le réseau où la fibre ne pénètre pas jusque chez les abonnés. L'échange des signaux entre les ONUs et les abonnés se fait via des paires en cuivre.
- **NT (Network Termination):** C'est un module situé chez les abonnés où la fibre ne pénètre que jusqu'à l'ONU.



Figure II- 5 : Les différents types de FTTx [65].

## II.2.6 TDM PON :

Le TDM PON est une technique du multiplexage temporel synchrone intégrée dans les réseaux optiques passifs (PON). Pour la transmission des données et des voix, il utilise une longueur d'onde de 1310 nm en amont (*upstream*) c.à.d. de l'ONU vers les OLT et une longueur de 1490 nm en aval (*downstream*) c.à.d. de l'OLT vers les ONU, dans une fibre optique bidirectionnelle ou en mode duplex. Les services CA-TV (*RF vidéo*) sont transmis uniquement dans un seul sens de l'OLT vers les ONU sur une longueur de 1550 nm.

Dans ce contexte, l'OLT est connecté aux ONU via un séparateur (*splitter*) de 1: N (1 :32, 1 :64, 1 :128). Il permet de contrôler et de gérer le trafic des abonnés en amont et en aval, il permet aussi l'attribution dynamique de la bande passante aux modules ONT (*Optical Network Termination*). La distance entre l'OLT et l'ONU est de 20 km.

Il est à noter que l'envoi de trafic dans le sens amont (*upstream*) de l'ONU vers l'OLT est un peu compliqué car tous les abonnés doivent partager la même longueur d'onde (c.à.d. 1310 nm), ceci engendre ce que l'on appelle « les collisions entre les transmissions ». Pour éviter ce problème, on utilise le protocole TDMA (*Time Division Multiple Access*) [66].

La figure II-6 ci-dessous, montre le principe de fonctionnement du TDM PON.

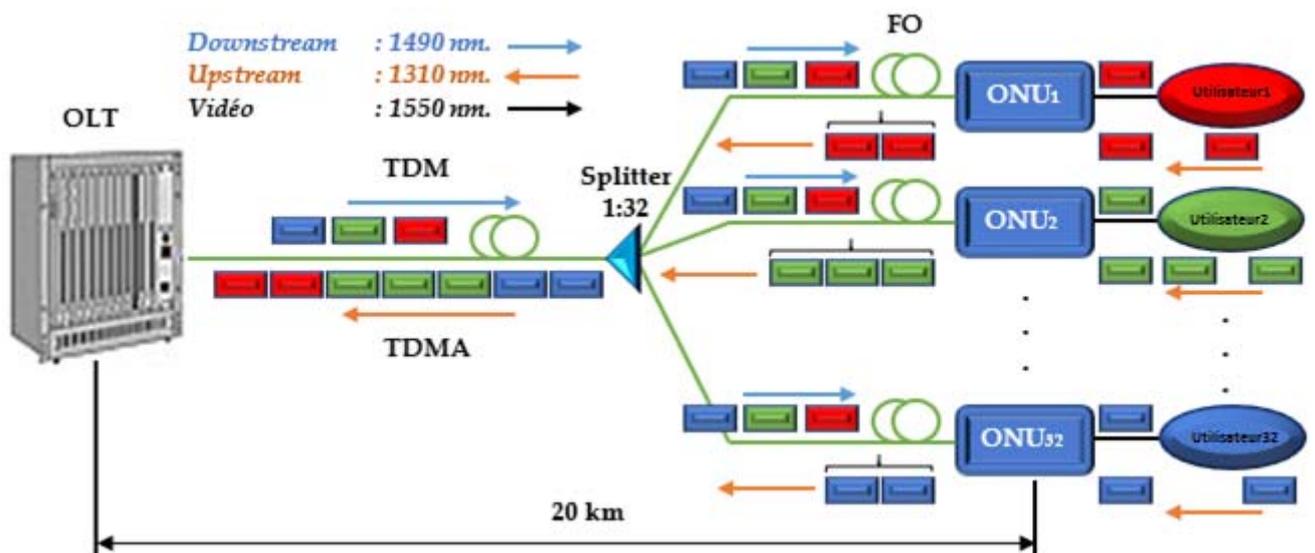


Figure II- 6 : Le principe de fonctionnement du TDM PON.

L'avantage de cette architecture (*TDM PON*) est que toutes les ONU peuvent fonctionner sur la même longueur d'onde ce qui nous donne une solution très rentable.

Dans le TDM PON, on trouve plusieurs standards à savoir :

- ATM PON (basé sur ATM également appelé Broadband PON : BPON).
- EPON (Ethernet PON).
- GPON (Gigabit PON).

### II.2.6.1 APON (ATM PON) :

L'ATM-PON est un premier standard du réseau PON basé sur l'ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). Il est conçu par le groupe de réseau d'accès à service complet (*FSAN : Full Service Access Network*), mais il a ensuite été nommé comme réseau optique passif à large bande (*Broadband PON : BPON*) par l'UIT-T afin de fournir des services à large bande (*accès Ethernet, la vidéo et les lignes louées à haut débit*). Ce système permet de combiner la technologie de multiplexage multimédia à plusieurs vitesses. Il est exprimé dans la recommandation de l'UIT-T G.983.1, composé d'un OLT et un ONU. Le BPON utilise des longueurs d'ondes en aval (*downstream*) allant de 1480 - 1580 nm et des longueurs d'ondes en amont (*upstream*) de 1260 - 1360 nm.

L'atténuation entre l'ONU et l'OLT est spécifiée dans le standard IUT-T G.982 en trois classes [67] :

1. Classe A : 5 - 20 dB.
2. Classe B : 10 - 25 dB.
3. Classe C : 15 - 30 dB.

Le tableau II-1, montre les différentes combinaisons de débit utilisées par l'approche APON en *aval/amont* [67] :

**Tableau II- 1 : Les combinaisons de débit en aval/amont pour le BPON (IUT-T G.983.1).**

N°	Downstream	Upstream
1.	155,52 Mbps	155,52 Mbps
2.	622,08 Mbps	155,52 Mbps
3.	622,08 Mbps	622,08 Mbps
4.	1 244,16 Mbps	155,52 Mbps
5.	1 244,16 Mbps	622,08 Mbps

La figure II-7, montre le principe de fonctionnement du BPON (*Broadband PON*) basé sur l'ATM.

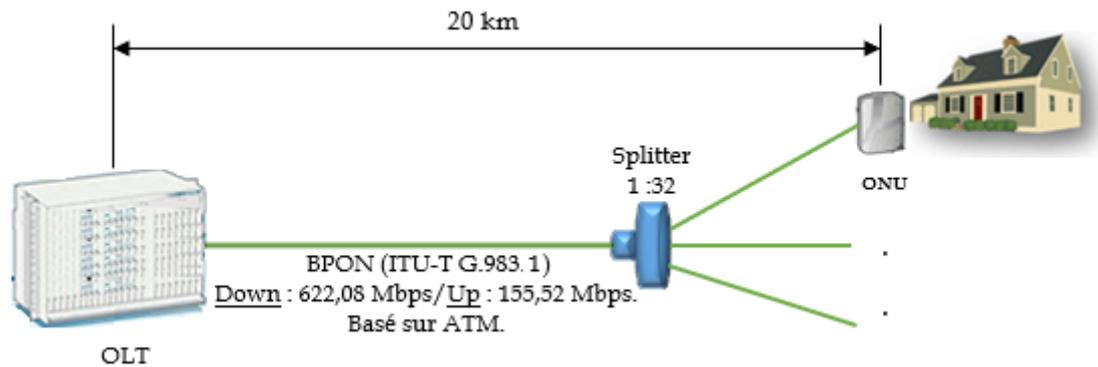


Figure II- 7 : Le principe du BPON.

### II.2.6.2 EPON (Ethernet PON) :

L'EPON (*Ethernet PON*) est une nouvelle approche de la famille Ethernet. Il a été développé en Septembre 2004 par le groupe d'étude *IEEE 802.3 ah* [67].

L'Ethernet PON exploite la technique TDM dans le sens aval (*downstream*) et la technique TDMA pour le sens amont (*upstream*). Il est basé sur le codage en bloc 8B10C et utilise un débit de 1250 Mbps dans les deux sens amont et aval (*symétrique*).

Il utilise une longueur d'onde en aval (*downstream*) de 1490 nm et en amont (*upstream*) de 1310 nm pour transmettre les données. Pour la distribution de la télévision (*uniquement dans le sens aval*), une longueur d'onde de 1550 nm est utilisée. Il est constitué d'un OLT, un ONU et un splitter (*Séparateur*) de 1:64 au maximum c.à.d. il peut atteindre au max 64 ONUs.

L'atténuation entre l'ONU et l'OLT est spécifiée dans le standard IUT-T G.982 en deux catégories [67] :

1. **PX10 (débit de 1 Gbps jusqu'à 10 km) :**
  - Downstream : 21 dB.
  - Upstream : 23 dB.
2. **PX20 (débit de 1 Gbps jusqu'à 20 km) :**
  - Downstream : 26 dB.
  - Upstream : 26 dB.

La figure II-8, montre le principe de fonctionnement de l'EPON (*Ethernet PON*) basé sur l'Ethernet.

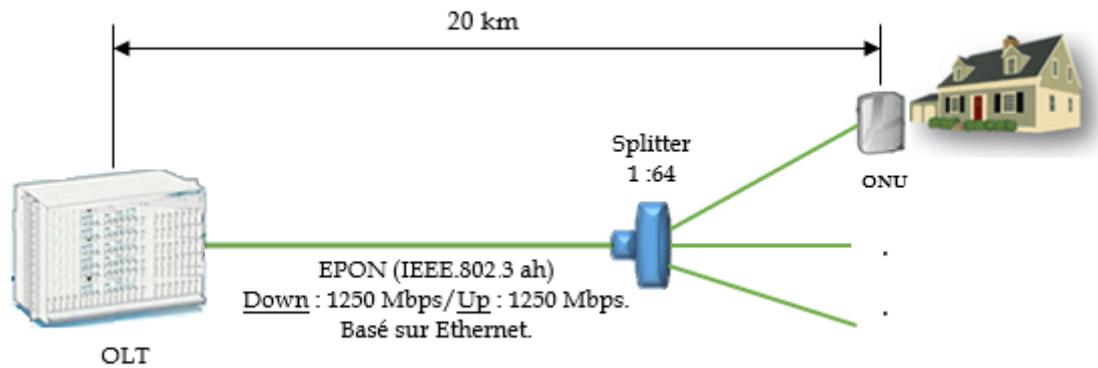


Figure II- 8 : Le principe de l'EPON.

### II.2.6.3 GPON (Gigabit PON) :

Le GPON est une approche du réseau PON, il appartient à la norme IUT-T G.984.x. Il utilise une longueur d'onde en aval (*downstream*) de 1490 nm et en amont (*upstream*) de 1310 nm pour transmettre les données. Pour la distribution de la télévision (*uniquement dans le sens aval*), une longueur d'onde de 1550 nm est utilisée. Ce dernier utilise un débit en aval (*downstream*) de 2488,32 Mbps et 1244,16 Mbps en amont (*upstream*).

Les paquets du système GPON gèrent les paquets ATM qui utilisent la méthode d'encapsulation pour transporter d'autres protocoles (*Ethernet, IP, TCP, UDP, T1/E1, vidéo, VoIP*). Le chiffrement du GPON est du type AES (*Advanced Encryption Standard : AES*) pour la sécurisation des données dans le sens aval (*downstream*) de l'OLT vers l'ONU.

Le GPON pratique généralement le multiplexage en longueur d'onde (*WDM*), il est constitué d'un OLT, un ONU et un splitter (*Séparateur*) de 1:128 au maximum c.à.d. il peut atteindre au max 128 ONUs. Il pratique le protocole TDMA (*Time Division Multiple Access*) dans le sens amont (*upstream*) de l'ONU vers l'OLT afin d'éviter ce qu'on appelle « *les collisions entre les transmissions* » [66].

L'atténuation entre l'ONU et l'OLT est spécifiée dans le standard IUT-T G.982 en trois classes [67] :

1. Class A : 20 dB.
2. Class B : 25 dB.
3. Class C : 30 dB.

La figure II-9, montre le principe de fonctionnement du GPON basé sur l'Ethernet et/ou le TDM.

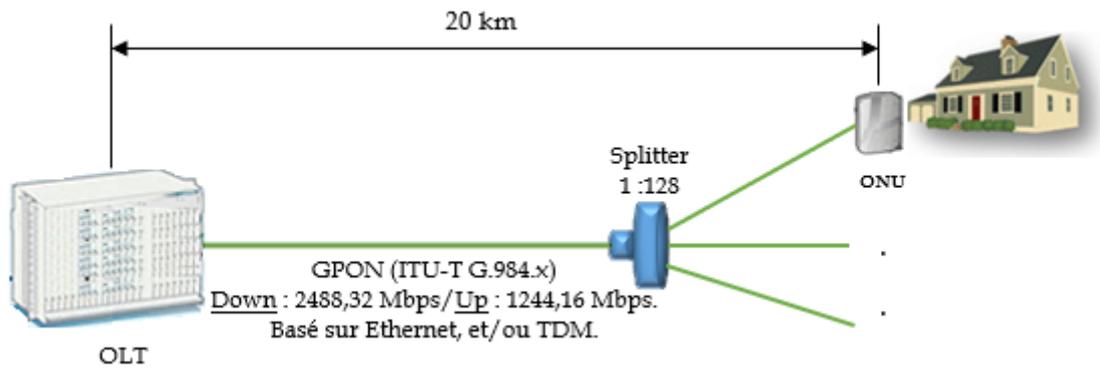


Figure II- 9 : Le principe du GPON.

#### II.2.6.4 10 GEAPON :

Le 10 GEAPON est une approche du réseau PON, il appartient à la norme IEEE 802.3 av, il a été développé en 2009. Il comporte deux architectures, architecture symétrique (10 Gbps down/10 Gbps up) et une architecture asymétrique (10 Gbps down/1 Gbps up).

Il utilise trois plages de longueurs d'onde en aval (*downstream*) de 1550 nm-1560 nm pour la transmission de la vidéo, de 1480 nm-1500 nm avec un débit de 10 Gbps et de 1575 nm-1580 nm, avec un débit de 10 Gbps pour la transmission des données qui sont multiplexées ensemble dans la fibre [67].

Dans le sens amont (*upstream*), les ONU de 1 Gbps transmettent des paquets à une plage de longueurs de 1260-1360 nm, les ONU de 10 Gbps transmettent aussi des paquets à une bande de 1260-1280 nm. Ce type de réseau est basé sur l'Ethernet et est constitué d'un OLT, un ONU et un splitter (*Séparateur*) de 1 :128 au maximum sur une distance ODN de 20 km.

Le budget de liaison le plus utilisé est le PX20 qui correspond aux ODNs EPON 1Gbps actuellement déployés :

➤ **PX20 (débit de 1 Gbps jusqu'à 20 km) :**

- Downstream : 26 dB.
- Upstream : 26 dB.

La figure II-10, montre le principe de fonctionnement du système 10 GEAPON (10 Gigabit Ethernet PON) basé sur l'Ethernet.

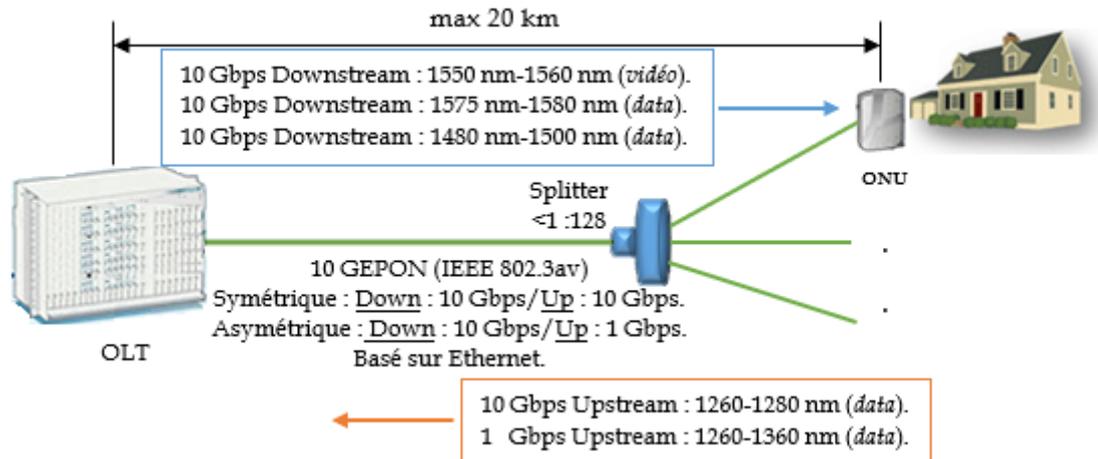


Figure II- 10 : Le principe du 10 GEPON.

**Remarque :** le réseau 10 GEPON peut coexister sur la même fibre avec le système EPON (1 GEPON).

### II.2.6.5 XG-PON :

Le XG-PON est une approche similaire du GPON, il a été développé en 2010 sous la norme IUT-T G.987.1 par le groupe FSAN (FSAN : Full Service Access Network). Ce standard était appelé au début XG-PON1, il présente un débit en aval (*downstream*) de 9,95328 Gbps (10 Gbps) et en amont (*upstream*) un débit de 2,48832 Gbps (2,5 Gbps). Il utilise une longueur d'onde en aval (*downstream*) de 1490 nm (entre 1480 nm-1500 nm), et en amont (*upstream*) de 1310 nm (entre 1290 nm-1330 nm) pour transmettre les données. Pour la distribution de la télévision, une longueur d'onde de 1550 nm est utilisée.

Ce type de réseau a pour but d'anticiper la croissance des volumes de données et d'offrir des très hauts débits aux abonnés FTTH (*Fiber To The Home*), il utilise le TDM dans le sens aval de l'OLT vers l'ONU et le TDMA dans le sens amont de l'ONU vers l'OLT afin d'éviter ce qu'on appelle les collisions entre les transmissions. Il peut atteindre au maximum 256 ONUs.

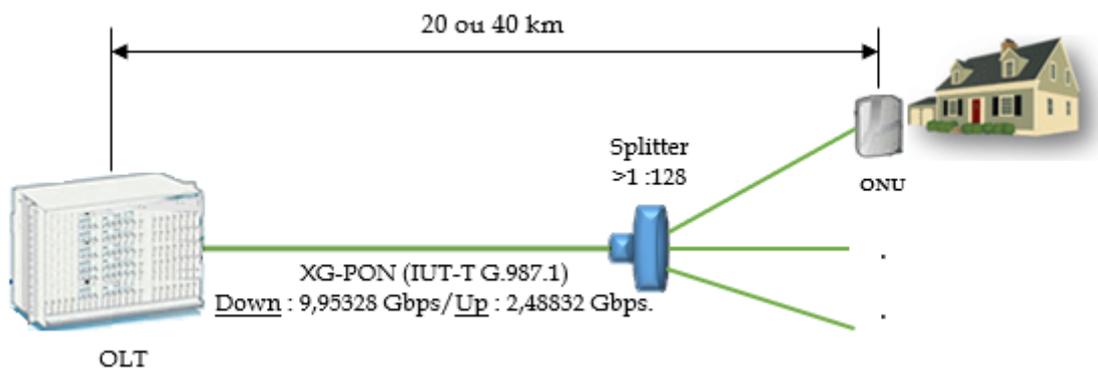


Figure II- 11 : Le principe du XG-PON.

L'atténuation entre l'ONU et l'OLT est donnée selon quatre catégories, à savoir [69] :

- 1<sup>ère</sup> classe :
  - Aval (*Downstream*) : 14 dB.
  - Amont (*Upstream*) : 29 dB.
- 2<sup>ème</sup> classe :
  - Aval (*Downstream*) : 16 dB.
  - Amont (*Upstream*) : 31 dB.
- 3<sup>ème</sup> classe :
  - Aval (*Downstream*) : 18 dB.
  - Amont (*Upstream*) : 33 dB.
- 4<sup>ème</sup> classe :
  - Aval (*Downstream*) : 20 dB.
  - Amont (*Upstream*) : 35 dB.

#### II.2.6.6 XGS-PON :

Le XGS-PON est une approche similaire du XG-PON, il a été développé en 2016 sous la norme IUT-T G.9807.1, c'est une version symétrique du GPON à bande passante plus élevée. Son premier déploiement à grande échelle était en 2018, avec un débit symétrique en aval (*downstream*) de 10 Gbps et en amont (*upstream*) un débit de 10 Gbps. Sa longueur d'onde en aval (*downstream*) est de 1577 nm (*entre 1575 nm-1580 nm*) et en amont (*upstream*) de 1270 nm (*entre 1260 nm-1280 nm*) pour transmettre les données. Il profite du TDM dans le sens aval de l'OLT vers l'ONU et le TDMA dans le sens amont de l'ONU vers l'OLT. Il peut atteindre au maximum 256 ONUs avec une distance de l'ODN de 100 km.

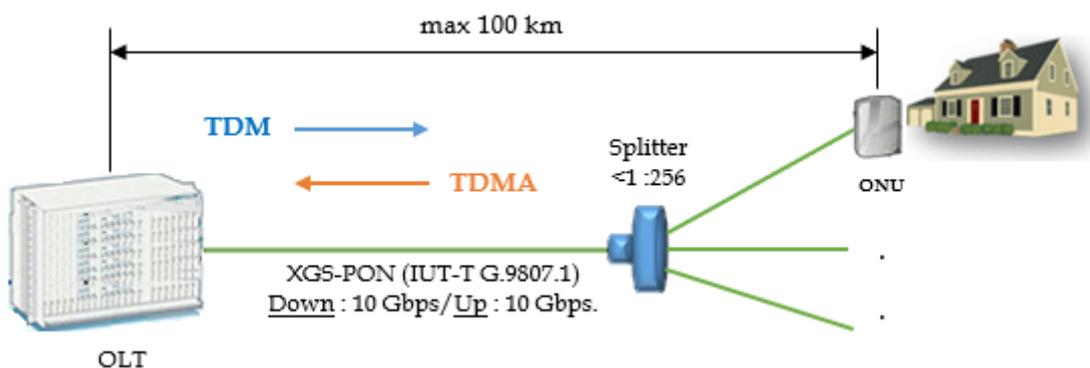


Figure II- 12 : Le principe du XGS-PON (P2MP).

Le XGS-PON fonctionne sur des ODN à une perte nominale de 28/29 dB [norme IUT-T G.9807.1].

### II.2.6.7 NG-PON2 :

Le NG-PON2 a été développé en 2015 par le groupe FSAN sous la norme IUT-T G.989. Il utilise le multiplexage en longueur d'onde WDM dans le cas de la topologie P2P (*Point-to-Point*) ainsi que les multiplexages hybrides TWDM (*Time and Wavelength Division Multiplexing*) et TWDMA (*Time and Wavelength Division Multiplexing Access*) dans le cas de la topologie P2MP (*Point-to-Multipoint*). Ce standard présente un débit en aval (*downstream*) de 40 Gbps pour les deux topologies (*P2P et P2MP*) et en amont (*upstream*) un débit de 40 Gbps pour la topologie *P2P* et 10 Gbps pour la topologie *P2MP* [70].

Le tableau II-2, définit la plage des longueurs d'ondes utilisées dans le NG-PON2 selon la source : IUT-T G.989.2 (08/2019).

**Tableau II- 2 : Plage des longueurs d'ondes utilisées pour le NG-PON2.**

	Downstream	Upstream
NG-PON2 WDM (P2P)	1603-1625 nm ( <i>partagé</i> )	1524-1625 nm ( <i>étendu</i> )
NG-PON2 TWDM (P2MP)	1596-1603 nm	1524-1544 nm ( <i>large</i> ) 1528-1540 nm ( <i>réduit</i> ) 1532-1540 nm ( <i>étroit</i> )

Ce type de réseau est nécessaire généralement pour la transmission de la télévision ultra-haute définition, les services de vidéo à la demande, les services tels que le Cloud (*Nuage*) ainsi que les opérateurs de la technique Fronthaul Mobile de la 5G.

On constate que le débit a été multiplié par 4 en passant du XG-PON au NG-PON2, ce qui lui permet de coexister aussi bien avec le GPON, le XGPON et le XGS-PON [70].

L'atténuation entre l'ONU et l'OLT est donnée pour quatre catégories selon le standard IUT-T G.989.2 (08/2019) :

**Tableau II- 3 : L'atténuation entre l'ONU et l'OLT.**

	Classe N1	Classe N2	Classe E1	Classe E2
Atténuation minimale	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Atténuation maximale	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB

Le NG-PON2, peut atteindre 64 ONUs avec une distance maximale de 40 km de l'ODN (*Optical Distribution Network : ODN*).

La figure II-13 et II-14, illustrent deux architectures, il s'agit du NG-PON2 TWDM (*P2MP*) et du NG-PON2 WDM (*P2P*). Ces techniques nécessitent les éléments suivants : un

OLT, un ONU, un séparateur (*Splitter*) de puissance et de longueur d'onde, des multiplexeurs WDM, des AWG, ...etc.

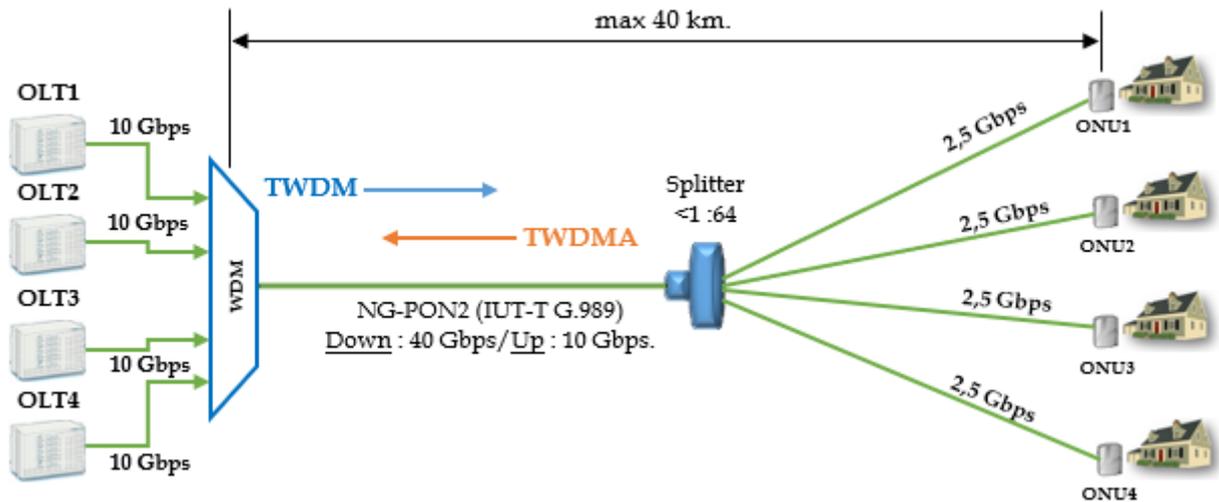


Figure II- 13 : Le principe du NG-PON2 TWDM (P2MP).

Dans la figure II-13, le multiplexage par répartition en longueur d'onde (*WDM*) est utilisé dans le sens aval (*downstream*) en combinant quatre lasers OLT à une longueur d'onde fixe puis leur transmission dans une même fibre. A la réception, chaque ONU filtre la longueur d'onde appropriée à chaque utilisateur. Dans le sens amont (*upstream*), des lasers accordables à chaque ONU sont attribués dynamiquement à une longueur d'onde, l'ensemble fournissant un débit de 2,5 Gbps [71].

La figure II-14, montre le principe du NG-PON2 WDM (P2P). Cette architecture point à point est basée sur un multiplexeur en longueur d'onde WDM dans le sens aval et la grille AWG (*séparateur de longueur d'onde*) dans le sens amont, avec un débit symétrique de 40 Gbps sur une distance de l'ODN entre 20 et 60 km.

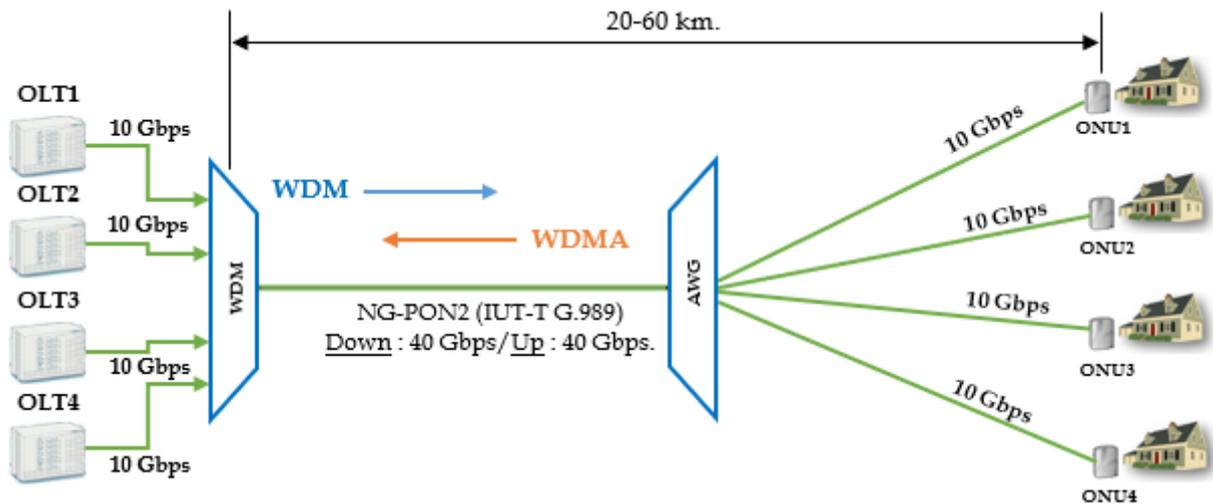


Figure II- 14 : Le principe du NG-PON2 WDM (P2P).

**Remarque 1 :** le réseau NG-PON2 peut coexister sur la même fibre avec d'autres réseaux à savoir : le GPON, le XG-PON (XG-PON1) et le XGS-PON.

**Remarque 2 :** Il existe une autre approche du réseau PON, en étude, appelée le **G.hsp.50G** (recommandation IUT-T associé avec la norme IEEE P802.3 ca), en cours de développement, prévue pour Septembre 2020.

#### II.2.6.8 Comparaison entre les différents standards du réseau PON :

Le tableau II-4, illustre une comparaison entre les différents types de réseaux PON, cette comparaison tient compte des caractéristiques suivantes :

- Le standard (la recommandation).
- Le débit montant et descendant.
- La longueur d'onde montante (upstream) et descendante (downstream).
- La distance physique entre l'OLT et l'ONU (distance ODN).
- Le nombre des ONU/utilisateurs (max Split).
- Le débit garanti par utilisateur.
- Le budget de liaison.
- La coexistence.
- Le domaine d'application.

**Remarque :** Cette comparaison concerne uniquement les réseaux PON (BPON, EPON, GPON, ...etc.) et non pas les systèmes hybrides. Le volet suivant est dédié à l'étude des types de réseaux PON à savoir le WDM PON, le CWDM PON, le DWDM PON, l'OCDMA PON, l'OTDM PON, l'OFDM PON ainsi que les systèmes hybrides tels que l'OTDM/WDM-PON, l'OCDMA/WDM-PON et l'OTDM/OCDMA-PON.

Tableau II- 4 : Comparaison entre les différents réseaux PON. [66,67,68,69,70,71]

	BPON	EPON	GPON	10 G-EPON	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2
<b>Standard</b>	IUT-T G.983.1.	IEEE 802.3 ah.	IUT-T G.984.x.	IEEE 802.3 av.	IUT-T G.987.1.	IUT-T G.9807.1.	IUT-T G.989.
<b>Débit descendant (down)</b>	622,08 Mbps.	1,250 Gbps.	2,488 Gbps.	Sym. : 10 Gbps. Asym. : 10 Gbps.	10 Gbps.	10 Gbps.	<u>P2MP</u> :40 Gbps. <u>P2P</u> : 40 Gbps.
<b>Débit montant (up)</b>	155,52 Mbps.	1,250 Gbps.	1,244 Gbps.	Sym. : 10 Gbps. Asym. : 1 Gbps.	2,5 Gbps.	10 Gbps.	<u>P2MP</u> :10 Gbps. <u>P2P</u> : 40 Gbps.
<b>Longueur d'onde descendante (down)</b>	1480 - 1580 nm.	1490 nm.	1490 nm.	Sym. : 1575 - 1580 nm. Asym. : 1480 - 1500 nm.	1490 nm.	1577 nm.	<u>P2MP</u> : 1596-1603 nm. <u>P2P</u> : 1603-1625 nm.
<b>Longueur d'onde montante (up)</b>	1260 - 1360 nm.	1310 nm.	1310 nm.	Sym. : 1260 - 1280 nm. Asym. : 1260 - 1360 nm.	1310 nm.	1270 nm.	<u>P2MP</u> : 1524-1544 nm (large). 1528-1540 nm (réduit). 1532-1540 nm (étroit). <u>P2P</u> : 1524-1625 nm (étendu).
<b>Longueur d'onde descendante vidéo (down)</b>	1550 nm.	1550 nm/IP.	1550 nm/IP.	1550 - 1560 nm/IP.	1550 nm/IP.	1550 nm/IP.	1550 - 1560 nm/IP.
<b>Distance ODN</b>	20 km.	20 km.	20 km.	20 km.	20 - 40 km.	100 km.	<u>P2MP</u> : 40 km. <u>P2P</u> : 20 - 60 km.
<b>Nombre d'utilisateurs (max split)</b>	32/64.	64.	128.	128.	256.	256.	<u>P2MP</u> : 64.
<b>Débit garantie par utilisateur</b>	19,44/4,86 Mbps.	19,44/19,44 Mbps.	19,44/9,76 Mbps.	Sym. : 78,125/78,125 Mbps. Asym. : 78,125/7,81 Mbps.	78,125/19,44 Mbps.	39,06/39,06 Mbps.	<u>P2MP</u> : 625/156,25 Mbps.
<b>Budget de liaison</b>	5-20/10-25/ 15-30 dB.	21/23/26 dB.	20/25/30 dB.	26 dB.	14-29/16-31/ 18-33/20-35 dB.	28/29 dB.	14-29/16-31/18-33/20-35 dB.
<b>Coexistence</b>	-	10 G EPON.	XG-PON, XGS-PON, NG-PON2.	EPON.	GPON, XGS-PON, NG-PON2.	GPON, XG-PON, NG-PON2.	GPON, XGS-PON.
<b>Domaine d'application</b>	RNIS, FTTH, FTTB, FTTCab, VoD.	FTTH, FTTN, FTTC, Radio cellulaire, Business.	FTTH, FTTB, FTTC, IP-TV, VoD, Internet très haut débit.	FTTH, FTTN, FTTC, Radio cellulaire, Business.	FTTCell, FTTH, FTTB, FTTO, FTTC/Cab, Business.	FTTCell, FTTH, FTTB, FTTO, FTTC/Cab, Business.	FTTCell, FTTH, FTTB, FTTO, FTTC/Cab, Business, TWDM PON, WDM PON, 5G Transport.

### II.2.7 WDM PON :

Le WDM PON (*Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network*) est un type de multiplexage optique utilisé dans les réseaux d'accès optiques. Il offre une bande passante plus élevée, il s'agit d'une solution prétendant pour les systèmes PON de prochaine génération en concurrence avec les systèmes 10 G-EPON et XG-PON [72]. L'architecture WDM PON présente divers avantages par rapport aux systèmes traditionnels TDM PON. Tout d'abord, le WDM PON permet à chaque utilisateur d'être dédié avec une ou plusieurs longueurs d'onde ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ ), permettant à chaque abonné d'accéder à toute la bande passante adaptée aux longueurs d'ondes.

Cette architecture offre généralement une sécurité et une évolutivité accrues car chaque abonné ne reçoit que sa propre longueur d'onde. Le WDM PON permet des connexions point à point (*P2P*) entre l'OLT et l'ONU et ne nécessite pas de contrôleurs d'accès point à multipoint (*P2MP*) dans d'autres réseaux PON.

La figure II-15, montre que pour l'aval (*downstream*) du WDM PON, les longueurs d'onde sont acheminées de l'OLT vers l'ONU par un routeur à réseau de guides d'ondes (*AWG*), en réseau déployé sur un nœud distant (*Remote Node*). L'AWG est un élément optique passif avec la particularité et la périodicité. Pour le sens amont (*upstream*), l'OLT utilise un démultiplexeur WDM ainsi qu'un dispositif de réception pour recevoir les signaux en amont. Chaque ONU est équipée d'un émetteur et d'un récepteur pour recevoir et émettre sur ses longueurs d'onde respectives. Dans ce contexte, les transmissions en aval et en amont se produisent dans des fenêtres de longueurs d'onde différentes ; malgré ces caractéristiques attrayantes, le WDM PON a un coût inhibiteur en raison de la caractéristique de longueur d'onde des ONUs. Étant donné que chaque abonné est dédié à certaines longueurs d'onde, l'OLT dans le WDM PON prenant en charge 32 ONU doit transmettre sur au moins 32 longueurs d'onde différentes et chaque ONU doit fonctionner à ses propres longueurs d'onde. Cela impose des exigences plus élevées aux lasers par rapport aux réseaux TDM PON [73].

Il est optimisé pour des applications jusqu'à 20 km, et pour atteindre des distances supérieures à 100 km, des amplificateurs optiques et des fibres de compensation de la dispersion chromatique sont nécessaires.

Le WDM-PON est utilisé pour les réseaux FTTC, FTTB et les FTTH afin de fournir différents services de type vidéo, voix ou données. Il répond aux besoins en bande passante pour les réseaux mobiles 3G et 4G LTE.

Ce type de multiplexage est capable de prendre en charge l'extension de la portée pour les réseaux EPON existants.

Il est également adapté pour créer un système hybride (TWDM) qui combine les deux avantages du TDM-PON et du WDM-PON (voir chapitre III).

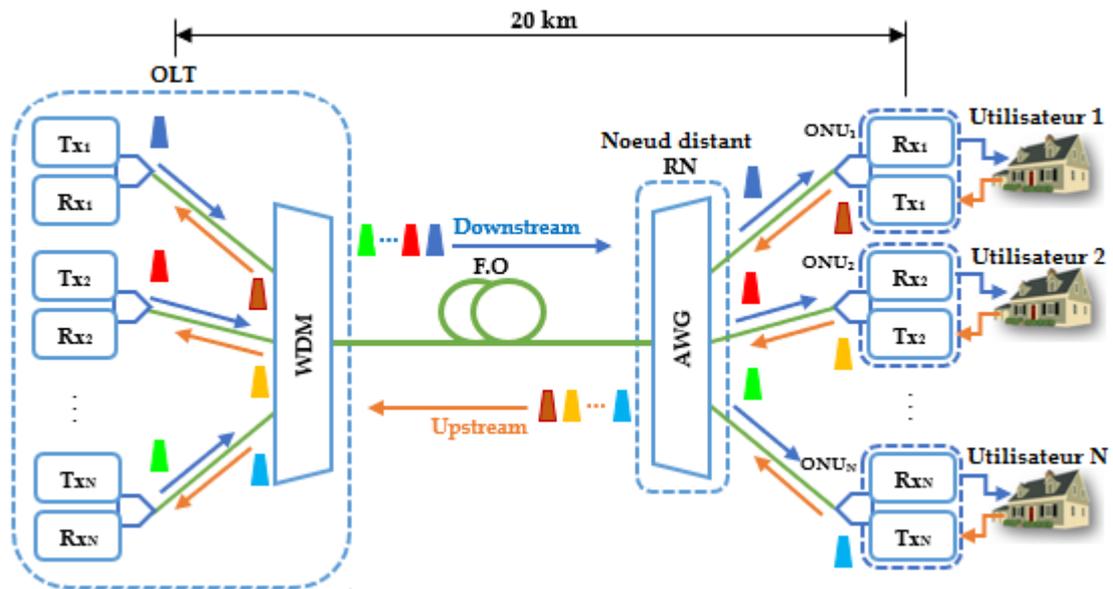


Figure II- 15 : Architecture typique du WDM PON.

### II.2.8 CWDM PON :

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière PON (CWDM PON) se présente sous forme d'un schéma de multiplexage dont les longueurs d'onde sont combinées en un seul câble à fibre optique sans interférence (voir la figure II-16). C'est une bonne solution pour ajouter plus de services sur une seule sortie sans interrompre d'autres services aux clients. Le CWDM PON fonctionne à une bande passante plus élevée que le WDM PON, où la longueur d'onde de fonctionnement s'étend de 1270 nm à 1610 nm et couvre 18 canaux CWDM, avec un espacement entre les canaux de 20 nm. Ce système est utilisé dans les réseaux locaux et étendus [74].

Le CWDM PON fonctionne en aval (*downstream*) de l'OLT vers l'ONU avec une longueur d'onde de 1490 nm pour la voix et les données et en amont (*upstream*) de l'ONU vers l'OLT avec

une longueur d'onde de 1310 nm pour la voix et les données. La vidéo est envoyée en aval à une longueur d'onde de 1550 nm et il n'y a pas de service vidéo en amont [75].

Dans le système CWDM PON, chaque laser est fabriqué pour répondre à une longueur d'onde d'un canal, où la marge du canal est de  $\pm 3 \text{ nm/canal}$  permet au laser de rester dans sa plage de longueur d'onde allouée (en pratique, on utilise seulement 8 longueurs d'ondes), cela évite l'échauffement du laser et la dissipation d'énergie, tandis que dans un laser DWDM, la tolérance est beaucoup plus serrée [61].

Le CWDM PON est moins cher que le système WDM PON, ceci permet de réduire les coûts d'exploitation du réseau PON ; il est flexible et extensible avec une petite taille et une faible consommation d'énergie [76].

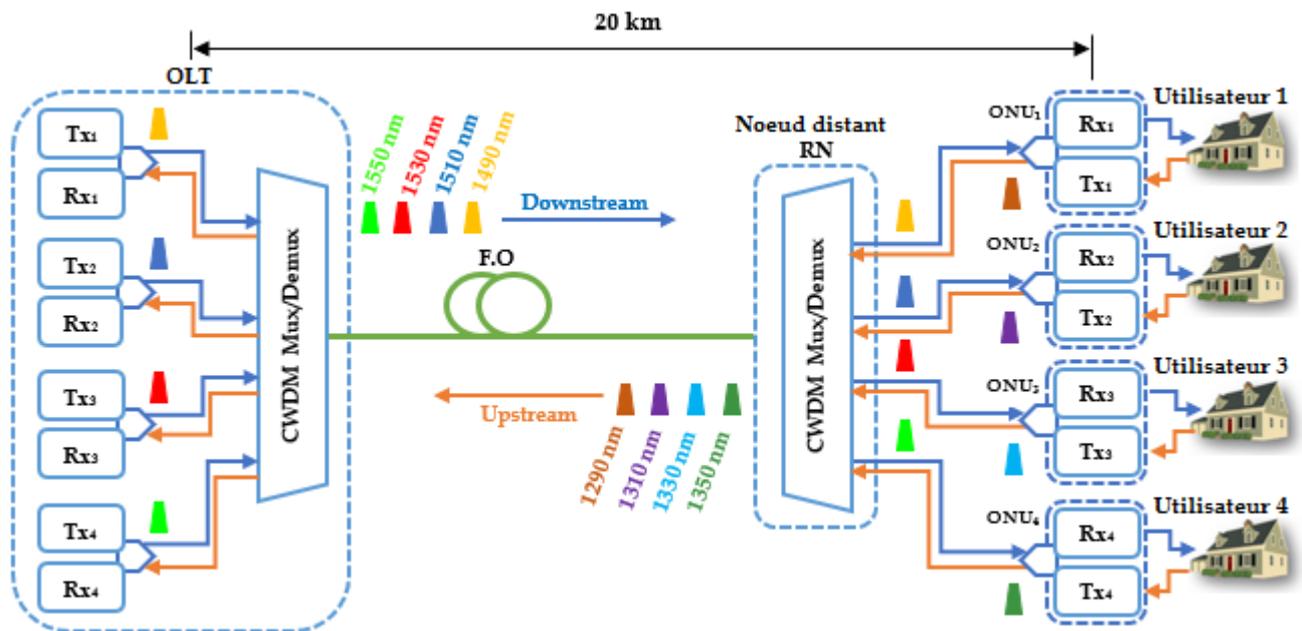


Figure II- 16 : Architecture typique du CWDM PON.

### II.2.9 OFDMA PON :

L'OFDMA PON est une technique de multiplexage utilisée dans les réseaux PON afin d'améliorer l'efficacité spectrale, d'augmenter la capacité du canal et la portée du réseau. Il est basé sur la technique de la modulation multi-porteuses OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) qui attribue dynamiquement des données binaires de grande vitesse à des sous-porteuses. Ces dernières sont multiplexées en fréquence de manière orthogonale afin d'éviter le phénomène de chevauchement et d'interférences.

L'OFDMA PON est devenu une technologie compétitive pour le NG-PON2 car il peut être combiné avec le WDM pour augmenter encore le provisionnement de la bande passante [77].

Ce système utilise des types de modulation d'ordre élevé pour les sous-porteuses tels que le PSK (*Phase Shift Keying*) et le QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) afin d'améliorer la capacité du système [77].

La figure II-17 montre l'architecture typique de l'OFDMA PON dont différentes sous-porteuses peuvent être attribuées à des abonnés/des services tels que le FTTH, le FTTB, la station mobile, l'ADSL [78], le DVB-T (*Digital Video Broadcasting–Terrestrial*) et la 4G LTE.

Remarque : plus le nombre de porteuses multiplexées est grand plus la bande spectrale occupée est grande, cela signifie aussi une augmentation conséquente du débit. Les auteurs [79] et [80] ont démontré qu'un débit allant jusqu'à 108 Gbps par longueur d'onde pour un système OFDMA-PON est possible pour une démonstration *non temps-réel* et jusqu'à 41,25 Gbps par longueur d'onde pour une démonstration en *temps-réel*.

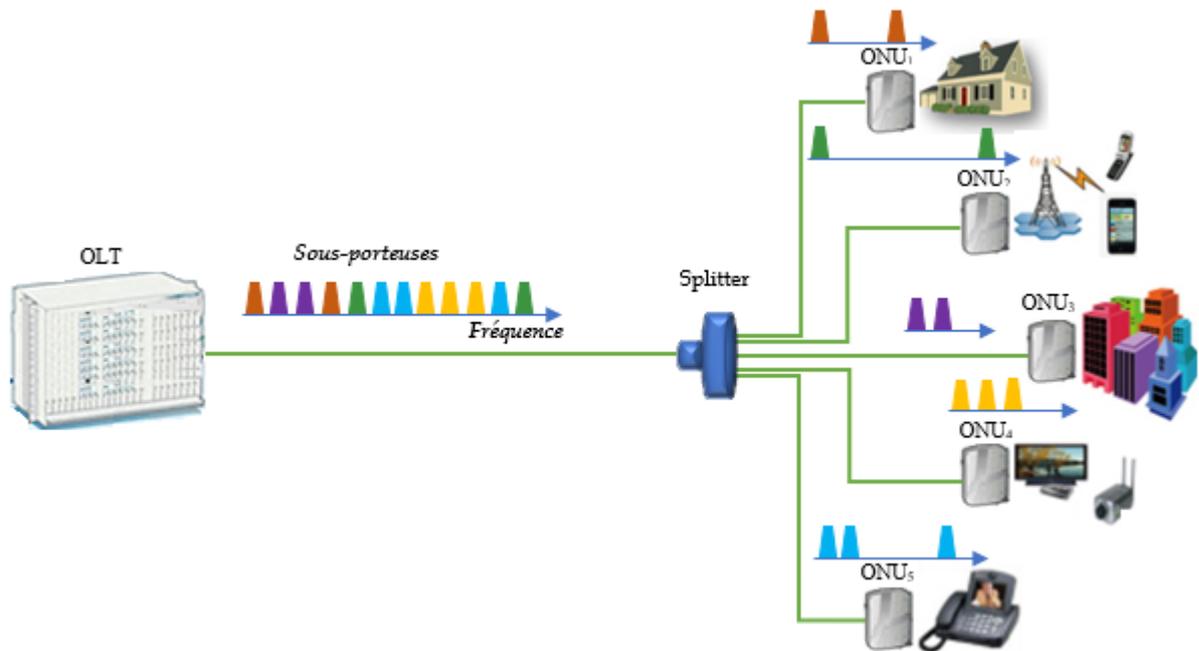


Figure II- 17 : Architecture typique de l'OFDMA PON.

L'OFDMA PON présente plusieurs avantages, entre autres :

- Il améliore l'efficacité spectrale.
- Il utilise un algorithme de mappage de constellation simple.

- Il utilise des éléments électroniques moins coûteux tels que le DSP (*Digital Signal Processing*).
- Il permet une allocation dynamique des sous-porteuses à l'aide de l'algorithme IFFT.
- Il présente un accès filaire et sans fil.
- Il est employé pour permettre le basculement vers des réseaux d'accès ultra-longue distance (*comme le DWDM PON et U-DWDM PON*).

L'inconvénient majeur du système OFDMA PON est la complexité électronique liée aux techniques du traitement numérique du signal DSP (*Digital Signal Processing*) au niveau du modulateur et démodulateur OFDM (*algorithmes IFFT/FFT*) ainsi que la forte consommation de l'énergie de ces circuits électroniques.

### **II.2.10 OCDMA PON :**

L'OCDMA PON est une technique de multiplexage utilisée dans les réseaux PON pour augmenter le nombre d'abonnés tout en gardant une gestion asynchrone. Elle est basée sur l'étalement du spectre. L'information est codée par des codes optiques orthogonaux (*OOC : Optical Orthogonal Code*), ce sont les plus adaptés pour ce type de multiplexage à des fins de sécurité. A la réception (*ONU*), la reconnaissance des données de chaque utilisateur est basée sur le processus de décodage par le même code.

L'OCDMA-PON utilise l'accès multiple par répartition en code (*CDMA*) pour coder les signaux ONU, évitant ainsi l'attribution de créneau temporel pour la transmission de données requise par les systèmes à accès multiple par répartition dans le temps (*TDMA*) (*le cas pour les GPON*).

Ce système peut être combiné avec d'autres techniques hybrides telles que l'OCDMA/OTDM PON, l'OCDMA/WDM PON et l'OFDMA/OCDMA PON. Cependant, les inconvénients de ces systèmes sont liés au coût important des composants optiques (*réseaux de Bragg, amplificateurs optiques, la complexité de la gestion des codeurs/décodeurs optiques, ...etc.*). En plus, l'OCDMA PON ne permet pas d'augmenter le débit par utilisateur [81].

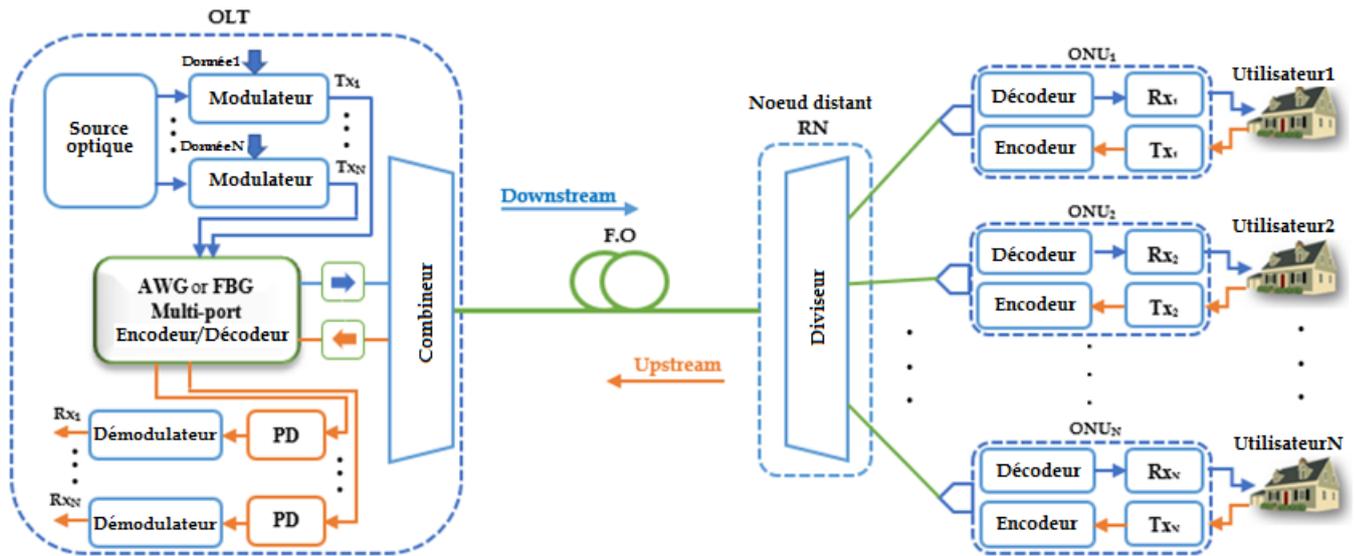


Figure II- 18 : Architecture typique de l'OCDMA PON.

La figure II-18 montre l'architecture typique de l'OCDMA PON dont les données sont codées à l'aide d'un dispositif appelé AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) ou bien FBG (*Fiber Bragg Grating*).

### II.2.11 OTDM PON :

L'OTDM est une technique de multiplexage optique plus puissante utilisée dans le réseau PON, ce système utilise uniquement une approche dans le domaine temporel. Il peut combiner plusieurs canaux à faible débit binaire en un seul canal à haut débit binaire dans le temps. Chaque canal peut être multiplexé dans un multiplexeur (*combineur*) pendant une période de temps donnée (*voir figure II-19*).

L'OTDM PON est composé de trois étages, il s'agit de l'OLT, le système en ligne (*la fibre et le réseau distant*) et l'ONU.

L'OLT est composé : d'une source optique (*Laser ou LED*), d'un modulateur (*format de modulation : NRZ, RZ ou Manchester*), d'un dispositif de retard (*Optical Fiber Delay Lines : OFDL*) et d'un multiplexeur OTDM (*combineur de puissance*).

Le système en ligne est composé d'une fibre optique (*bidirectionnelle ou double fibres*) et le réseau distant (*se compose d'un séparateur de puissance (splitter)*), tandis que l'ONU est composée d'une ligne à retard, d'un démodulateur, d'un photo-détecteur et d'un filtre.

Le multiplexage OTDM est une technique synchrone qui demande à la réception une synchronisation (*un dispositif de récupération d'horloge*), pour cela on utilise une porte optique

rapide avec une durée de commutation plus courte que la période binaire du signal de données multiplexées (25 ps pour 40 Gbps, 6.25 ps pour 160 Gbps, 1.56 ps pour 640 Gbps) [82].

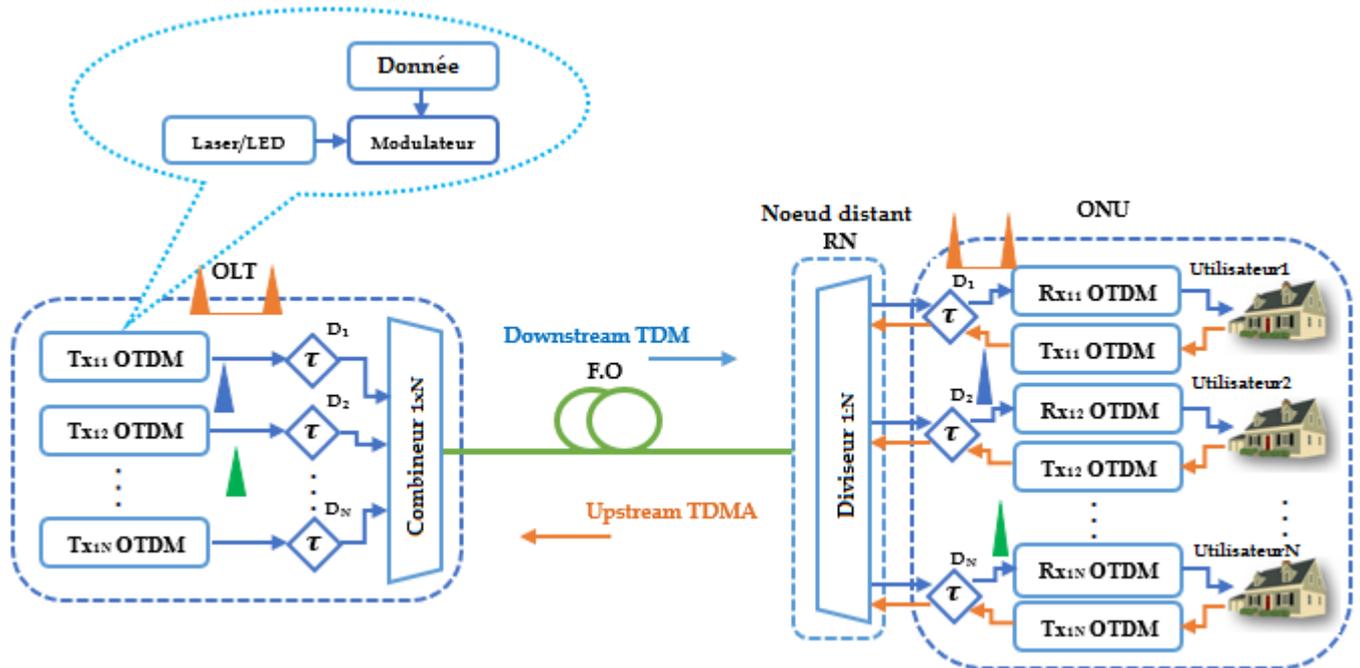


Figure II- 19 : Architecture typique de l'OTDM PON.

Ce type de multiplexage est utilisé généralement en hybride avec d'autres systèmes, entre autres le WDM. C'est une solution pour surmonter les effets non linéaires associés à ce système.

On distingue deux types de voies du multiplexage OTDM, à savoir [82] :

- L'entrelacement de bits (*bit par bit*).
- L'entrelacement de paquets (*paquet par paquet*).

### II.3 Les techniques du multiplexage hybride :

Malgré le développement remarquable dans l'heure actuelle, il est toujours nécessaire de disposer des réseaux rapides très efficaces capables d'exploiter les liaisons à fibres optiques actuelles.

A cet effet, le multiplexage optique hybride a pour but de contribuer à un nouveau système plus compétitif en termes du débit, de capacité, de sécurité, du coût, ainsi que la possibilité d'intégration dans les réseaux PON afin d'optimiser les performances en termes de (*TEB, OSNR, facteur de qualité Q et le diagramme de l'œil*), et son utilisation dans différentes applications notamment les FTTx, les GPON, les NG-PON2, les réseaux métropolitains MAN, les réseaux étendus WAN, ...etc.

Dans ce contexte, on distingue plusieurs types de multiplexage hybride notamment l'OTDM/WDM-PON, l'OCDMA/OTDM-PON, l'OCDMA/WDM-PON, l'OFDMA/WDM-PON, l'OFDMA/OTDM-PON ainsi que l'OFDMA/OCDMA-PON. Dans ce mémoire de thèse (*chapitre III*) nous allons nous restreindre au système hybride OTDM/WDM-PON.

### **II.3.1 Le système hybride OTDM/WDM-PON :**

Le système hybride OTDM/WDM est une technique qui combine deux types de multiplexage optique tels que l'OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*) et le WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). L'OTDM a pour but d'augmenter la capacité du système (*nombre d'utilisateurs*) et la mise à niveau du débit binaire vers un seul canal afin de créer des signaux à grande vitesse avec des sources optiques à faible vitesse. Ce système peut être exécuté sur un certain nombre de canaux WDM existants (*4, 8, 16 canaux, ...etc.*), ce qui améliore la capacité globale des données. Il s'agit d'une technologie complémentaire dont une seule partie de la fibre peut transmettre plusieurs signaux WDM. Les données OTDM multiplexées peuvent être contenues dans chaque longueur d'onde WDM.

Ici, la technologie WDM a pour but de répondre à la demande d'un débit très élevé ( $\sim$  *Gbps/abonné*), et elle fonctionne sur une longue portée. Cependant pour cette dernière solution, le partage de la bande passante totale n'est pas flexible et efficace entre plusieurs abonnés. Cela permet de contribuer à la technologie hybride OTDM/WDM dans les réseaux PON afin d'obtenir un compromis entre les deux systèmes.

L'architecture du système hybride OTDM/WDM est montrée dans la figure II-20 ci-dessous. Elle admet deux niveaux de répartition : le premier concerne le multiplexage/démultiplexage des canaux WDM (*1 vers M*) à base de deux AWG et l'autre pour le combineur/séparateur de puissance de chaque longueur d'onde WDM (*1 vers N*) à base des coupleurs optiques (*combiner/splitter*). Dans ce cas, le système a un taux de partage de  $M \times N$ .

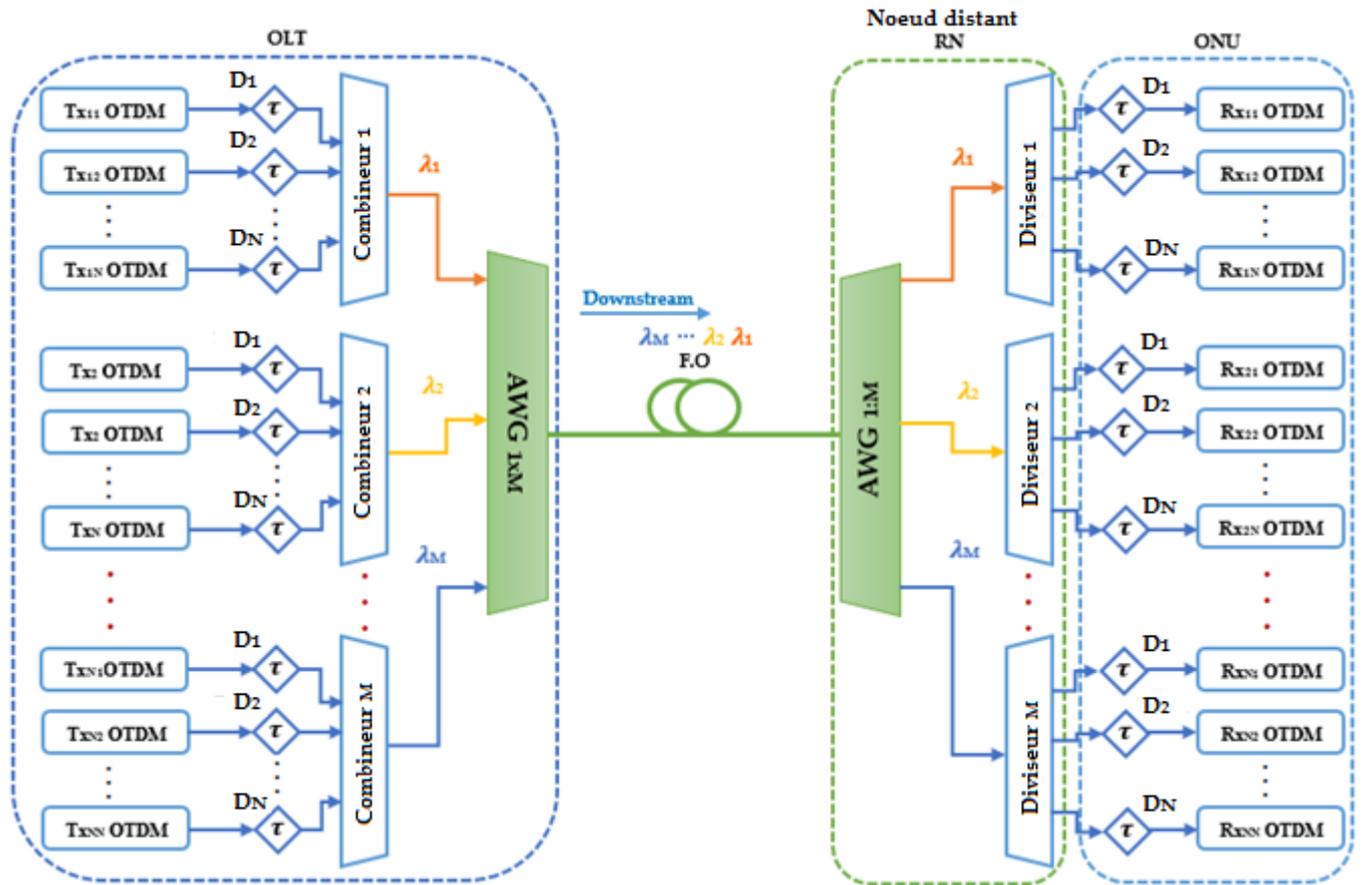


Figure II- 20 : Architecture typique en aval du système hybride OTDM/WDM-PON.

Parmi les avantages du système hybride, la bande passante totale disponible est très élevée grâce à la technologie WDM. Le taux de partage et le débit ( $R \times N \times M$ , dont  $R$  est le débit/abonné) sont plus élevés grâce à la technologie OTDM, cela implique que l'assemblage de ces deux technologies augmente le nombre d'abonnés servis par un réseau PON.

En revanche, ce système hybride présente aussi des inconvénients liés à la complexité de la mise en œuvre et le coût. Il y a aussi le problème de la stabilisation du fonctionnement de l'AWG en température (comme déjà discuté précédemment).

### II.3.2 Le système hybride OCDMA/OTDM-PON :

Le système hybride OCDMA/OTDM-PON est une technique qui combine deux types de multiplexage optique tels que l'OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*) et l'OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*). L'OCDMA est un candidat clé pour l'accès à large bande (*Broadband*) dans les futurs réseaux optiques (*PON, dorsal, ...etc.*), dont le principe de fonctionnement est basé sur des codeurs optiques. L'implémentation de l'OCDMA dans le système hybride a pour but d'augmenter le nombre d'abonnés ainsi que d'améliorer la

confidentialité des données en affectant à chaque utilisateur une signature optique unique (*code optique*) générée par un codeur OCDMA [83].

L'OTDM a pour but d'augmenter le nombre d'abonnés et la mise à niveau du débit binaire vers un seul canal.

L'architecture du système hybride OCDMA/OTDM est montrée dans la figure II-21 ci-dessous. Elle admet deux étages dont le premier concerne l'OCDMA<sup>1</sup> qui combine  $M$  utilisateurs OCDMA dans chaque canal OTDM. Le second concerne l'OTDM qui contient  $N$  canaux OTDM multiplexés à base de coupleurs optiques (*combiner/splitter*). Cette approche permet à  $N$  groupes « *d'utilisateurs  $M$*  » du système OCDMA de transmettre des données sur le réseau OTDM en attribuant à chaque groupe d'utilisateurs OCDMA un intervalle de temps OTDM (*canal*) distinct. Ce système est  $N$  fois plus amélioré par rapport à l'OCDMA traditionnelle et il compte  $M \times N$  utilisateurs pour un débit de transmission de  $1/T$ , où  $T$  est la période de bit OTDM.

Le nombre des canaux OTDM est donné par la formule suivante [83]:

$$N = \frac{T}{\tau} \quad \text{Equation II.1}$$

Où  $\tau$  : est la longueur du code OCDMA (*la largeur du canal OTDM*).

Par exemple : si on a un débit de transmission de 155,52 Mbps ( $OC3$ ), où :  $OC3 = OC \times 3 = 51,84 \times 3 = 155,52$  Mbps, et la largeur du canal OTDM de 400 ps, donc le nombre des canaux OTDM transmis est :  $N = \frac{(1/155,52 \times 10^6)}{400 \times 10^{-12}} = 16$  canaux.

**NB** :  $OC$  : *Optical Carrier basé sur un signal optique multiple de 51,84 Mbps.*

Un autre avantage de ce système hybride est la possibilité de son utilisation dans les réseaux à grande portée comme le DWDM c.à.d. au-delà de 100 km et qui nécessite un amplificateur optique.

---

<sup>1</sup>Ici, on utilise l'OCDMA Incohérent (*code 2-D*) qui permet d'augmenter le nombre d'utilisateurs face aux codes unidimensionnels qui possèdent un nombre limité [55].

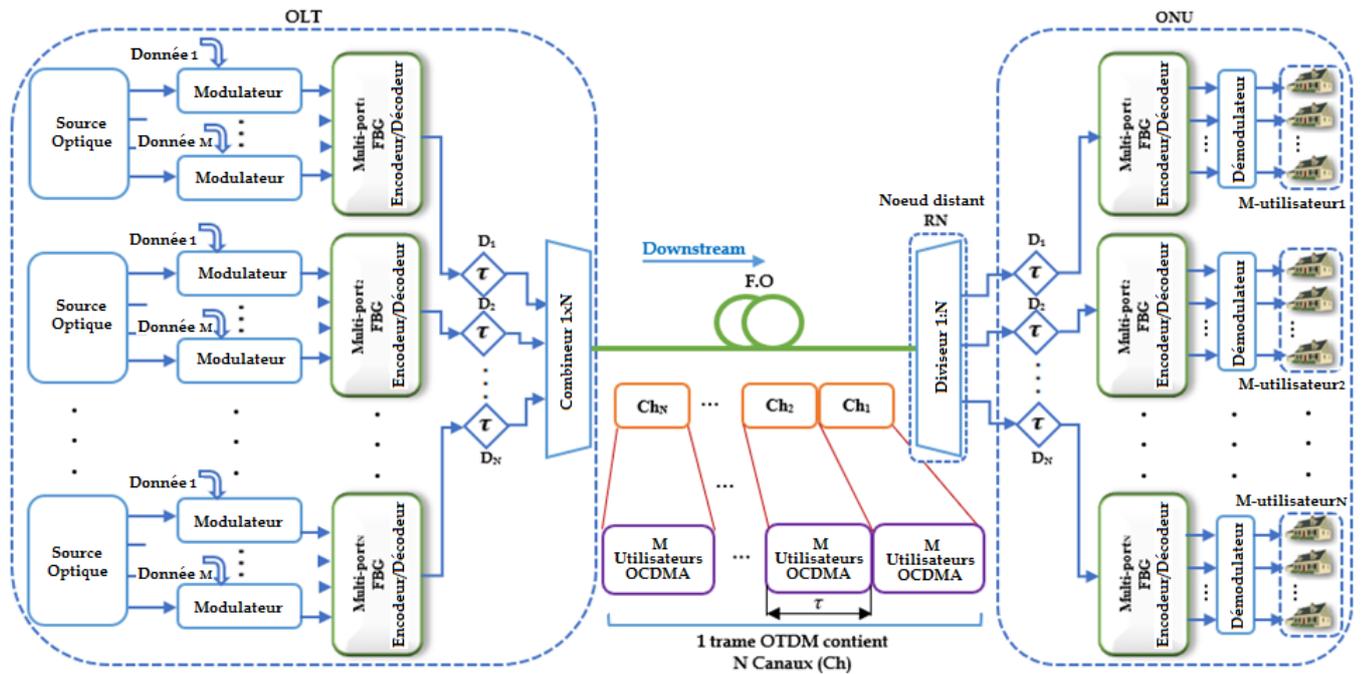


Figure II- 21 : Architecture type en aval du système hybride OCDMA/OTDM-PON.

On constate que la combinaison des deux techniques (*OCDMA et OTDM*) partage un grand nombre d'utilisateurs, cela engendre le phénomène d'interférences d'accès multiples (*MAI*). Afin de minimiser ce dernier, l'OCDMA incohérent fait face à ce phénomène en utilisant des codes 2-D [d'après les auteurs : L. Tancevski, I. Andonovic. IEE Electronics Letters, Vol.30, No.17, 1994, pp.1388-1390].

### II.3.3 Le système hybride OCDMA/WDM-PON :

Le système hybride OCDMA/WDM est une combinaison de deux techniques différentes du multiplexage, il s'agit du système OCDMA et le système WDM. Le rôle principal de l'OCDMA c'est beaucoup plus la confidentialité des données et l'augmentation du nombre d'utilisateurs. Cependant le système WDM a pour but d'augmenter la capacité du système ainsi que son efficacité spectrale.

La figure II-22 ci-dessous, montre le principe de fonctionnement du système hybride dont la technique d'accès consiste à associer à l'OCDMA une dimension supplémentaire en longueur d'onde. Chaque séquence de code OCDMA est réutilisable et émise simultanément à différentes longueurs d'onde [84].

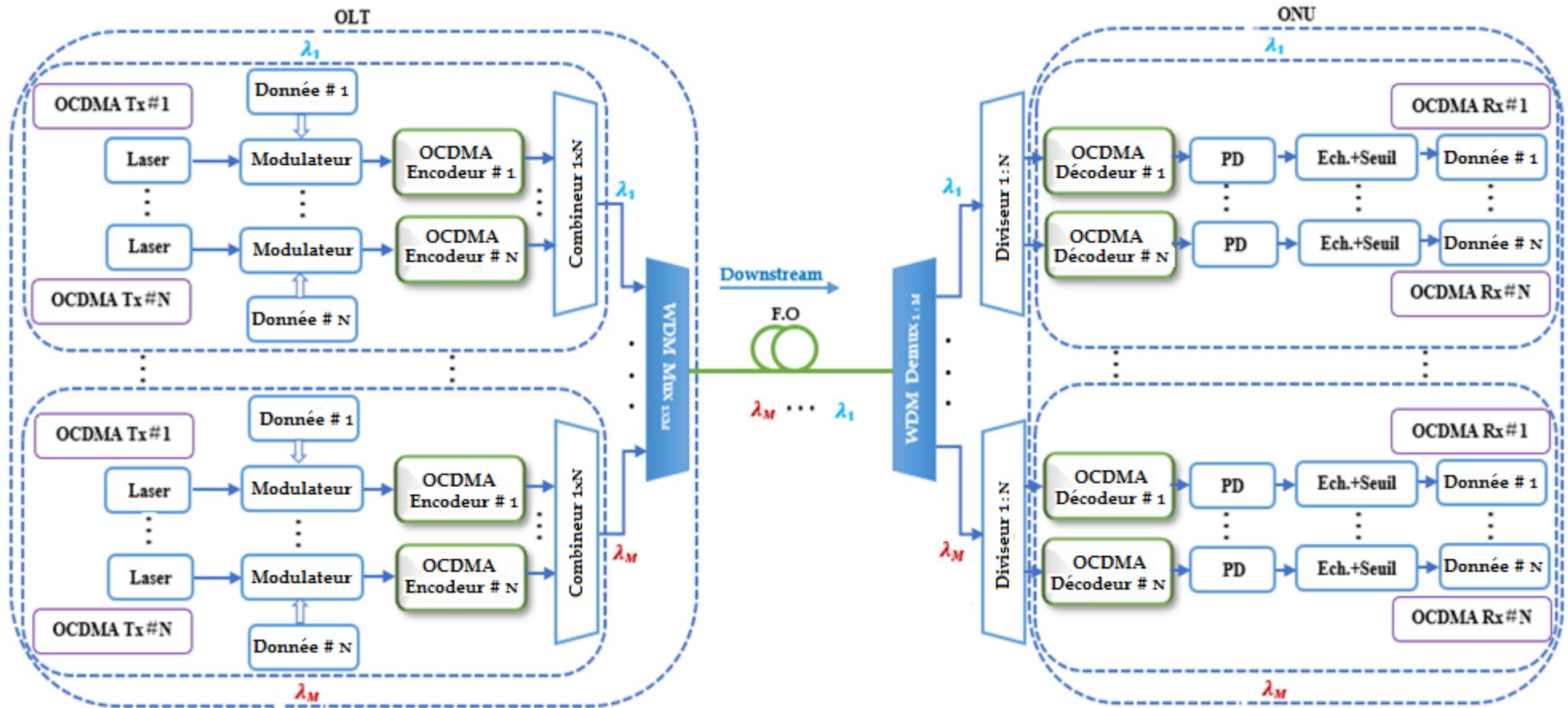


Figure II- 22 : Architecture typique en aval du système hybride OCDMA/WDM-PON.

D'après la figure II-22, au niveau de l'OLT les impulsions générées par le Laser (*la source optique*) sont modulées avec un modulateur optique par les données de chaque canal, et ensuite encodées par un dispositif d'encodage OCDMA dont les mots de code sont orthogonaux entre eux, chaque  $N$  mots de code sont combinés par un coupleur optique  $1 \times N$  (*Power Combiner*). Chaque longueur d'onde WDM peut réaliser le multiplexage de  $N$  signaux OCDMA.

L'ensemble des longueurs d'ondes ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_M$ ) qui contiennent les données OCDMA sont multiplexées à l'aide d'un Multiplexeur WDM Mux et transmises à travers une seule fibre optique.

A la réception au niveau de l'ONU, un Démultiplexeur WDM Démux divise les longueurs d'ondes et les partage vers  $M$  séparateurs de puissance (*Splitter 1 : N*). Les signaux sur chaque longueur d'onde sont décodés optiquement uniquement par  $N$  décodeurs optiques correspondant à  $N$  mots de code différents et détectés ensuite par des photodétecteurs et restaurés.

L'avantage de ce système hybride est qu'il permet de réaliser un codage à deux dimensions dont le but de ce dernier est d'augmenter la capacité de multiplexage et d'éliminer les contraintes d'orthogonalité des codes avec un accès flexible et sécurisé.

Remarque : dans le système hybride OCDMA/WDM, l'amplification est indispensable pour remédier aux effets non-linéaires causés par le système WDM.

### **II.3.4 Le système hybride OFDMA/OCDMA-PON :**

Le système hybride OFDMA/OCDMA est une technique qui combine deux systèmes, le premier est basé sur la modulation du signal numérique à transmettre sur un grand nombre de sous-porteuses qui sont orthogonales entre elles afin d'éviter le phénomène d'interférences ainsi que la transmission du maximum d'information sur une portion de fréquences donnée. Dans ce système hybride, l'OFDMA présente une haute efficacité spectrale.

Le second système est l'OCDMA, il est utilisé pour partager toute la bande passante de la fibre, il réduit le coût et la complexité du système. Ce système présente des caractéristiques permettant une transmission asynchrone et dispose d'une meilleure sécurité grâce à la signature des codes OCDMA.

La combinaison des deux systèmes précédents nous permet d'offrir des débits plus élevés et une meilleure efficacité de la bande passante ainsi qu'un grand nombre d'utilisateurs simultanés.

La figure II-23, montre l'architecture du système hybride OFDMA/OCDMA PON. Ce dernier est composé de trois étages, à savoir l'OLT, la fibre et l'ONU.

L'OLT est composé d'un émetteur OFDM qui génère des flux de données codés uniques avec des codes orthogonaux (OOC) grâce aux encodeurs OCDMA, pour différents utilisateurs. Ces flux sont simultanément transmis à travers une fibre optique bidirectionnelle (ou double fibre) à l'unité de réseau optique (ONU).

A la réception, chaque utilisateur dispose d'un décodeur OCDMA unique qui décode les données dont les interférences entre plusieurs utilisateurs peuvent être éliminées grâce au processus d'auto-corrélation lors du décodage [85]. Ensuite les données décodées sont démodulées par un démodulateur OFDM.

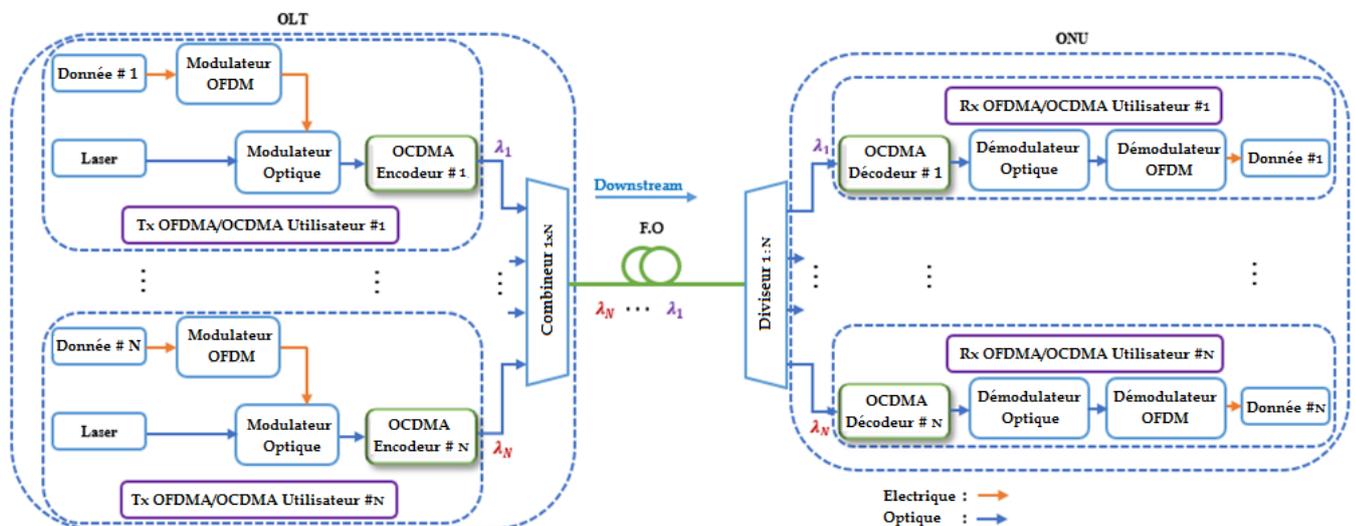


Figure II- 23 : Architecture typique en aval du système hybride OFDMA/OCDMA-PON.

Le système hybride OFDMA/OCDMA, présente plusieurs avantages, notamment la simplicité d'implémentation dans le réseau, une meilleure sécurité et efficacité spectrale. Autre avantage important du côté coût, tous les utilisateurs partagent une seule longueur d'onde ce qui permet d'optimiser l'infrastructure du réseau PON ainsi que sa gestion.

Le processus d'auto-corrélation lors du décodage a pour but d'améliorer la sensibilité du récepteur et d'augmenter ainsi les budgets de puissance en raison du gain de codage, cela signifie qu'on peut utiliser ce système pour de grandes distances au-delà de 100 km (réseaux métropolitains MAN), sans amplification [85].

### II.3.5 Le système hybride OFDMA/WDM-PON :

Ce système hybride est une combinaison de deux techniques de multiplexage, le premier est basé sur la modulation OFDM du signal numérique sur un grand nombre de sous-porteuses afin d'exploiter efficacement la bande passante et de transmettre un maximum d'information. L'OFDMA dans ce système hybride a pour but aussi de réduire les effets non linéaires provoqués par l'espacement étroit du système WDM, de la dispersion chromatique ainsi que de l'atténuation.

Le second système est le WDM, ce dernier a pour but de répondre à la demande d'un débit très élevé c.à.d.  $\sim Gbps/abonné$ , et il fonctionne sur une longue portée. Cependant pour cette dernière solution, le partage de la bande passante totale n'est pas flexible et efficace entre plusieurs abonnés. Cela permet de contribuer à une technologie hybride qui s'appelle OFDMA/WDM exploitée dans les réseaux PON, qui assure l'obtention d'un compromis entre les deux systèmes. L'orthogonalité entre les sous porteuses pour l'OFDM élimine les interférences entre symboles dont l'espacement entre eux est égal à l'inverse de la période de symbole [86].

L'architecture du système hybride OFDMA/WDM est montrée dans la figure II-24 ci-dessous. Elle admet deux niveaux de répartition : le premier basé sur la modulation/démodulation OFDM des signaux électriques, ensuite la modulation optique (à l'aide d'un modulateur électro-optique), après les signaux (les longueurs d'ondes) sont multiplexés à l'aide d'un dispositif de multiplexage WDM avec un taux de partage allant de 1 vers  $N$  canaux.

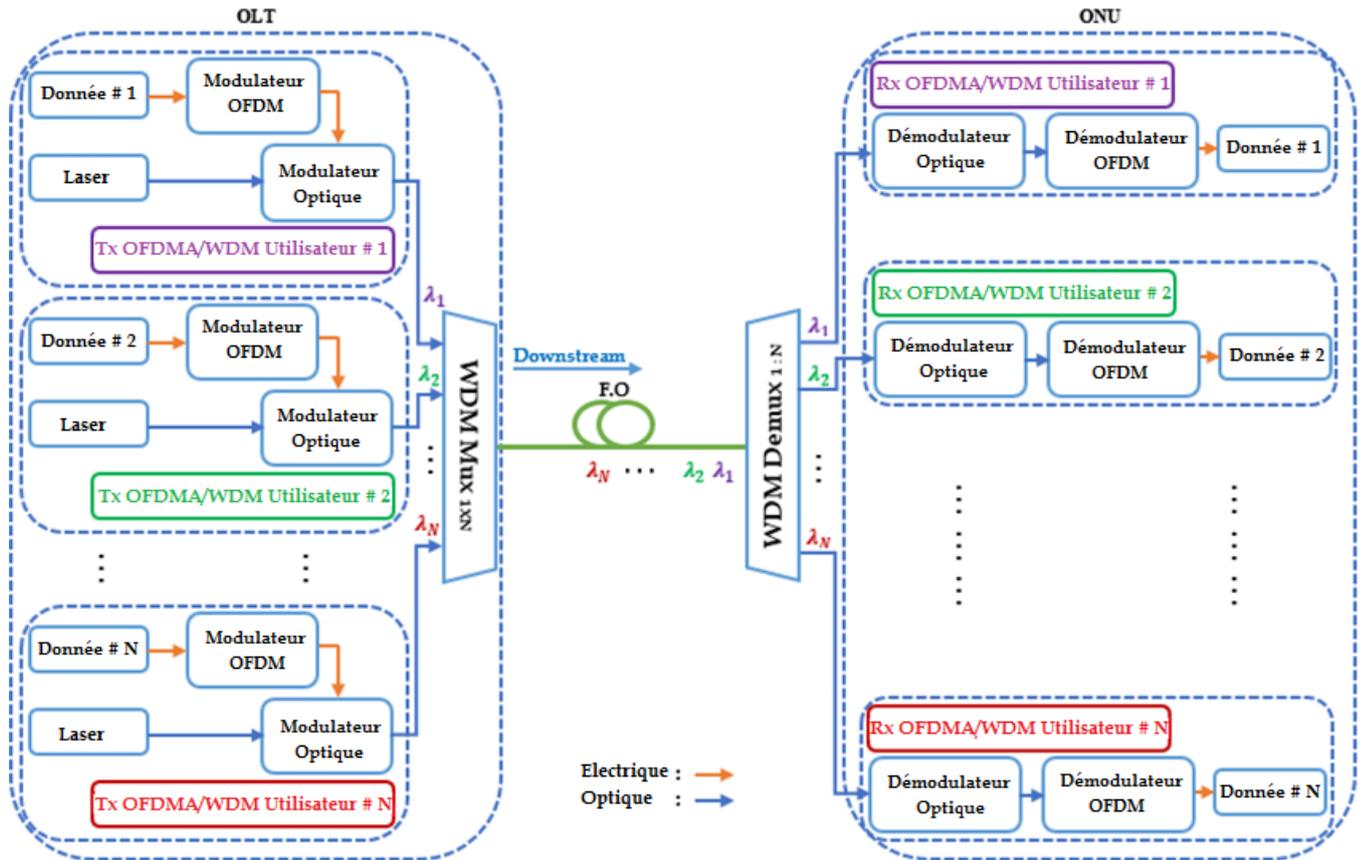


Figure II- 24 : Architecture typique en aval du système hybride OFDMA/WDM-PON.

Remarque : dans le système hybride OFDMA/WDM, l'amplification est indispensable pour remédier à l'atténuation provoquée par le système WDM.

### II.3.6 Le système hybride OFDMA/OTDM-PON :

L'OFDMA/OTDM-PON est une autre approche qui est utilisée généralement dans le NG-PON2 [87]. Ce système est une combinaison de deux types de multiplexages, il s'agit de l'OFDMA et de l'OTDM.

L'OFDMA a pour but d'augmenter le nombre d'utilisateurs en exploitant la bande passante c.à.d. en modulant le signal numérique qu'on veut transmettre sur un grand nombre de sous-porteuses OFDM, pour une tranche horaire (*time slot*) dont la bande passante sera allouée dynamiquement pour chaque cycle. Il offre un meilleur accès aux ressources partagées à moindre coût.

L'OTDM a pour but aussi d'augmenter le nombre d'abonnés et la mise à niveau du débit binaire vers un seul canal. Chaque trame OTDM contient  $N$  canaux et chaque canal contient  $M$  utilisateurs OFDMA.

L'architecture du système hybride OFDMA/OTDM est montrée dans la figure II-25 ci-dessous. Elle admet deux étages dont le premier concerne l'OFDMA qui combine  $M$  utilisateurs OFDMA dans chaque canal OTDM. Le second concerne l'OTDM qui contient  $N$  canaux OTDM multiplexés à base de coupleurs optiques (*combiner/splitter*). Cette approche permet à  $N$  groupes « d'utilisateurs  $M$  » du système OFDMA de transmettre des données sur le réseau OTDM en attribuant à chaque groupe d'utilisateurs OFDMA un intervalle de temps OTDM (*canal*) distinct. Ce système est amélioré  $N$  fois plus par rapport à l'OFDMA traditionnel et il compte  $M \times N$  utilisateurs pour un débit de transmission de  $1/T$ , où  $T$  est la période de bit OTDM.

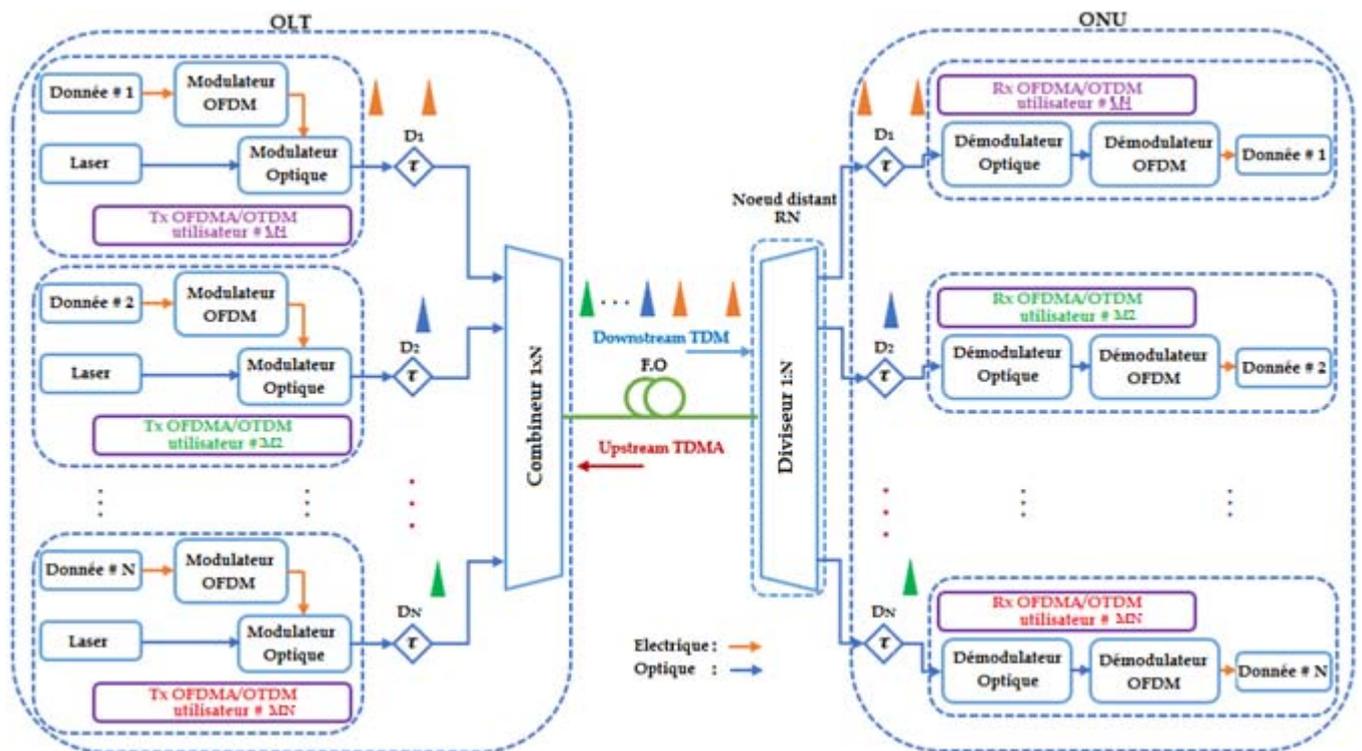


Figure II- 25 : Architecture typique en aval du système hybride OFDMA/OTDM-PON.

L'envoi de trafic dans le sens amont (*upstream*) de l'ONU vers l'OLT est un peu compliqué car tous les abonnés doivent partager la même longueur d'onde ce qui engendre ce qu'on appelle « les collisions entre les transmissions ». Pour éviter ce problème, on utilise le protocole TDMA (*Time Division Multiple Access*).

**Remarque importante :** il existe une différence entre l'OFDM et l'OFDMA, pour l'OFDM, un seul utilisateur est pris en charge en même temps et toutes les porteuses sont transmises en parallèle, dans l'OFDMA, plusieurs utilisateurs peuvent être pris en charge en même temps et

les porteuses sont divisées en plusieurs groupes. Donc, afin d'augmenter le nombre d'utilisateurs, il est recommandé d'utiliser le système OFDMA [87].

II.3.7 Comparaison entre les différents systèmes hybrides [83,84,85,86,87]:

Tableau II- 5 : Comparaison entre les différents systèmes hybrides.

Type de multiplexage	Caractéristiques
Le système hybride OTDM/WDM-PON	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ce système améliore la capacité globale des données.</li> <li>2. La mise à niveau du débit binaire vers un seul canal.</li> <li>3. Il crée des signaux à grande vitesse avec des sources optiques à faible vitesse.</li> <li>4. Il répond à la demande d'un débit très élevé (<math>\sim Gbps/abonné</math>).</li> <li>5. Il fonctionne sur une longue portée.</li> <li>6. Il rend le partage de la bande passante totale plus flexible et efficace entre plusieurs abonnés.</li> <li>7. Le taux de partage est de <math>N \times M</math> utilisateurs.</li> <li>8. Il permet de surmonter les effets non linéaires associés au système.</li> <li>9. La mise en œuvre et le coût sont peu compliqués.</li> <li>10. Il présente un problème de la stabilisation du fonctionnement de l'AWG en température.</li> <li>11. Il est utilisé dans le réseau NG-PON2 avec la possibilité de coexistence avec d'autres réseaux comme le GPON et le XGS-PON.</li> </ol>
Le système hybride OCDMA/OTDM-PON	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Il ne nécessite pas d'horloge de synchronisation.</li> <li>2. Il offre une grande flexibilité d'attribution des canaux.</li> <li>3. Il permet de fonctionner de manière asynchrone.</li> <li>4. Meilleure sécurité et confidentialité.</li> <li>5. Large application dans les réseaux locaux à grande vitesse (LAN) afin de permettre aux plusieurs utilisateurs d'accéder simultanément au réseau.</li> <li>6. Candidat clé pour l'accès à large bande (<i>Broadband</i>) dans les futurs réseaux optiques (PON, dorsal, ...etc.).</li> <li>7. Ce système est <math>N</math> fois plus amélioré par rapport à l'OCDMA traditionnelle et il compte <math>M \times N</math> utilisateurs.</li> <li>8. Utilisé aussi dans les réseaux à grande portée comme le DWDM (c.à.d. au-delà de 100 km).</li> <li>9. Ce système permet de surmonter le phénomène d'interférences d'accès multiples (MAI) par l'utilisation des codes 2-D.</li> <li>10. Utilisé dans certaines applications militaires.</li> <li>11. Il est affecté par le bruit du canal entre les utilisateurs.</li> <li>12. La capacité de générer le maximum de codes est limitée.</li> <li>13. Il nécessite des correcteurs d'erreurs.</li> </ol>

<p><b>Le système hybride OCDMA/WDM-PON</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La flexibilité d'attribution des canaux.</li> <li>2. Meilleure sécurité et confidentialité.</li> <li>3. Appliqué largement pour des accès à large bande (<i>Broadband</i>).</li> <li>4. Le taux de partage est de <math>N \times M</math> utilisateurs.</li> <li>5. Utilisé aussi dans les réseaux à grande portée.</li> <li>6. Surmonte le phénomène d'interférences d'accès multiples (MAI) par l'utilisation des codes 2-D.</li> <li>7. Utilisé dans certaines applications militaires.</li> <li>8. Améliore l'efficacité spectrale ainsi que la capacité de multiplexage.</li> <li>9. Affecté par le bruit du canal entre les utilisateurs.</li> <li>10. La capacité de générer le maximum de codes est limitée.</li> <li>11. Nécessite des correcteurs d'erreurs.</li> <li>12. Nécessite des amplificateurs optiques pour remédier aux effets non-linéaires causés par le système WDM.</li> </ol>
<p><b>Le système hybride OFDMA/OCDMA-PON</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Permet de transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée.</li> <li>2. Présente une haute efficacité spectrale.</li> <li>3. Permet de partager toute la bande passante de la fibre.</li> <li>4. Réduit le coût et la complexité du système.</li> <li>5. Permet une transmission asynchrone.</li> <li>6. Dispose d'une meilleure sécurité grâce à la signature des codes OCDMA.</li> <li>7. Offre des débits élevés.</li> <li>8. Augmente le nombre d'utilisateurs (<math>N \times M</math>).</li> <li>9. Surmonte le phénomène d'interférences d'accès multiples (MAI) par l'utilisation des codes 2-D.</li> <li>10. La simplicité d'implémentation dans le réseau.</li> <li>11. Moindre coût.</li> <li>12. Tous les utilisateurs partagent une seule longueur d'onde, ce qui permet d'optimiser l'infrastructure du réseau PON ainsi que sa gestion.</li> <li>13. Améliore la sensibilité du récepteur grâce au processus d'autocorrélation lors du décodage.</li> <li>14. Augmente les budgets de puissance en raison du gain de codage, cela signifie qu'on peut utiliser ce système pour des grandes distances au-delà de 100 km (<i>réseaux métropolitains MAN</i>) sans amplification.</li> <li>15. Technologie émergente utilisée dans les réseaux NG-PON2.</li> </ol>

<p><b>Le système hybride OFDMA/WDM-PON</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Exploite efficacement la bande passante.</li> <li>2. Permet de transmettre un maximum d'information.</li> <li>3. Présente une haute efficacité spectrale.</li> <li>4. Permet de partager toute la bande passante de la fibre.</li> <li>5. Offre des débits plus élevés c.à.d. ~ Gbps/abonné.</li> <li>6. Augmente le nombre d'utilisateurs (<math>N \times M</math>) grâce au système OFDMA.</li> <li>7. Permet de réduire les effets non linéaires provoqués par l'espacement étroit du système WDM, de la dispersion chromatique ainsi que de l'atténuation grâce à l'OFDMA.</li> <li>8. Fonctionne sur une longue portée.</li> <li>9. Utilisé dans les réseaux PON tel que le XGS-PON et le NG-PON2.</li> <li>10. L'orthogonalité entre les sous porteuses pour l'OFDMA permet d'éliminer les interférences entre symboles dont l'espacement entre eux est égal à l'inverse de la période de symbole.</li> <li>11. L'amplification est indispensable pour remédier à l'atténuation causée par le système WDM.</li> </ol>
<p><b>Le système hybride OFDMA/OTDM-PON</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Permet de transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée.</li> <li>2. Présente une haute efficacité spectrale.</li> <li>3. Permet de partager toute la bande passante de la fibre.</li> <li>4. Réduit le coût et la complexité du système.</li> <li>5. Offre des débits élevés et la mise à niveau vers un seul canal.</li> <li>6. Augmente le nombre d'utilisateurs (<math>N \times M</math>), ce qui permet d'améliorer <math>N</math> fois plus par rapport à l'OFDMA traditionnelle.</li> <li>7. La simplicité d'implémentation dans le réseau.</li> <li>8. Tous les utilisateurs partagent une seule longueur d'onde, cela permet d'optimiser l'infrastructure du réseau PON ainsi que sa gestion.</li> <li>9. Evite le problème des collisions entre les transmissions dans le sens amont (<i>upstream</i>) de l'ONU vers l'OLT grâce au protocole TDMA (<i>Time Division Multiple Access</i>).</li> <li>10. La bande passante sera allouée dynamiquement pour chaque cycle (<i>grâce aux algorithmes</i>).</li> <li>11. Il offre un meilleur accès aux ressources partagées à moindre coût.</li> <li>12. Augmente les budgets de puissance en raison du gain de codage, cela signifie qu'on peut utiliser ce système pour des grandes distances au-delà de 100 km (<i>réseaux métropolitains MAN</i>) sans amplification.</li> <li>13. Technologie émergente utilisée généralement dans les réseaux NG-PON2.</li> </ol>

## **II.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différentes topologies des réseaux optiques à savoir la topologie en arbre, en étoile, en bus, ...etc. avec les normes et les standards tels que le BPON, le GPON, l'EPON, le NG-PON2 ...etc. Nous avons étudié les réseaux optiques passifs (PON) basés sur des techniques de multiplexage à savoir le TDM, le WDM, l'OCDMA et l'OFDMA. Une comparaison a été réalisée à la fin de chaque section avec une mise en évidence des différentes techniques de multiplexage optique hybrides qui sont utilisées dans les réseaux PON avec l'élaboration des architectures typiques pour le sens aval et amont afin de mieux comprendre le principe de fonctionnement.

En dernier lieu, nous avons dressé une comparaison entre les différents types de multiplexage optique hybrides basés sur certaines applications spécifiques, notamment les avantages, les inconvénients et le domaine d'application.

Le troisième chapitre sera consacré à l'évaluation des performances théoriques pour les trois systèmes suivants : le CWDM-PON, le WDM-PON et le système hybride l'OTDM/WDM, avec une comparaison détaillée entre eux, en tenant compte des critères de performances à savoir la distance, le débit, la modulation, l'amplification, la puissance, la dispersion, ...etc..., sous le logiciel Optisystem v 17.0.0 suite à un bénéfice d'une licence gratuite auprès de l'entreprise Optiwave pendant 3 mois valable pour 50 PC (*ordinateurs*) durant la période de confinement du COVID 19.

*Chapitre III :*  
*Simulation et interprétations*  
*des résultats.*

### III.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré aux différentes simulations dans le but de faire une étude comparative entre les différentes techniques de multiplexages optiques afin d'optimiser la méthode la plus adéquate pour la technique d'accès optique notamment le réseau PON, en étudiant l'impact des facteurs suivants : la distance, le débit, la puissance d'émission et le type de modulation.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons évaluer les performances des systèmes suivants : le WDM-PON et le CWDM-PON dans un réseau d'accès optique bidimensionnel, une comparaison et optimisation en termes de taux d'erreur binaire TEB (ou BER), de diagramme de l'œil, de rapport signal sur bruit OSNR et le facteur de qualité Q.

Dans la deuxième partie, nous serons mis en évidence les performances du système hybride OTDM/WDM dans un réseau d'accès optique, une comparaison et optimisation entre ce système et les deux systèmes précités (CWDM et WDM) sera établie ensuite.

Les simulations sont réalisées sous le logiciel OptiSystem version 17.0.0<sup>2</sup>. Ce logiciel permet la simulation de systèmes de communication optique de n'importe quel type de liaison d'un large éventail de réseaux optiques. Il répond aux différentes applications de conception et de modélisation des réseaux optiques de type WDM, OTDM, OCDMA, ...etc., ainsi que tous les réseaux optiques hybrides basés sur des techniques d'accès.

### III.2 Etude du système WDM-PON :

#### III.2.1 Description du système simulé :

Dans ce système, on trouve trois étages à savoir l'étage de l'émetteur, le support de transmission et l'étage de la réception. Ce système est un réseau PON, il dispose de deux sens de communications, il s'agit du sens descendant (*downstream*) et du sens montant (*upstream*). Nous allons évaluer les performances dans les deux sens en étudiant l'impact de la longueur de la liaison, de la puissance d'émission et du type du format de modulation sur le système WDM-PON.

Les figures III-1 et III-2 ci-après, montrent la configuration d'un émetteur WDM-PON (OLT : *Optical Line Terminal*) et d'un récepteur WDM-PON c'est ce que l'on appelle l'ONU (*Optical Network Unit : Unité de Réseau Optique*).

---

<sup>2</sup>Suite à un bénéfice d'une licence gratuite auprès de l'entreprise Optiwave pendant 3 mois valable pour 50 PC (ordinateurs) durant la période de confinement du COVID 19.

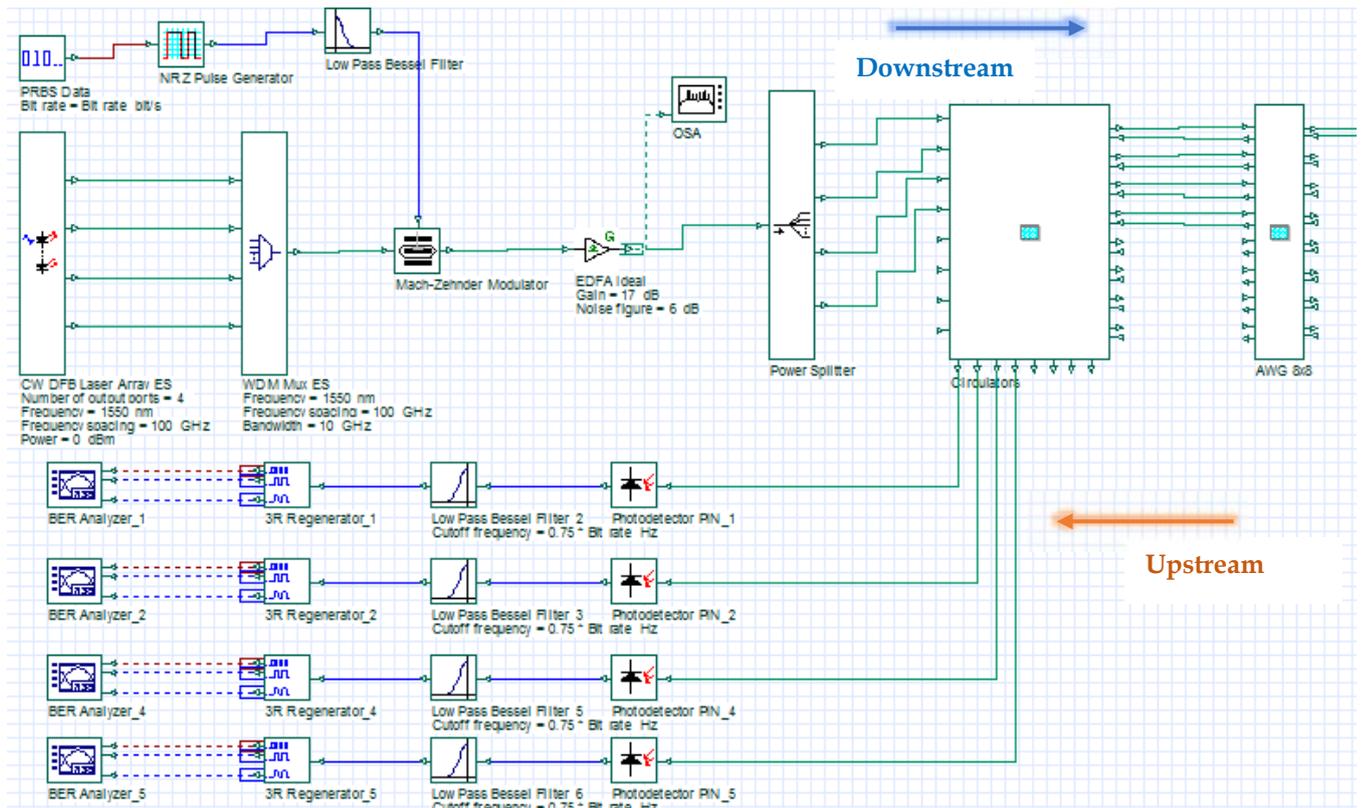


Figure III- 1 : Schéma du système WDM-PON pour quatre utilisateurs (OLT).

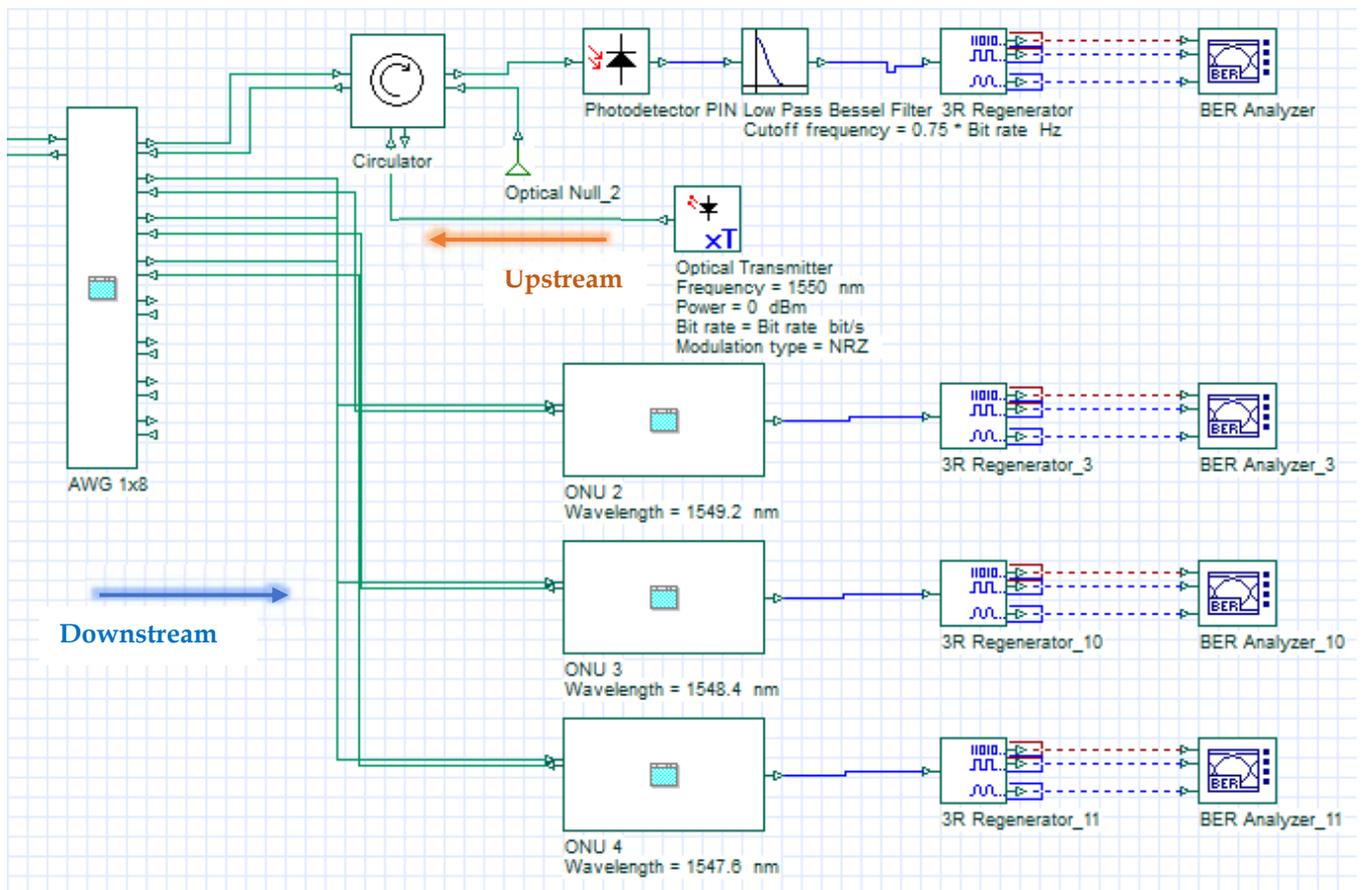


Figure III- 2 : Schéma du système WDM-PON pour quatre utilisateurs (ONU).

Le système WDM PON à simuler comporte quatre canaux en aval et quatre canaux en amont. L'OLT transmet toutes les longueurs d'onde sur la même fibre de différentes longueurs de liaison allant de 20 km à 60 km, à des différentes puissances d'émission allant de -10 dBm à 10 dBm et pour un débit binaire de  $4 \times 2,5$  Gbps (comme indiqué dans le tableau III-1), en utilisant un coupleur de longueur d'onde AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) couplé à une fibre permettant de séparer ou combiner les signaux de différentes longueurs d'onde, avec un format de modulation NRZ. A la réception, chaque ONU effectue une sélection afin de ne recevoir que la longueur d'onde qui lui est destinée. Ce système permet des connexions point à point (P2P) entre l'OLT et l'ONU et ne nécessite pas de contrôleurs d'accès contrairement au réseau TDM-PON.

### III.2.2 Paramètres de simulation :

Les données générées à l'aide d'un générateur de séquences binaires pseudo-aléatoires (PRBS : *Pseudo-Random Binary Sequences*) sont modulées optiquement à l'aide d'un modulateur externe (*Mach-Zehnder Modulator* : MZM), générant des signaux NRZ à un débit de 2.5 Gbps/canal dans le sens aval et amont.

Les données modulées sont amplifiées à l'aide d'un amplificateur EDFA à un gain de 17 dB, ensuite elles sont combinées dans un dispositif AWG de 4x1 sur une fibre optique SMF (*Single Mode Fiber*) constituant le support de transmission.

Le tableau III-1 ci-dessous, montre les paramètres utilisés dans notre système :

**Tableau III- 1 : Paramètres du système WDM-PON.**

Paramètres	Valeurs
Débit binaire	2.5 Gbps/canal (downstream), 2.5 Gbps/canal (upstream).
Puissance de Laser	-10 dBm, -8 dBm, -5 dBm, 0 dBm, 5 dBm, 8 dBm, 10 dBm.
Générateur d'impulsions	NRZ.
Longueur de la fibre SMF	20 km, 30 km, 40 km, 50 km, 60 km.
Dispersion chromatique CD	17 ps/nm/km.
Dispersion de mode de polarisation PMD	0.5 ps/km <sup>1/2</sup>
Atténuation	0.24 dB/km.
Gain EDFA	17 dB.
Nombre d'utilisateurs	4.
Longueur d'onde ( <i>downstream</i> )	1550 nm/canal.
Longueur d'onde ( <i>upstream</i> )	1550, 1549.2, 1548.4, 1547.6 nm.
La vidéo( <i>broadcast</i> )	1550 nm.
Espacement entre les canaux	0.8 nm.

### III.2.3 Etude de l'impact de la longueur de la liaison et de la puissance sur le système :

Dans le sens aval (*downstream*) du système WDM-PON pour une longueur de 20 km et une puissance de 0 dBm et d'après les figures III-3 et III-4, nous constatons que l'œil est complètement ouvert, c.à.d.  $TEB_{Downstream}$  et  $TEB_{Upstream} \approx 0$ , mais pour une longueur  $L = 60$  km (voir figures III-5 et III-6), le  $TEB_{Downstream} = 8,991 \cdot 10^{-12}$  et le  $TEB_{Upstream} = 4,417 \cdot 10^{-5}$ , par conséquent, les performances du système WDM PON commencent à se détériorer au-delà de 60 km.

De même, nous remarquons que si la longueur de la liaison augmente, le facteur de qualité  $Q$  diminue ( $Q_{Downstream} = 6,721$  et  $Q_{Upstream} = 3.108$ ) et pour une puissance = -10 dBm et une longueur = 20 km, nous obtenons des résultats faibles ( $Q_{Downstream} = 7.851$  et  $Q_{Upstream} = 3,212$ ), cela signifie que la puissance du laser pour le système WDM PON est un facteur déterminant.

Dans notre système, le rapport signal/bruit ou OSNR est un indicateur qui suit la performance du réseau optique et détermine toute dégradation qui peut affecter la qualité du service. Les résultats sont concluants pour  $L < 60$  km (voir figure III-9).

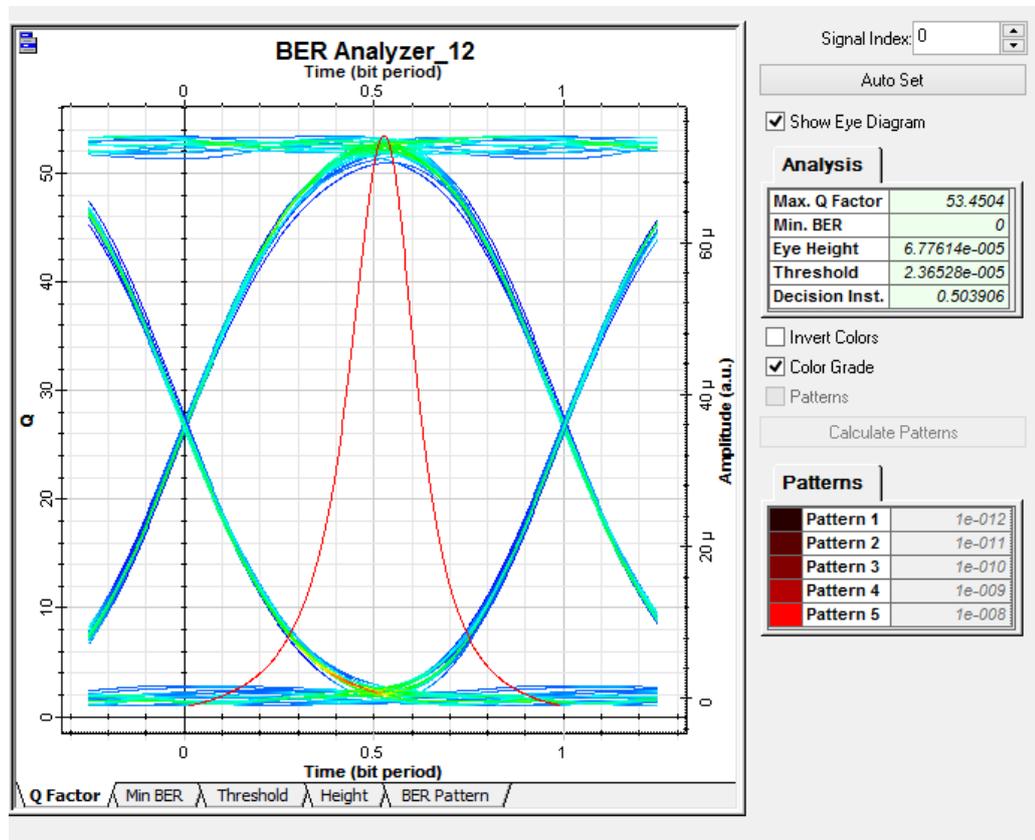


Figure III- 3 : Diagramme de l'œil pour  $L = 20$  km (WDM-PON Downstream).

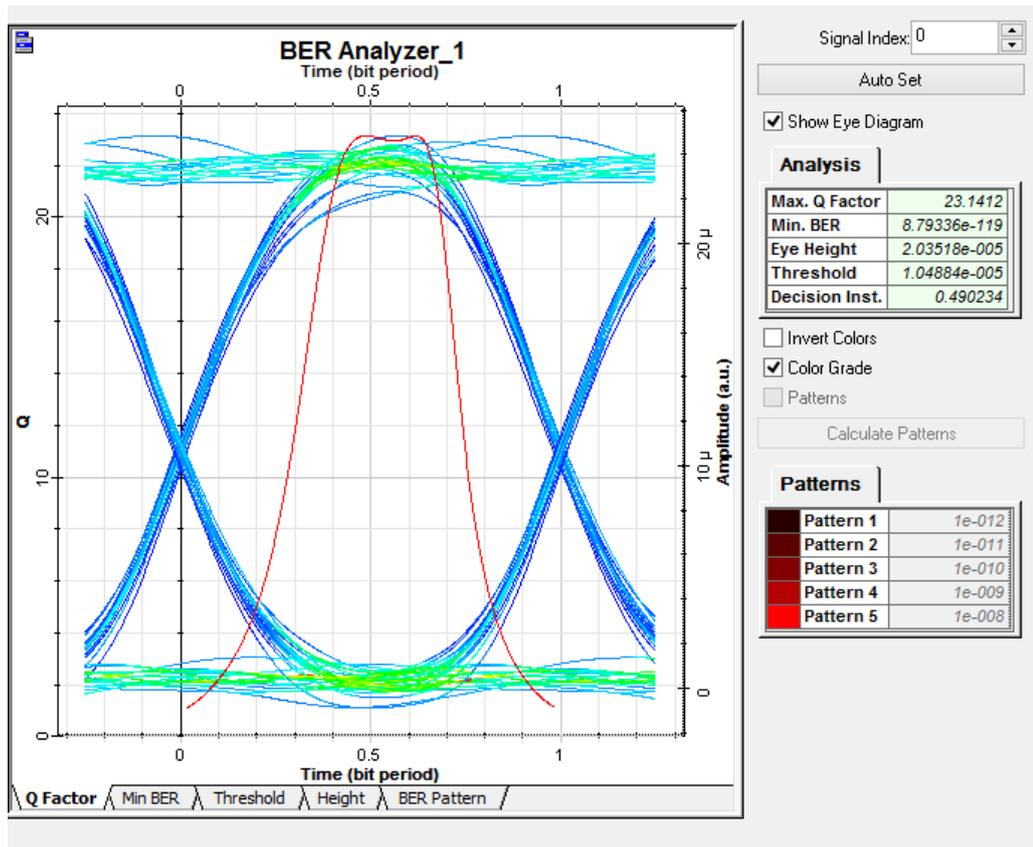


Figure III- 4 : Diagramme de l'œil pour L = 20 km (WDM-PON Upstream).

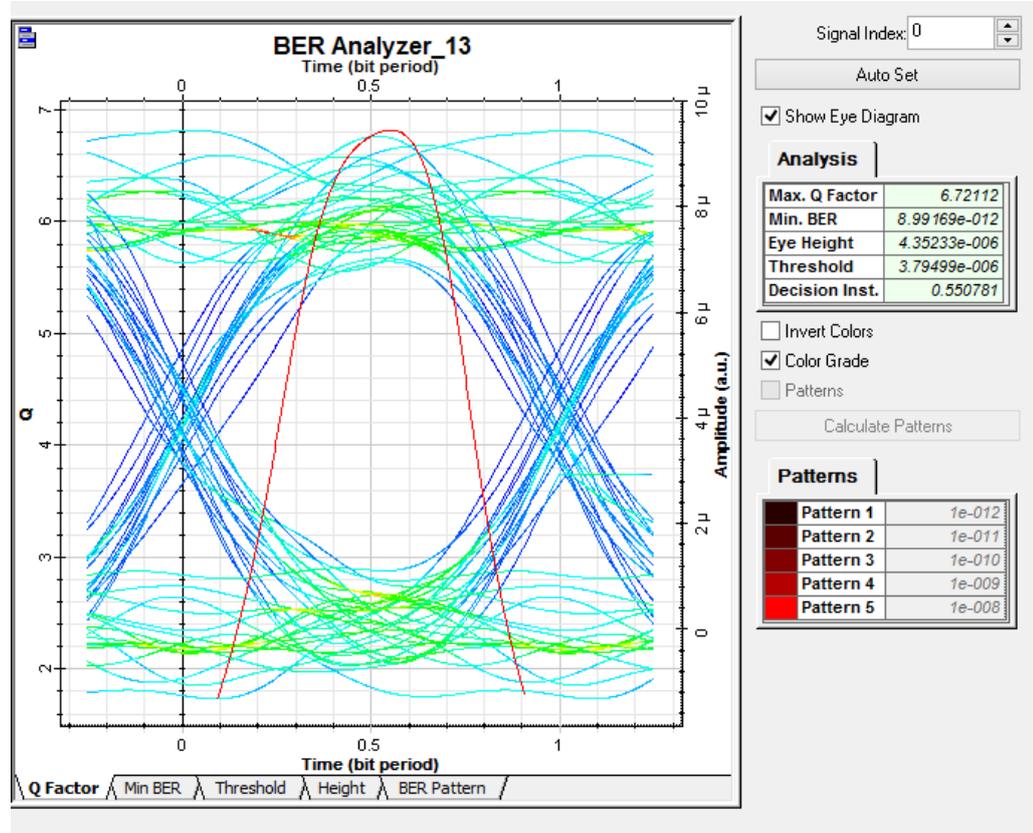


Figure III- 5 : Diagramme de l'œil pour L = 60 km (WDM-PON Downstream).

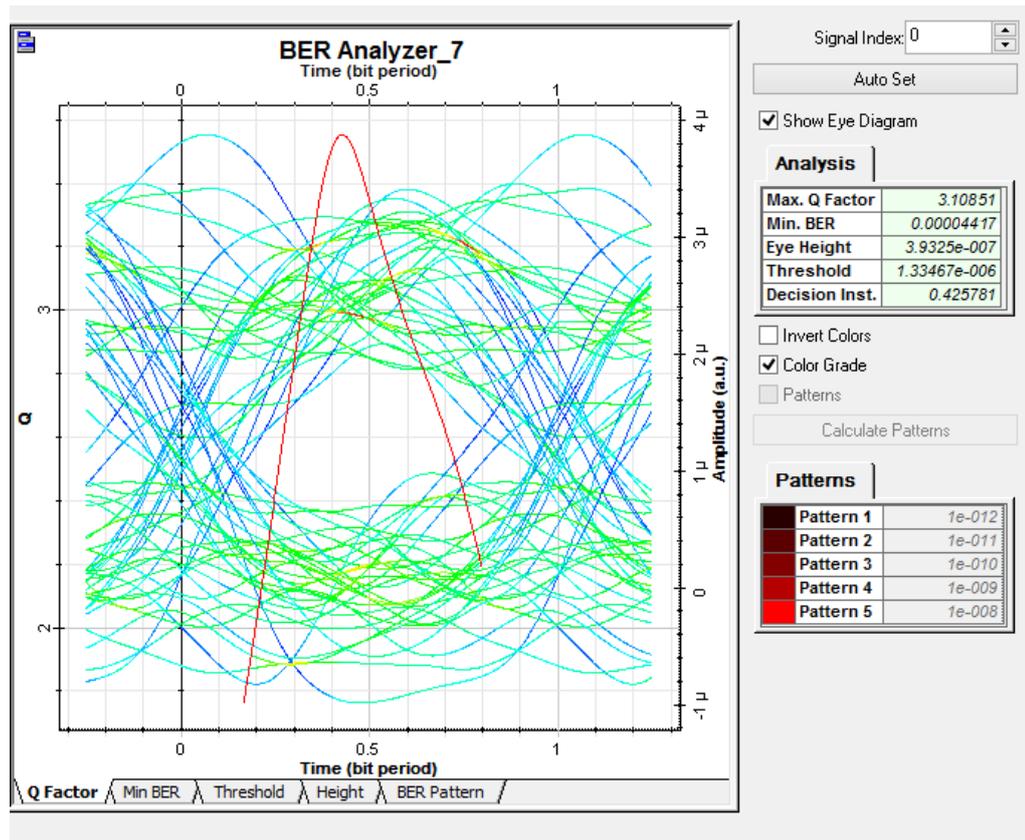


Figure III- 6 : Diagramme de l'œil pour L = 60 km (WDM-PON Upstream).  
Le facteur de qualité Q en fonction de la longueur L

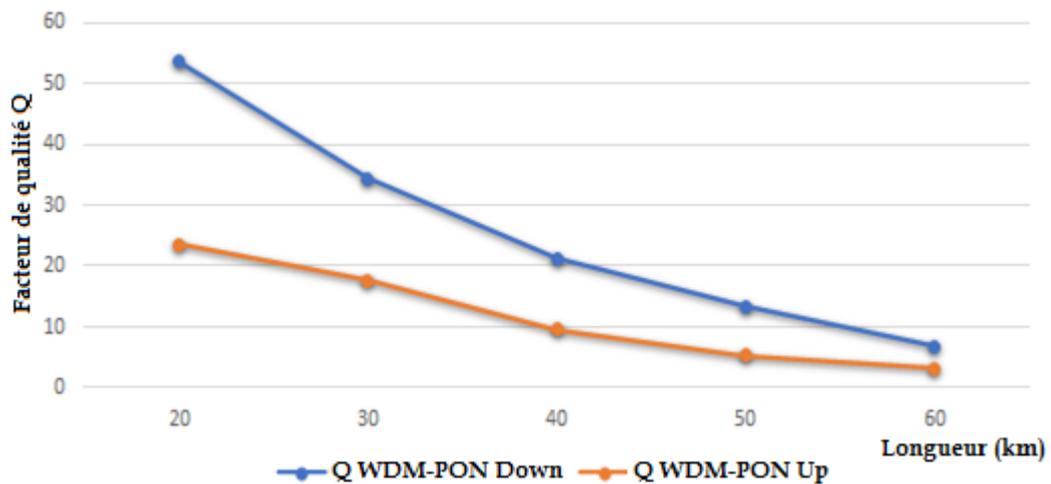


Figure III- 7 : Facteur de qualité Q en fonction de la longueur L.

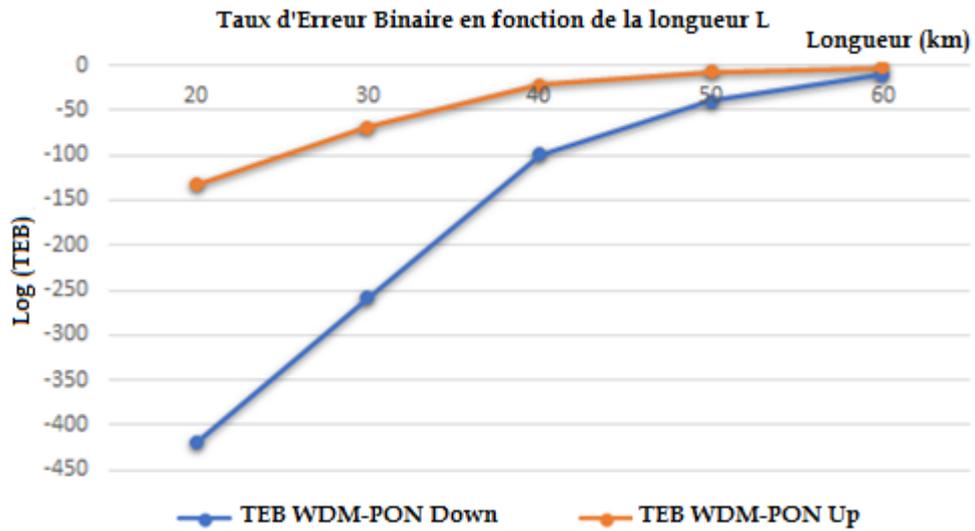


Figure III- 8 : TEB en fonction de la longueur L.

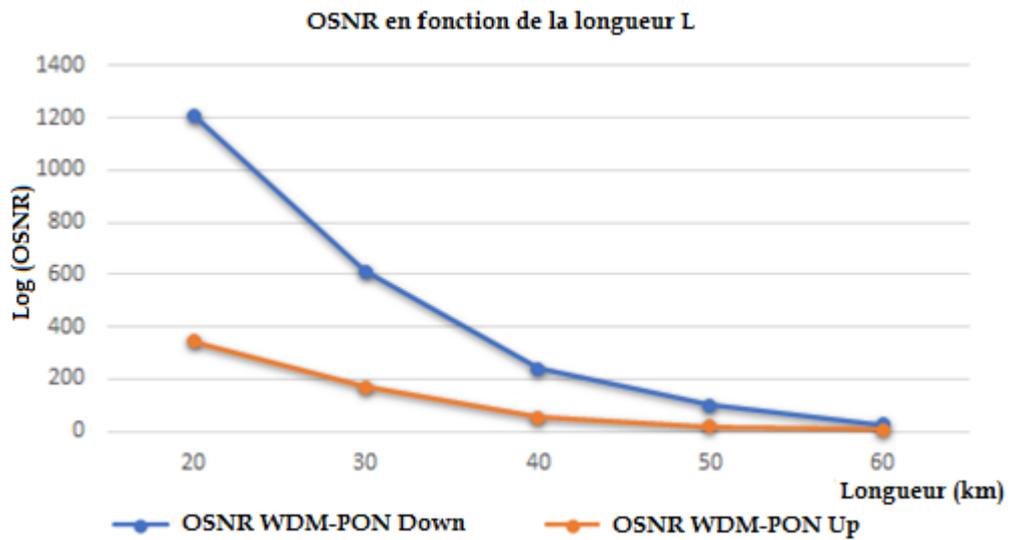


Figure III- 9 : OSNR en fonction de la longueur L.

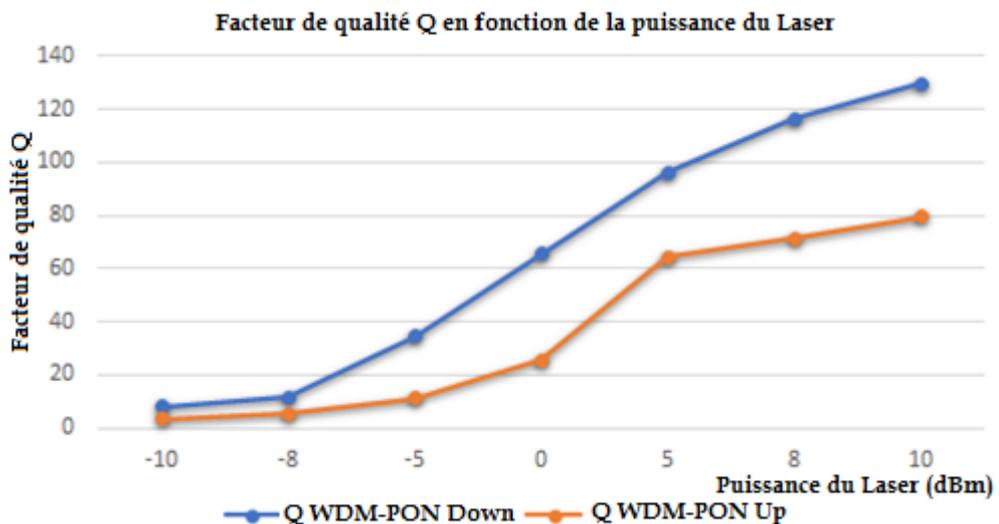


Figure III- 10 : Facteur de qualité Q en fonction de la puissance du Laser.

D'après la figure III-10, on peut facilement relever que le système fournit une meilleure performance pour des valeurs de puissances supérieures à -10 dBm que celles de valeurs inférieures, cela nous permet d'optimiser la consommation d'énergie du système.

Il est à noter que dans le sens aval (*downstream*), le système est plus performant que dans le sens amont (*upstream*).

### III.2.4 Etude de l'impact du format de modulation sur le système WDM-PON :

Dans notre système, nous étudions l'impact de deux formats de modulations sur le réseau WDM-PON, il s'agit du format de non-retour à zéro (NRZ) et du format retour à zéro (RZ).

Le tableau III-2, ci-dessous, présente la valeur du facteur de qualité Q pour chaque longueur de liaison avec une puissance fixe de 0 dBm.

Tableau III- 2 : L'impact du type de format de modulation sur le système WDM-PON.

L (km)	20	30	40	50	60
$Q_{\text{Downstream}}/Q_{\text{Upstream}}$ (RZ)	37.30/19.26	28.77/13.53	15.52/7.31	8.97/4.10	4.91/2.32
$Q_{\text{Downstream}}/Q_{\text{Upstream}}$ (NRZ)	53.45/23.14	34.33/17.67	21.2/9.58	13.31/5.27	6.72/3.10

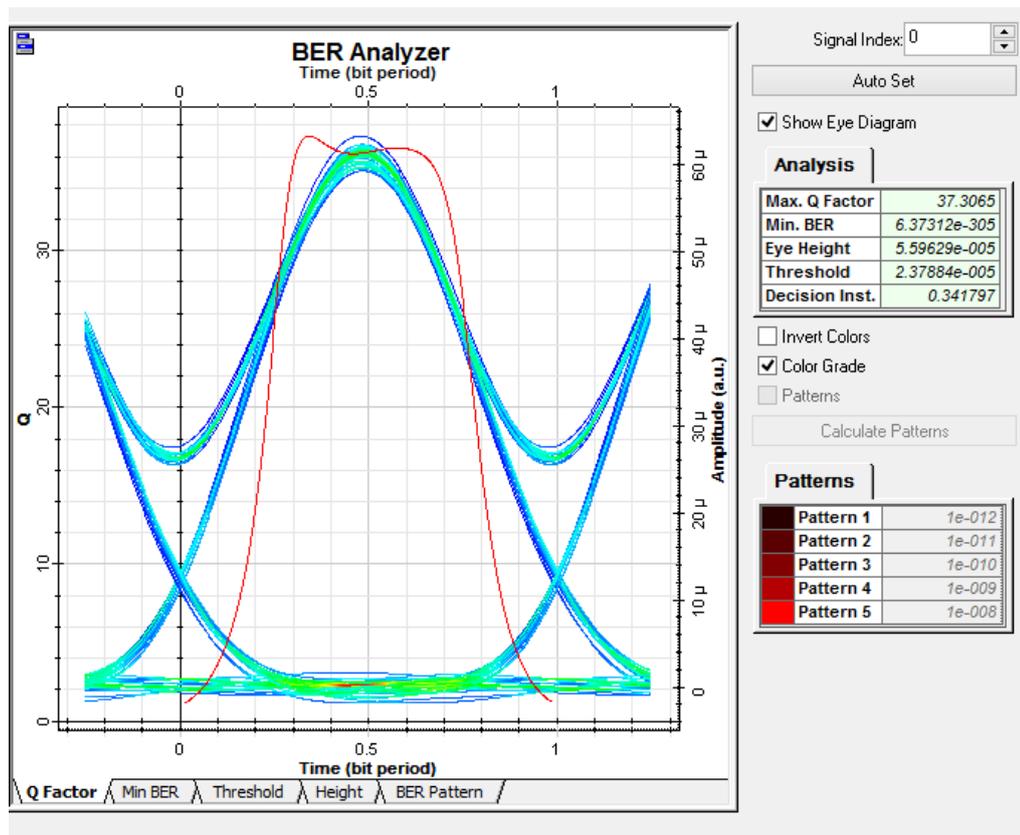


Figure III- 11 : Diagramme de l'œil pour L = 20 km (RZ-WDM-PON Downstream).

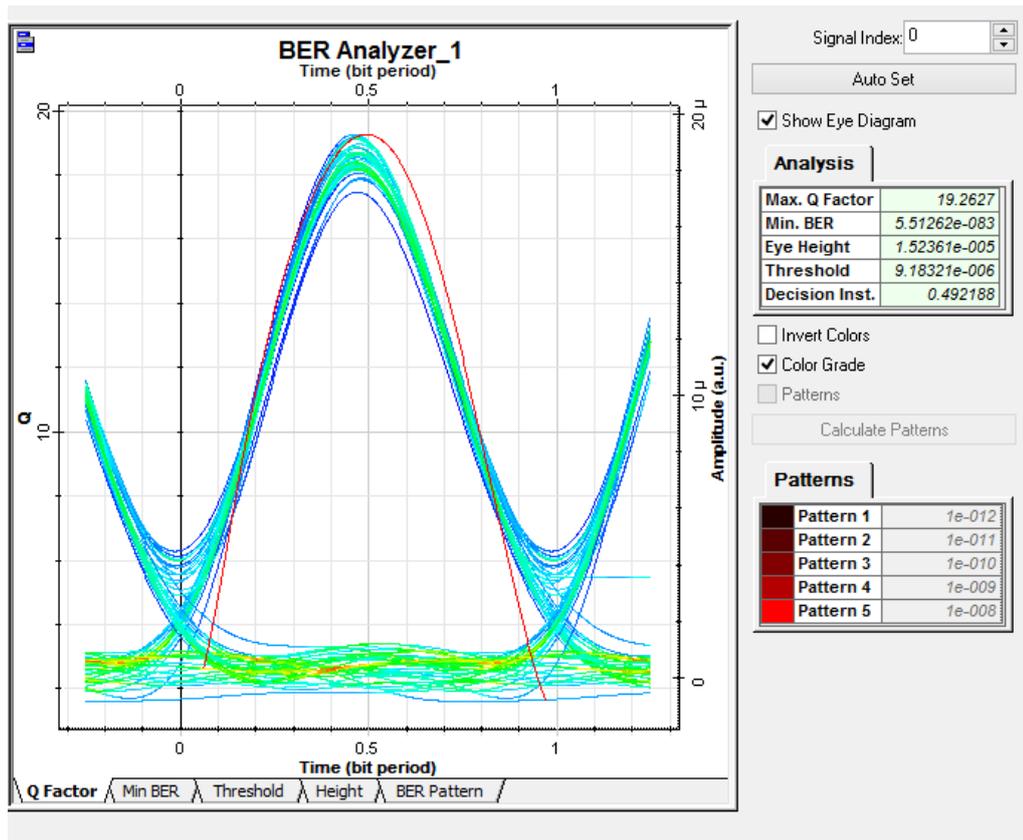


Figure III- 12 : Diagramme de l'œil pour L = 20 km (RZ-WDM-PON Upstream).

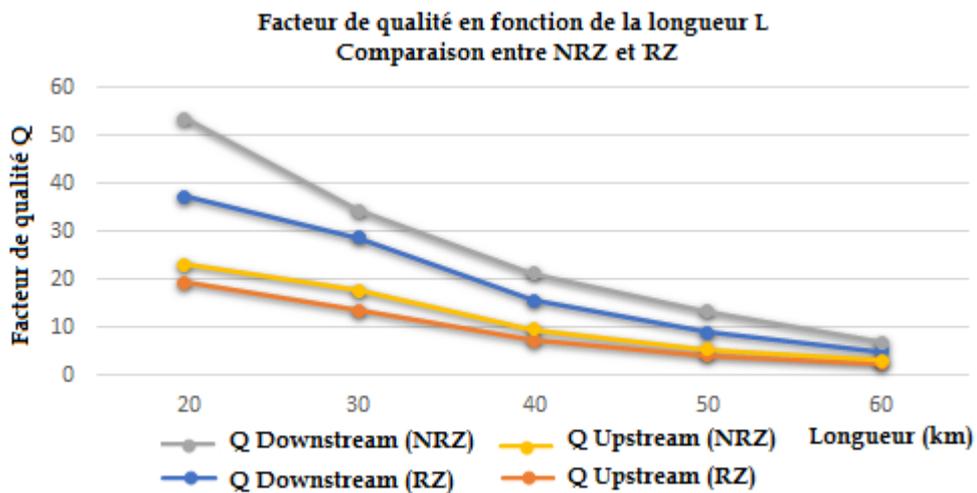


Figure III- 13 : Comparaison entre WDM-PON<sub>NRZ</sub> et WDM-PON<sub>RZ</sub>.

D'après le tableau III-2 et la figure III-13, nous remarquons que les performances du système WDM-PON avec le format de modulation NRZ sont meilleures par rapport au format de modulation RZ, dans les deux sens de transmission (*Downstream et Upstream*). Ce qui nous amène à conclure que le format de modulation RZ nécessite un spectre de fréquence plus grand par rapport à un format de modulation NRZ.

### III.3 Etude du système CWDM-PON :

#### III.3.1 Description du système simulé :

Le CWDM-PON contient trois étages à savoir l'étage de l'émetteur (OLT), le support de transmission (Fibre bidirectionnelle), le splitter (RN) ainsi que l'étage de la réception (ONU). Ce système est un réseau PON, donc il dispose de deux sens de communications, en l'occurrence il s'agit du sens aval (*downstream*) et du sens amont (*upstream*). Nous allons évaluer les performances dans les deux sens en étudiant l'impact de la longueur de la liaison, la puissance d'émission et le type du format de modulation sur le système CWDM-PON.

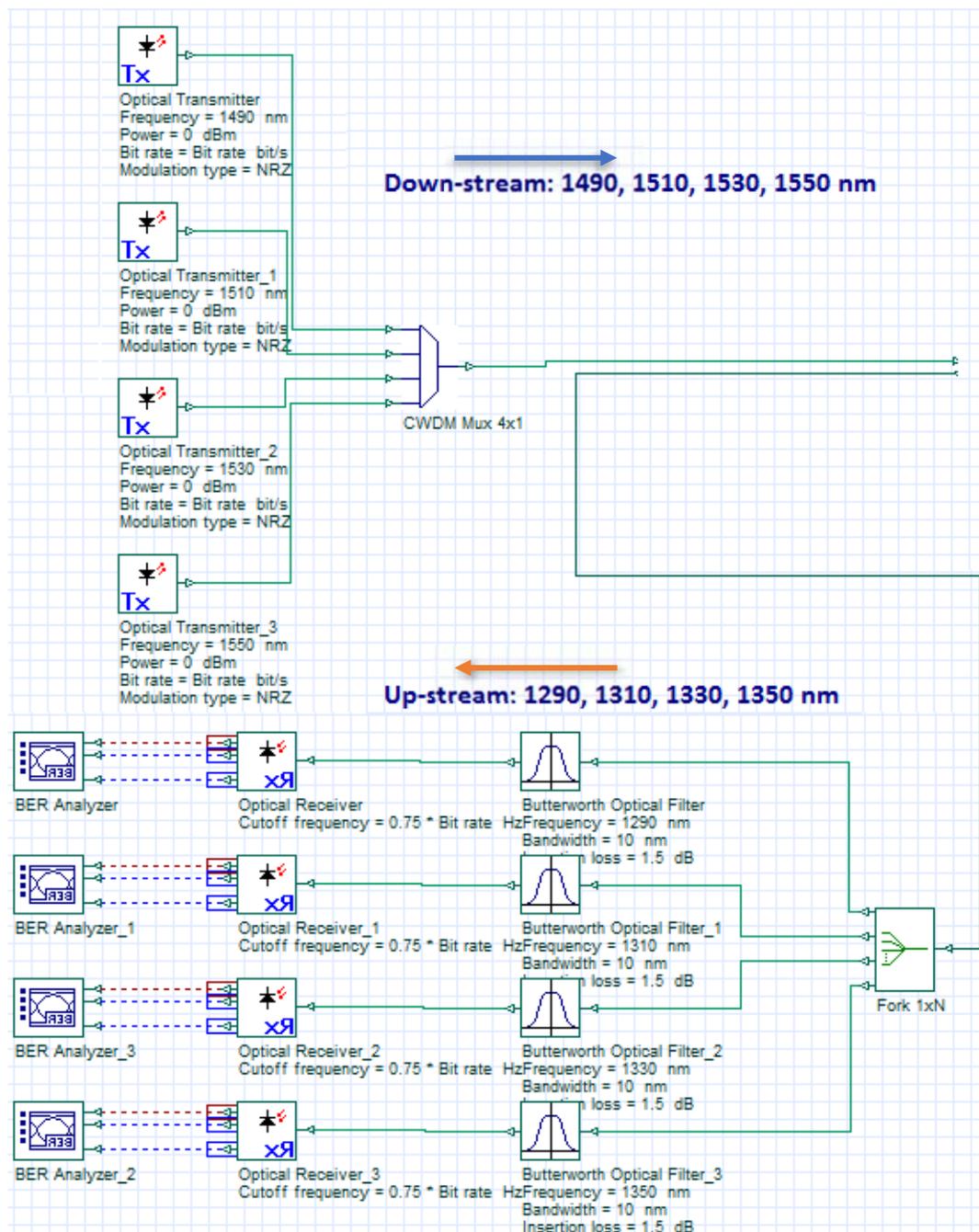


Figure III- 14 : Schéma du système CWDM-PON pour quatre utilisateurs (OLT).

Les figures III-14 et III-15, montrent la configuration d'un émetteur CWDM-PON (OLT : *Optical Line Terminal*) et d'un récepteur CWDM-PON (ONU : *Optical Network Unit*). La figure III-16, représente la fibre bidirectionnelle qui est le support de transmission et le splitter (RN) qui partage les longueurs d'ondes aux utilisateurs (ONU).

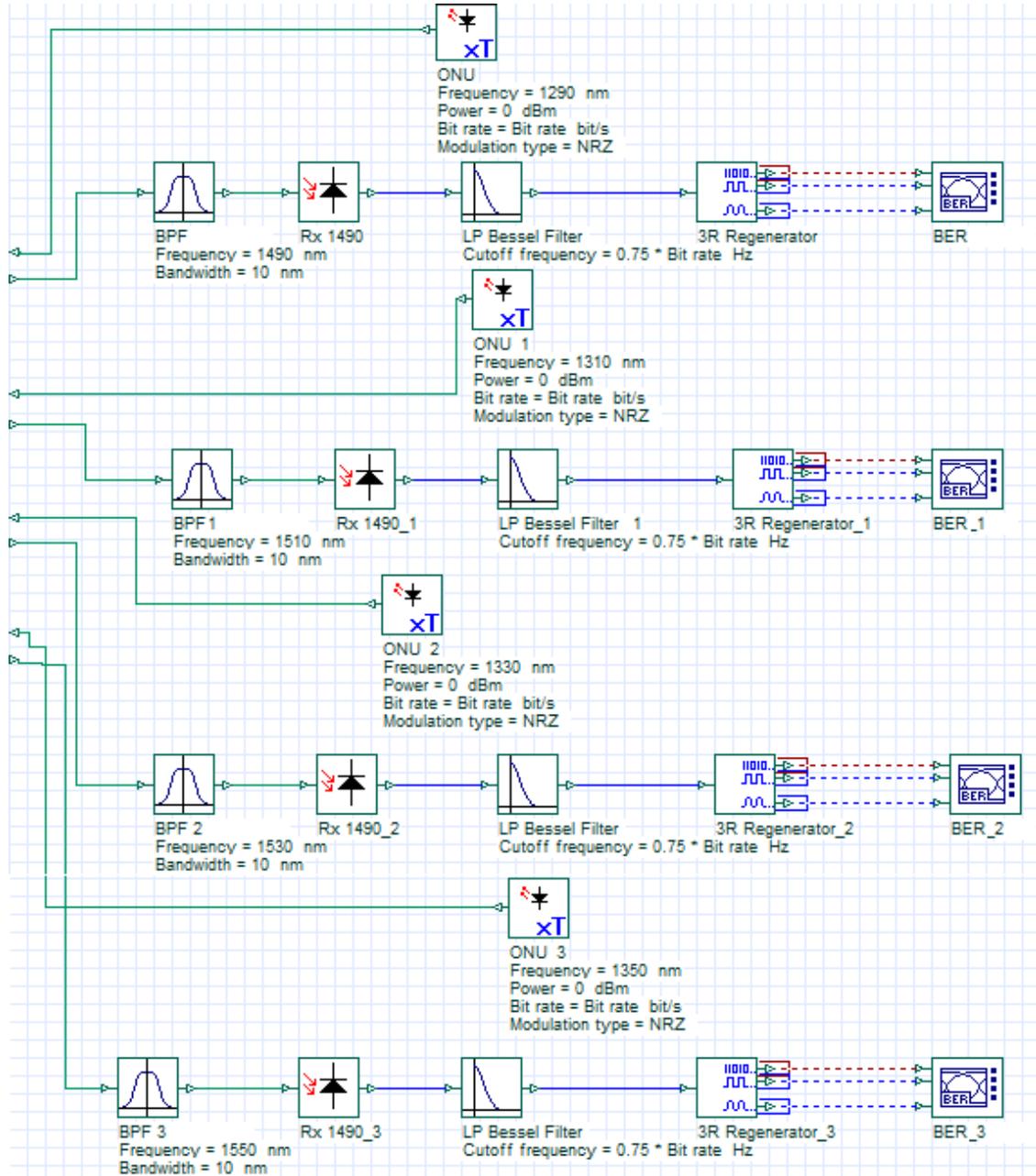
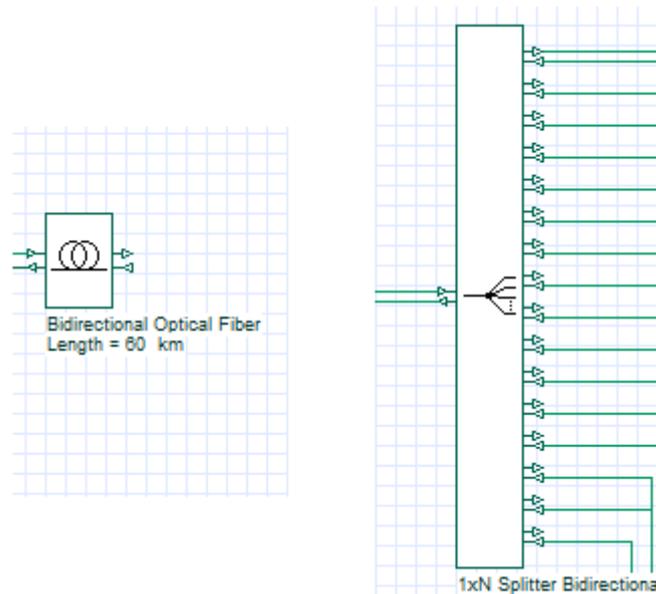


Figure III- 15 : Schéma du système CWDM-PON pour quatre utilisateurs (ONU).



**Figure III- 16 : Schéma de la fibre bidirectionnelle et le splitter (RN).**

Le système CWDM PON à simuler contient quatre utilisateurs, il est évalué en aval et en amont avec un débit binaire de 2,5 Gbps/canal, pour différentes longueurs de fibre SMF allant de 20 km jusqu'à 100 km (*comme indiqué dans le tableau III-3*). Les données et la voix sont envoyées en aval sur les longueurs d'onde suivantes : 1490 nm, 1510 nm, 1530 nm et la vidéo sur une longueur d'onde de 1550 nm.

Dans le sens amont, les données et la voix sont transmises à 1290 nm, 1310 nm, 1330 nm et 1350 nm. L'espacement entre les canaux est de 20 nm (*voir le tableau III-3*). Nous faisons varier la puissance d'émission du laser sur une plage allant de -12 dBm jusqu'à 10 dBm pour rendre compte de la puissance minimale qui limite les performances du système CWDM PON. La transmission se fait en mode duplex et est effectuée sur une fibre optique bidirectionnelle de différentes longueurs (*allant de 20 km à 100 km*), avec un débit binaire de  $4 \times 2.5$  Gbps. La bande passante disponible varie de 1270 nm à 1610 nm.

L'équipement de l'abonné partage un port sur l'OLT (*généralement jusqu'à 64 terminaux d'abonnés connectés à un port OLT*) ; cela est possible en utilisant des séparateurs optiques qui divisent passivement la puissance optique. Ce système contient des multiplexeurs optiques passifs [15].

### III.3.2 Paramètres de simulation :

Dans ce système, les données sont modulées à un débit de 2.5 Gbps/canal dans le sens aval et amont, ensuite elles sont multiplexées par un dispositif CWDM Mux 4x1 sur une fibre optique SMF (*Single Mode Fiber*) bidirectionnelle constituant le support de transmission.

Le tableau III-3 ci-dessous, montre les paramètres utilisés dans notre système :

**Tableau III- 3 : Paramètres du système CWDM-PON.**

Paramètres	Valeurs
Débit binaire	2.5 Gbps/canal ( <i>downstream</i> ), 2.5 Gbps/canal ( <i>upstream</i> ).
Puissance du Laser	-12, -10, -8, -5, 0, 5, 8, 10 dBm.
Générateur d'impulsions	NRZ.
Longueur de la fibre SMF	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 km.
Dispersion chromatique CD	17 ps/nm/km.
Dispersion de mode de polarisation PMD	0.5 ps/km <sup>1/2</sup>
Atténuation	0.2 dB/km.
Nombre d'utilisateurs	4.
Longueur d'onde ( <i>downstream</i> )	1490, 1510, 1530, 1550 nm.
Longueur d'onde ( <i>upstream</i> )	1290, 1310, 1330, 1350 nm.
La vidéo ( <i>broadcast</i> )	1550 nm.
Espacement entre les canaux	20 nm.

*Remarque importante* : Dans le système CWDM, l'amplification n'est pas indispensable car les longueurs d'onde utilisées dans ce système ne sont pas affectées par le pic d'eau (*Water peak*) qui provoque une forte atténuation des longueurs d'onde proche de 1383 nm (selon la recommandation de l'IUT Février 2006) [61]. Donc c'est un avantage du côté coût pour notre système.

### III.3.3 Etude de l'impact de la longueur de la liaison et de la puissance sur le système :

Il est évident que pour  $L = 20$  km, le système présente un meilleur facteur de qualité  $Q$  c.à.d. l'œil est complètement ouvert, mais pour  $L = 100$  km, le diagramme de l'œil commence à se dégrader. On voit que le système est limité à une distance de 100 km c.à.d.  $Q_{\text{Downstream}} = 5,768$  et  $Q_{\text{Upstream}} = 4,412$  (voir figure III-19). De même pour une puissance de -12 dBm et une longueur = 20 km, nous obtenons les résultats suivants :  $Q_{\text{Downstream}} = 11,331$  et  $Q_{\text{Upstream}} = 6,671$  (voir figure III-17 et III-18). Donc ces chiffres nous permettent de conclure que les résultats obtenus pour le système CWDM-PON sont meilleurs par rapport aux résultats du système WDM PON.

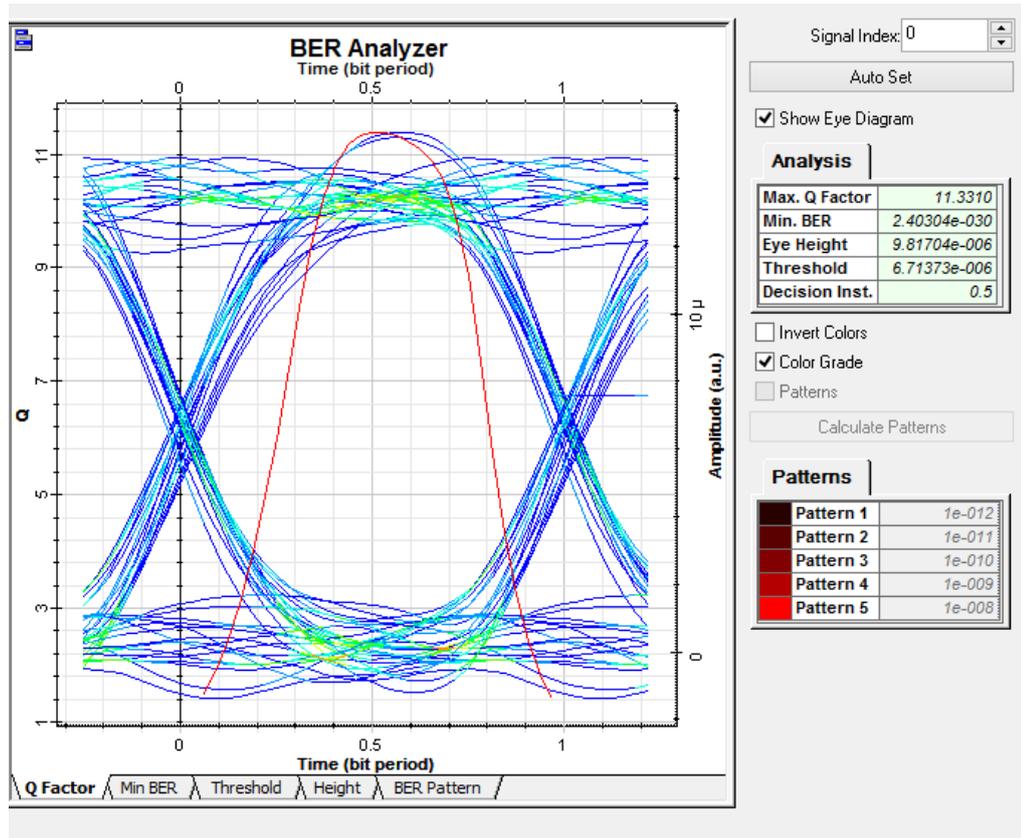


Figure III- 17 : Diagramme de l'œil pour L = 20 km et P= -12 dBm (CWDM-PON<sub>NRZ</sub> Downstream).

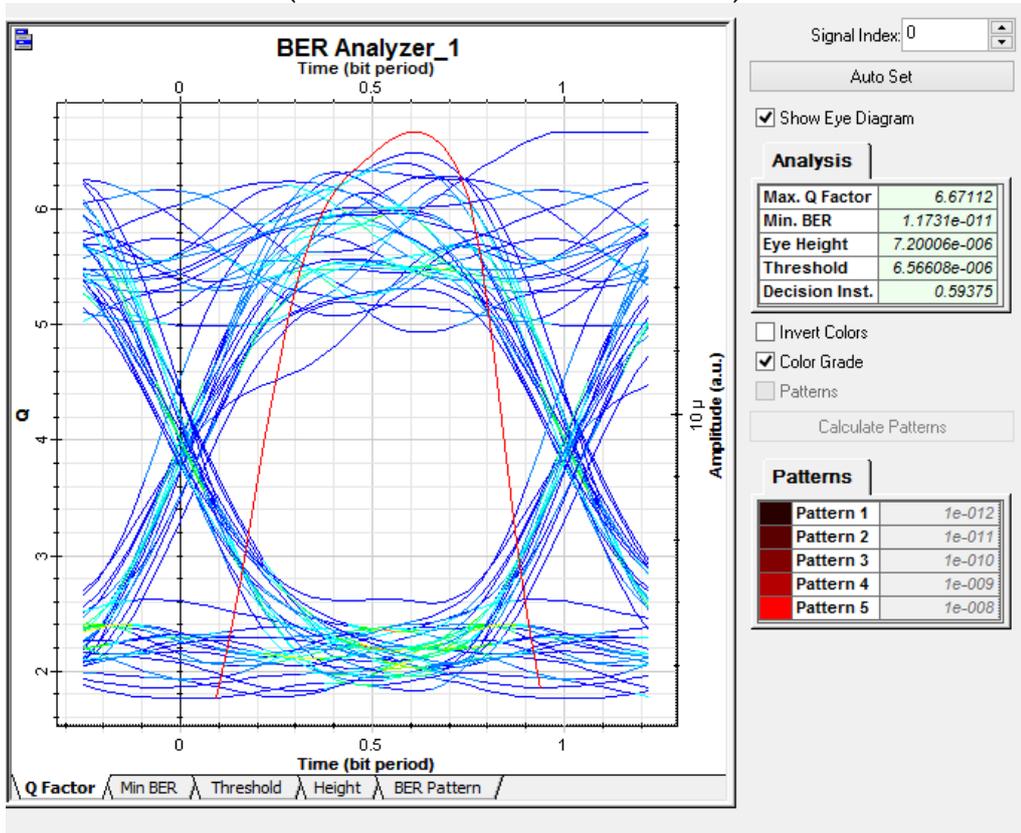


Figure III- 18 : Diagramme de l'œil pour L = 20 km et P= -12 dBm (CWDM-PON<sub>NRZ</sub> Upstream).

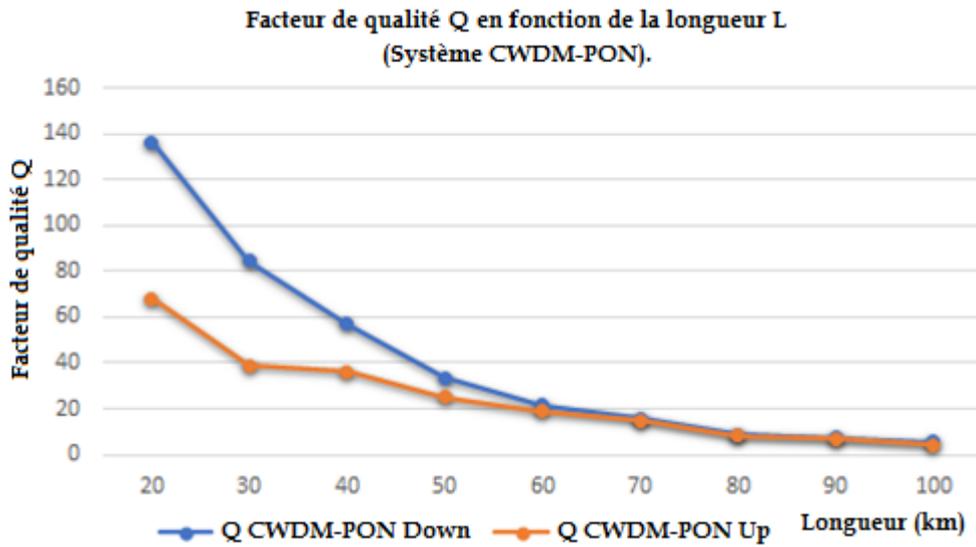


Figure III- 19 : Facteur de qualité Q en fonction de la longueur L.

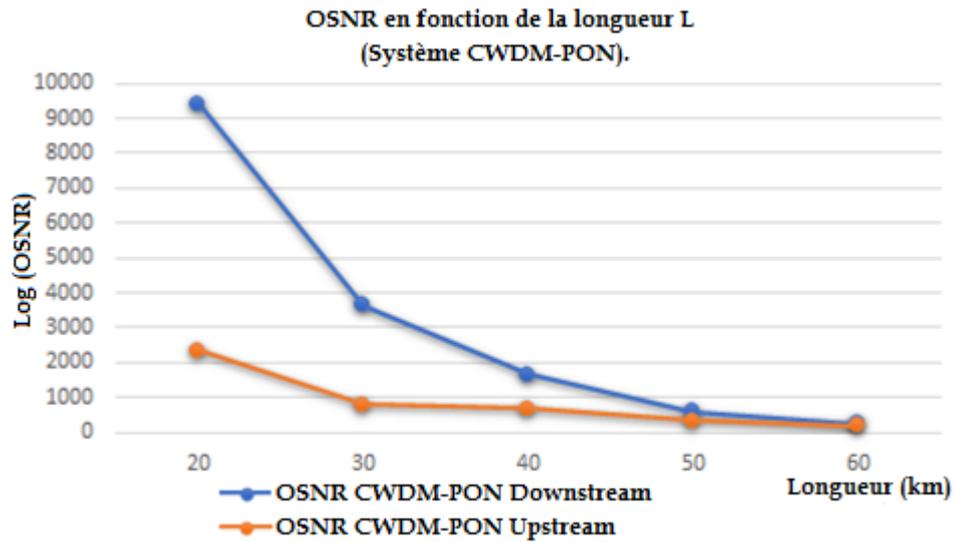


Figure III- 20 : OSNR en fonction de la longueur L.

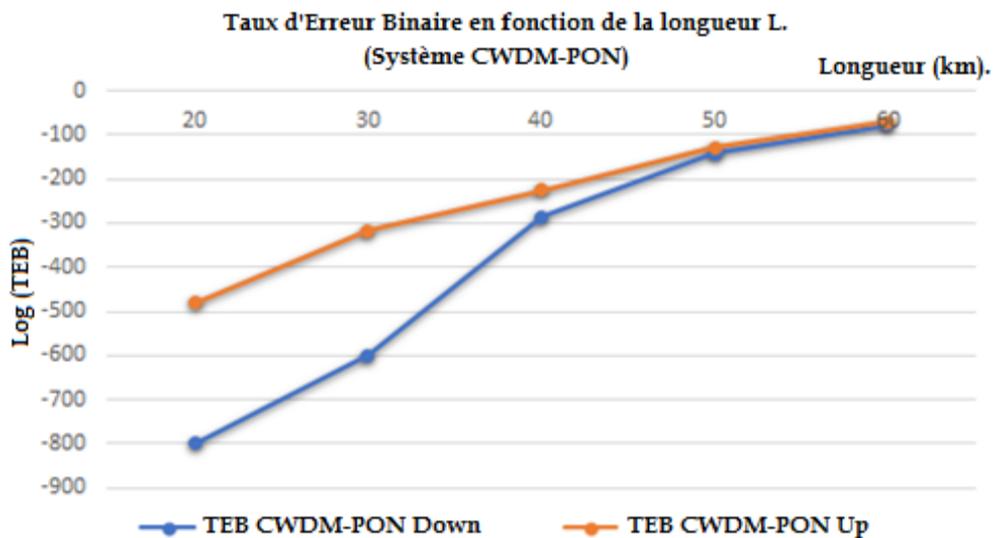


Figure III- 21 : TEB en fonction de la longueur L.

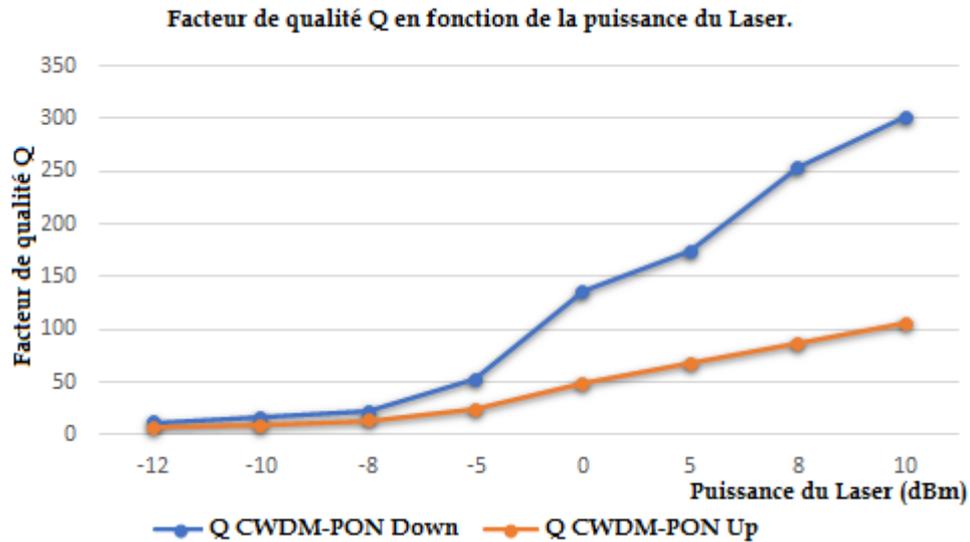


Figure III- 22 : Facteur de qualité Q en fonction de la puissance.

### III.3.4 Etude de l'impact du format de modulation sur le système CWDM-PON :

Nous étudions l'impact de deux formats de modulations sur le réseau CWDM-PON, il s'agit toujours des formats NRZ et RZ.

Le tableau ci-dessous, présente la valeur du facteur de qualité Q pour chaque longueur de liaison avec une puissance fixe de 0 dBm.

Tableau III- 4 : L'impact du type de format de modulation sur le système CWDM-PON.

L (km)	20	30	40	50	60
$Q_{\text{Downstream}}/Q_{\text{Upstream}}$ (RZ)	48.77/34.34	39.71/27.55	36.50/27.15	25.42/20.90	19.84/16.22
$Q_{\text{Downstream}}/Q_{\text{Upstream}}$ (NRZ)	136.46/68.01	84.57/38.88	57.02/36.11	33.66/25.34	22.41/18.42

D'après le tableau III-4 et la figure III-23, nous constatons que le format de modulation NRZ pour le système CWDM-PON présente de meilleurs résultats dans les sens (*aval et amont*), et encore une fois, nous concluons que le type du format de modulation est un facteur d'importance non négligeable dans notre réseau PON.

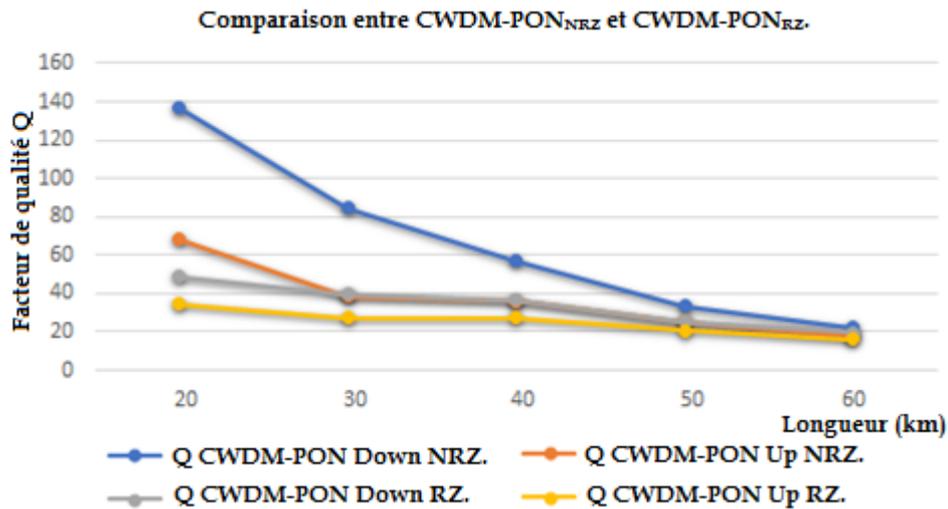


Figure III- 23 : Comparaison entre CWDM-PON<sub>NRZ</sub> et CWDM-PON<sub>RZ</sub>.

#### III.4 Comparaison entre le système WDM-PON et le système CWDM-PON :

Le tableau III-5 ci-dessous, illustre une comparaison entre les deux types de multiplexage (*WDM et CWDM*) implantés dans le réseau PON, cette comparaison tient compte des caractéristiques suivantes :

- La distance (la longueur de la liaison).
- La puissance du laser.
- Le format de modulation RZ et NRZ.
- Les composants.
- Avantages et inconvénients.
- Applications.

**Remarque :** Nous n'avons pas comparé le WDM et le CWDM avec le DWDM, car ce dernier exploite la même bande passante avec le WDM (*la bande C*) et le CWDM (*la bande C et L*).

##### a) Impact de la longueur de la liaison avec le format de modulation RZ :

Les figures III-24 et III-25 montrent que lorsque la distance entre l'OLT et l'ONU augmente de 20 km à 60 km, le facteur de qualité Q diminue dans les deux sens aval et amont pour les deux systèmes.

On remarque pour  $L = 20$  km, le Q-CWDM PON en aval et en amont est supérieur au Q-WDM PON en aval et en amont, mais les deux systèmes demeurent efficaces et donnent de bons résultats. Cependant pour  $L = 60$  km, le Q-CWDM PON en aval et en amont est meilleur comparé au système WDM PON en aval et en amont. Le WDM PON subit une dégradation importante, ce que signifie qu'il est limité à des distances inférieures à 60 km. En comparant celui-ci avec le système CWDM-PON, on trouve que la distance maximale de ce dernier est de 100 km.

Donc, on conclut que la distance est un facteur très important dans les réseaux optiques passifs.

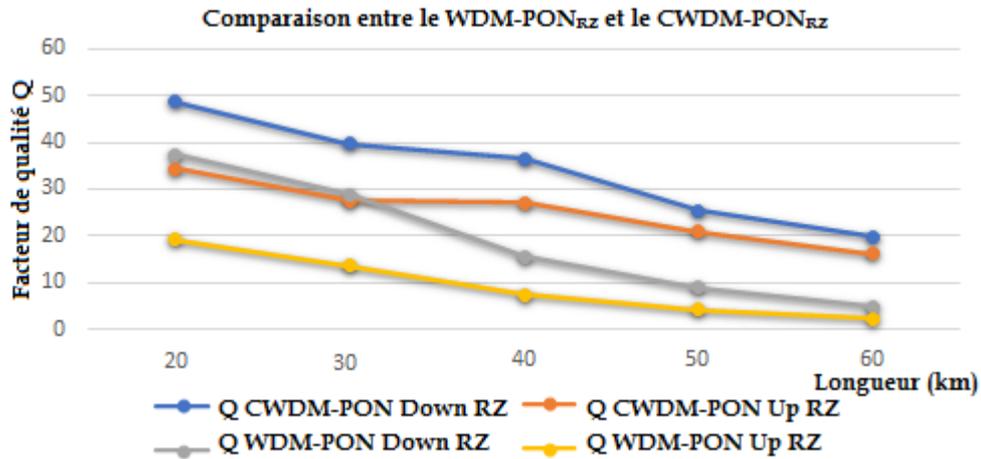


Figure III- 24 : Comparaison entre le WDM-PON<sub>RZ</sub> et le CWDM-PON<sub>RZ</sub>

Concernant le format de modulation RZ pour les deux systèmes, les résultats obtenus ne changent rien pour les performances des deux systèmes, mais à comparer avec le format NRZ, on trouve que le format de modulation NRZ permet de meilleurs résultats par rapport au format (RZ).

*b) Impact de la longueur de la liaison avec le format de modulation NRZ :*

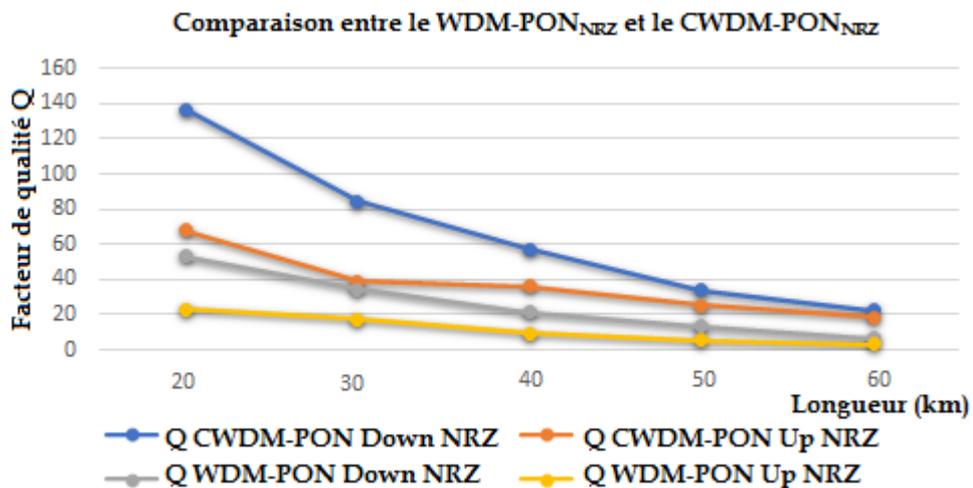


Figure III- 25 : Comparaison entre le WDM-PON<sub>NRZ</sub> et le CWDM-PON<sub>NRZ</sub>

Il est évident qu'en comparant les résultats obtenus avec le format de modulation NRZ avec les résultats du format de modulation RZ et d'après la figure III-25 ci-dessus, le NRZ présente de bien meilleurs résultats.

c) Impact de la puissance :

La figure III-26 ci-après, montre qu'une augmentation de la puissance d'émission du laser entraîne une augmentation du facteur de qualité Q. Quand  $P_{\text{Laser}} = -10$  dBm, on voit que le Q-CWDM PON en aval et en amont est plus grand que le Q-WDM PON en aval et en amont.

Le WDM PON subit une dégradation importante lorsque la puissance est inférieure à -10 dBm, cela signifie que le système CWDM PON consomme moins d'énergie.

Le CWDM PON fonctionne bien sur une distance de 20 km à 100 km et une puissance minimale de -12 dBm, avec un meilleur facteur de qualité Q, un taux d'erreur binaire TEB minimum et un rapport signal sur bruit OSNR important par rapport au système WDM PON. Cependant, les performances du système WDM PON se dégradent au-delà d'une distance de 60 km et pour une puissance inférieure à -10 dBm.

Les courbes de comparaison montrent que le système CWDM PON a été évalué avec succès par rapport au système WDM PON.

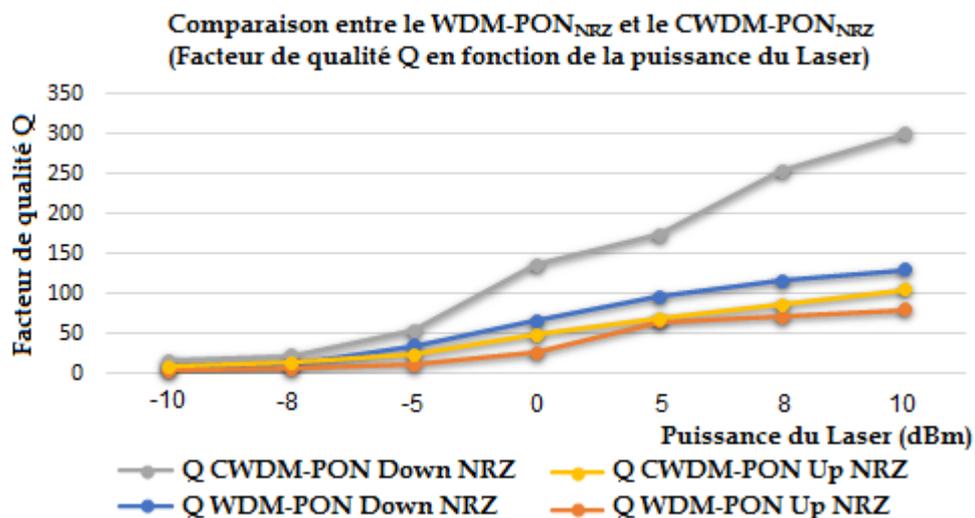


Figure III- 26 : Comparaison entre le WDM-PON<sub>NRZ</sub> et le CWDM-PON<sub>NRZ</sub> (Facteur de qualité Q en fonction de la puissance du Laser).

En conclusion, les performances du système WDM-PON semblent meilleures avec une distance de 20 km à 60 km et pour une puissance minimum de -10 dBm avec le format de modulation NRZ, mais ce système reste inutilisable pour des distances supérieures à 60 km, car au-delà de cette distance, le WDM-PON est affecté par des effets non-linéaires, comme le FWM et le XPM en raison de l'espacement entre les canaux (*inférieur à 0,8 nm*) ce qui provoque des interférences entre les canaux adjacents. Le WDM-PON nécessite aussi une amplification de type EDFA (*dispositif qui coûte cher*).

Les résultats obtenus dans cette thèse permettent d'affirmer que le système CWDM PON était la technique la plus appropriée pour la transmission optique en réseau d'accès PON, car il ne nécessite pas d'éléments coûteux exigeant un contrôle (*laser, amplificateurs, filtres, ...*) comme le système WDM PON.

Le principal inconvénient du CWDM est que le nombre de canaux est limité par rapport au système WDM.

Tableau III- 5 : Comparaison entre le WDM-PON et le CWDM-PON.

Type de multiplexage Caractéristiques	WDM-PON	CWDM-PON
Distance	$L_{Max.} = 60$ km.	$L_{Max.} = 100$ km.
Puissance de laser	$P_{Min.} = -10$ dBm.	$P_{Min.} = -12$ dBm.
Tolérance de laser ( <i>l'imprécision ou la variabilité de la longueur d'onde</i> )	Plus serrée → nécessite un refroidisseur de température.	$\pm 3$ nm ( <i>nécessite un laser non refroidi à faible coût</i> ).
Format de modulation	NRZ.	NRZ.
Effets non-linéaires	Affecté par le FWM au-delà de 60 km.	Non affecté par le FWM. ( <i>espacement entre les canaux est large</i> ).
Dispersion chromatique CD	Nécessite une fibre DCF après 60 km.	Nécessite une fibre DCF après 100 km.
Composants	+ EDFA et +2 AWG.	Pas d'amplification.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exploite la totalité de la bande passante.</li> <li>- Augmente la capacité du réseau.</li> <li>- Supporte jusqu'aux 32 longueurs d'ondes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonctionne à une largeur de bande plus élevée que le WDM.</li> <li>- Couvre 18 canaux optiques (<i>en pratique 8 canaux</i>).</li> <li>- Composants optiques à faible coût.</li> <li>- Consomme moins d'énergie qu'un système WDM.</li> <li>- Longueurs d'onde utilisées ne sont pas affectées par le pic d'eau (<i>Water peak</i>).</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Des dispositifs qui sont un peu coûteux.</li> <li>- Affecté par l'atténuation (<i>affecté par le pic d'eau : Water peak</i>) et les effets non linéaires (FWM, XPM).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nombre des canaux est limité par rapport au WDM.</li> </ul>
Applications	- FTTx, xDSL, Wireless, Ethernet, SONET.	- LAN, MAN, FTTx, PON, radiodiffusion et la télévision (CA-TV).

Il est à noter que certaines architectures pour les systèmes WDM-PON et CWDM PON ont été proposées dans [88, 89] et [90]. Ces deux systèmes donnent de bons résultats, qui utilisent des filtres réfléchissants bidirectionnels (BRF), un amplificateur optique à semi-conducteur réfléchissant (RSOA), un laser à diode Fabry-Pérot (FP-LD) et AWG qui sont coûteux.

Dans notre travail, nous avons proposé deux architectures moins onéreuses pour les deux systèmes utilisant un amplificateur EDFA et l'AWG pour le WDM-PON, mais pour le CWDM-PON, nous n'avons utilisé que des coupleurs optiques et sans amplification [61].

### III.5 Etude du système hybride :

Dans cette partie, nous proposons le système hybride OTDM/WDM pour optimiser notre chaîne de transmission optique afin de la comparer aux systèmes précités dans la première partie de ce chapitre.

#### III.5.1 Etude du système OTDM :

##### III.5.1.1 Description du système simulé :

Le système OTDM est composé de trois étages à savoir l'étage de l'émetteur (voir figure III-27), le support de transmission et l'étage de la réception (voir figure III-28).

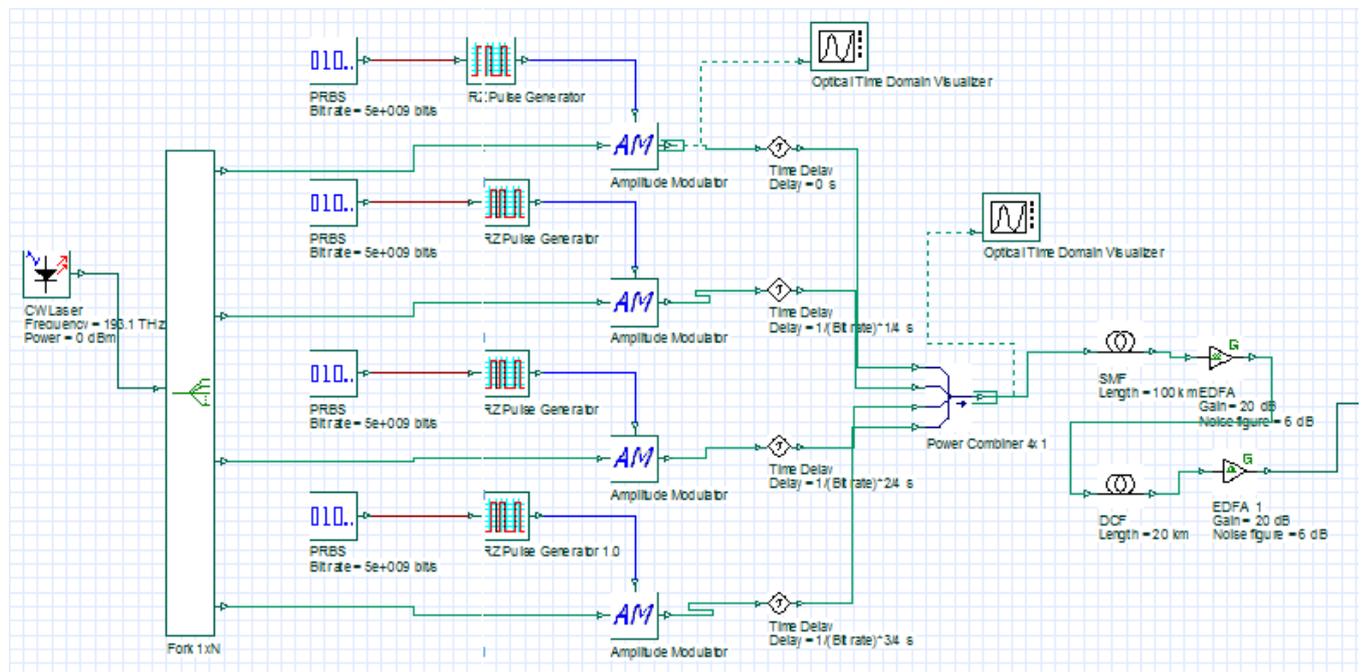


Figure III- 27 : Bloc d'émission à 4 utilisateurs OTDM avec le support de transmission.

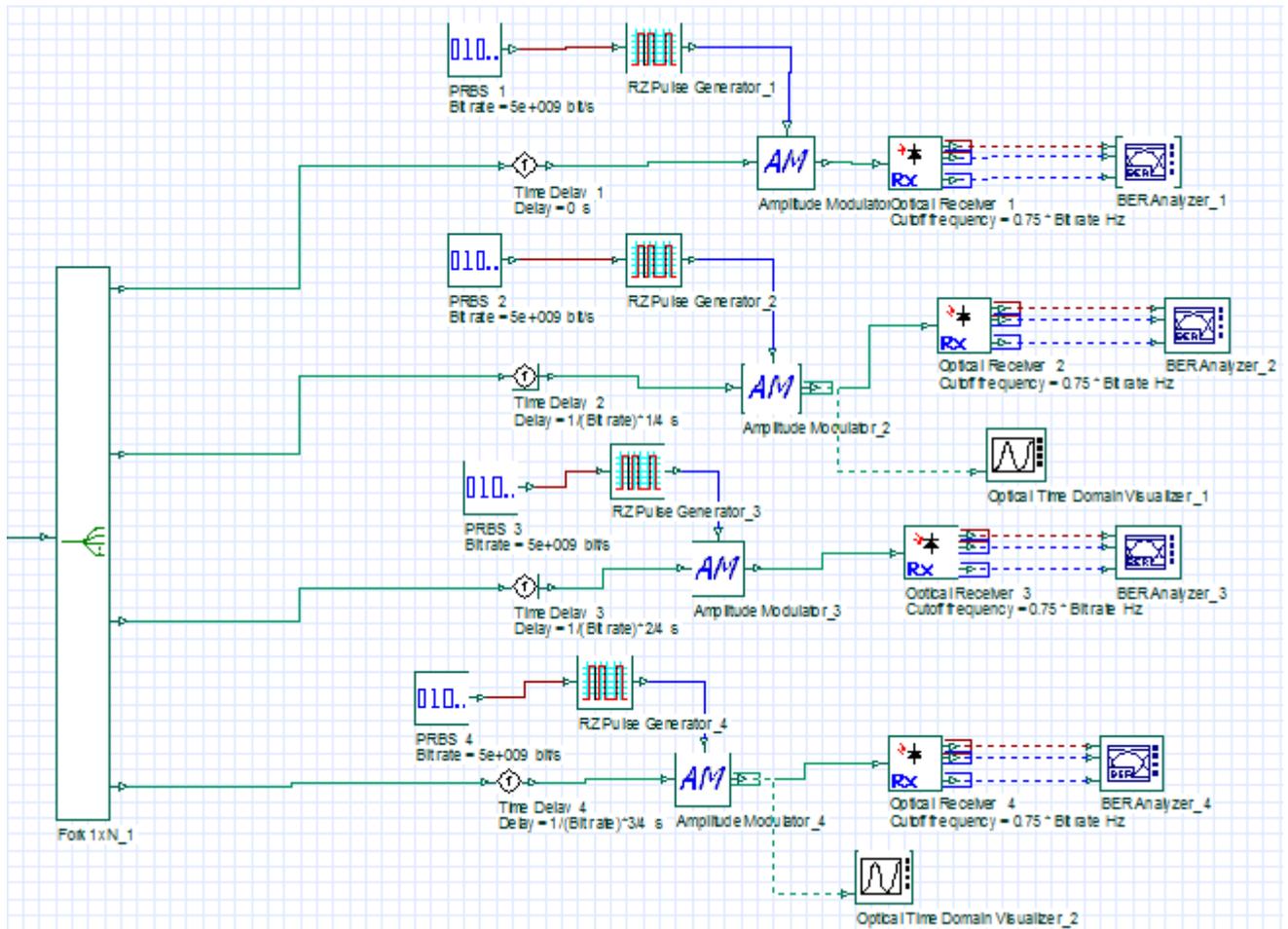


Figure III- 28 : Bloc de réception à 4 utilisateurs OTDM.

Le système OTDM est un outil robuste qui permet de surmonter la limitation de bande passante des composants électroniques et optoélectroniques et d'augmenter considérablement le débit binaire du signal transmis. Ce système utilise uniquement une approche dans le domaine temporel.

La figure III-27, montre un schéma de principe d'un système de transmission OTDM à 4 canaux. Les données optiques provenant d'une diode laser sont divisées en 4 chemins dont chaque canal (*voie*) est modulé individuellement par un signal de données électrique formant 4 canaux de données au format RZ optique. Chacune des impulsions est retardée d'une fraction de période d'horloge.

Les performances du système OTDM sont évaluées pour différents débits binaires 20 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps et 160 Gbps sur différentes longueurs de fibre SMF à 100 km, 150 km, 200 km, 250 km et 300 km, avec une puissance d'émission fixe de 0 dBm. Les paramètres du système OTDM sont mentionnés au tableau III-6.

### III.5.1.2 Paramètres de simulation :

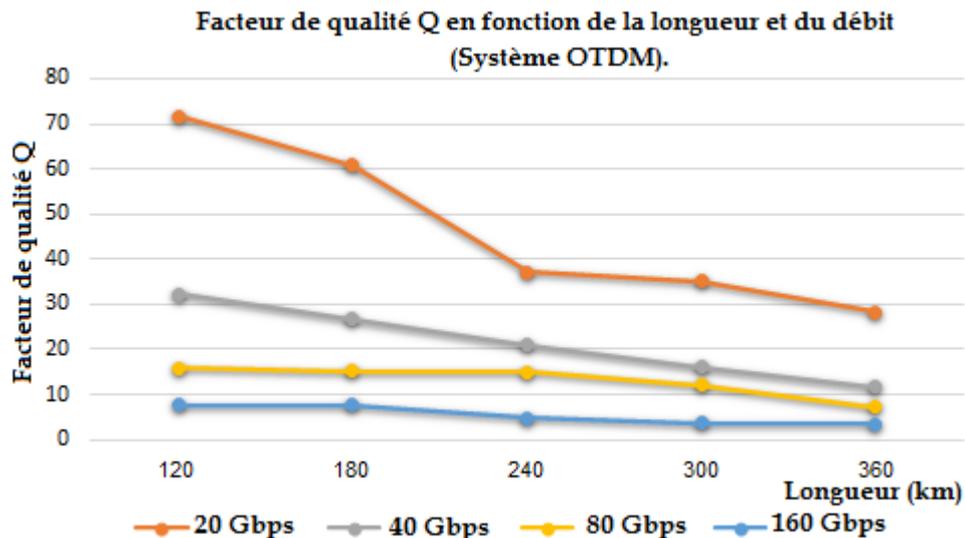
Dans ce système, les données une fois modulées à un débit de 5 Gbps/canal, elles sont combinées par un dispositif *Power Combiner 4x1* sur une fibre optique SMF (*Single Mode Fiber*) constituant le support de transmission.

Le tableau III-6 ci-dessous, montre les paramètres utilisés dans notre système :

**Tableau III- 6 : Paramètres du système OTDM.**

Paramètres	Valeurs
Débit binaire	20 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps et 160 Gbps.
Puissance du Laser	0 dBm.
Générateur d'impulsions	RZ.
Longueur de la fibre SMF	100 km, 150 km, 200 km, 250 km et 300 km.
Longueur de la fibre DCF	20 km, 30 km, 40 km, 50 km et 60 km.
Dispersion chromatique $CD_{SMF}$	17 ps/nm/km.
Dispersion chromatique $CD_{DCF}$	-85 ps/nm/km.
Dispersion de mode de polarisation PMD	0.5 ps/km <sup>1/2</sup>
Atténuation	0.2 dB/km.
Nombre d'utilisateurs	4.
Gain EDFA	20 dB.
$L_{Total\ Fibre}$	120 km, 180 km, 240 km, 300 km et 360 km.

### III.5.1.3 Etude de l'impact de la longueur de la liaison et le débit sur le système :



**Figure III- 29 : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur et du débit.**

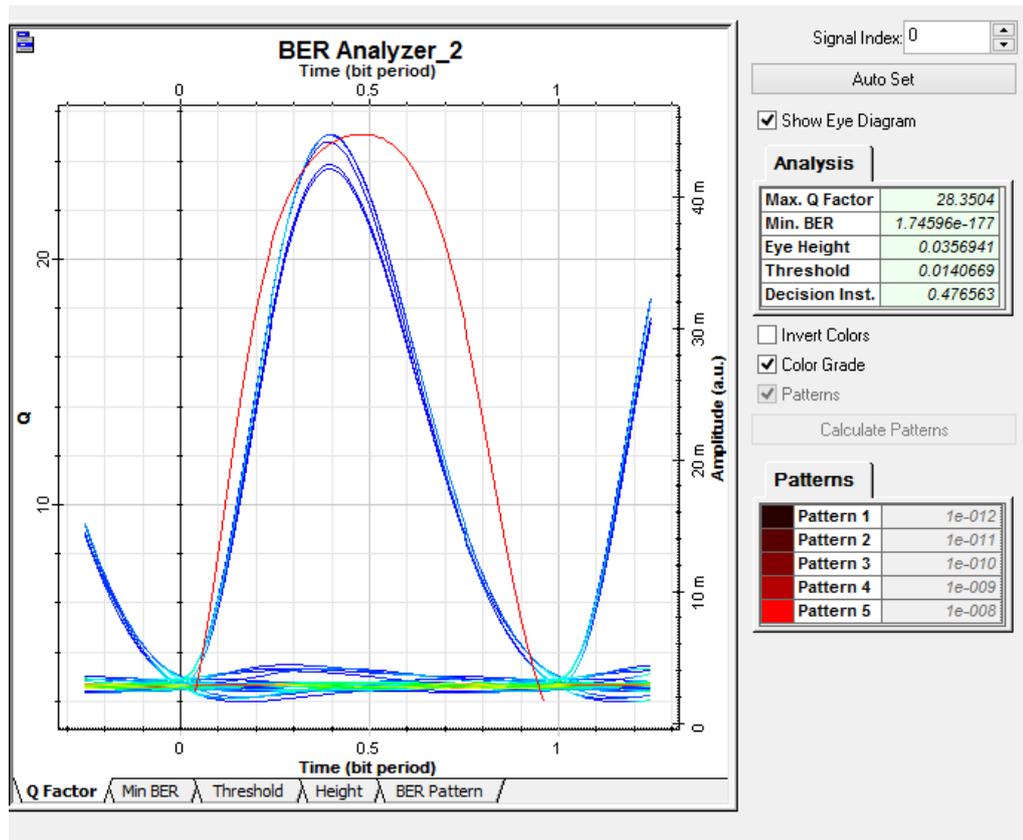


Figure III- 30 : Diagramme de l’œil pour L = 360 km et Débit = 20 Gbps.

Il est à noter que pour L = 120 km et un débit de 20 Gbps, le système présente un meilleur facteur de qualité Q, mais pour un débit de 160 Gbps les performances du système commencent à se dégrader (voir figure III-29). On conclut à la limitation pour un débit de 160 Gbps.

Maintenant, si on augmente la distance soit 360 km, avec un débit de 80 Gbps, on obtient un facteur de qualité  $Q = 7,12$  et un taux d’erreur binaire  $TEB = 2,40 \cdot 10^{-13}$  : donc la distance maximale pour ce système est de 360 km.

D’après nos simulations, on constate que lorsque le débit augmente avec la longueur de la fibre, le facteur de qualité Q diminue. Le système OTDM fonctionne bien à des débits de 20, 40, 80 Gbps, sur toutes les longueurs de la fibre proposées, ainsi que sur le débit 160 Gbps sur des longueurs de 120 km jusqu’à 180 km, au-delà de cette distance les performances du système OTDM seront dégradées.

#### III.5.1.4 Etude de l'impact du format de modulation sur le système OTDM :

D'après nos simulations, le système OTDM avec le format de modulation NRZ présente une dégradation totale du facteur de qualité. Cette dégradation due à la diaphonie est présentée entre les canaux multiplexés contrairement aux systèmes précédents (*WDM et CWDM*).

L'OTDM utilise le format de modulation RZ au lieu du NRZ, puisque l'énergie des impulsions RZ est concentrée dans une fenêtre temporelle plus courte qu'une période de bits. Chacune des impulsions est retardée d'une fraction de période d'horloge  $\Delta t$  et synchronisée. Donc la source laser doit pouvoir générer des impulsions optiques d'une durée  $< 1/4$  de la période d'horloge. Pour multiplexer un signal optique de période  $T$  ps sur le canal  $N$ , le délai requis  $\Delta t$  pour chaque trajet est de :

$$\Delta t_i = i \times \frac{T}{N} (ps), \quad i = 1, 2, \dots, N - 1. \quad \text{Où } \Delta t_i : \text{ est le délai pour son chemin.}$$

#### III.5.2 Le système hybride OTDM/WDM :

Le système hybride OTDM/WDM est évalué pour un débit binaire de 160 Gbps et pour différentes longueurs de fibre SMF 100 km, 150 km, 200 km, 250 km et 300 km avec un gain EDFA de 20. Pour le système WDM, le MUX à 4 canaux est utilisé pour prendre 16 canaux en entrée à un débit de 10 Gbps. Chaque entrée possède 4 canaux provenant de l'OTDM et tous les canaux WDM transmettent les données sur des longueurs d'onde de 1547.71, 1549.31, 1550.91 et 1552.51 nm.

On a choisi dans ce système hybride le débit 160 Gbps pour comparer les résultats avec ceux du système OTDM afin de montrer les bonnes performances pour des différentes longueurs de fibre.

##### III.5.2.1 Description du système simulé :

Le système OTDM/WDM est composé de trois étages à savoir l'étage de l'émetteur qui contient 16 canaux OTDM avec un débit de 10 Gbps (*voir figure III-31*), le support de transmission et l'étage de la réception (*voire figure III-32*).

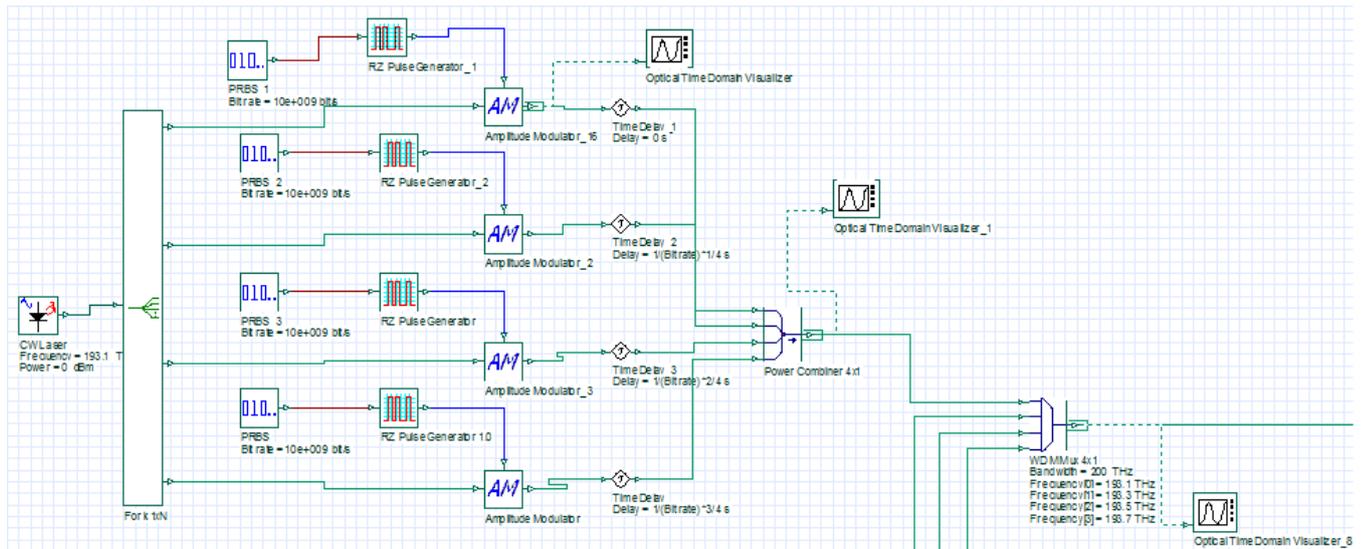


Figure III- 31 : Bloc d'émission du système hybride OTDM/WDM.

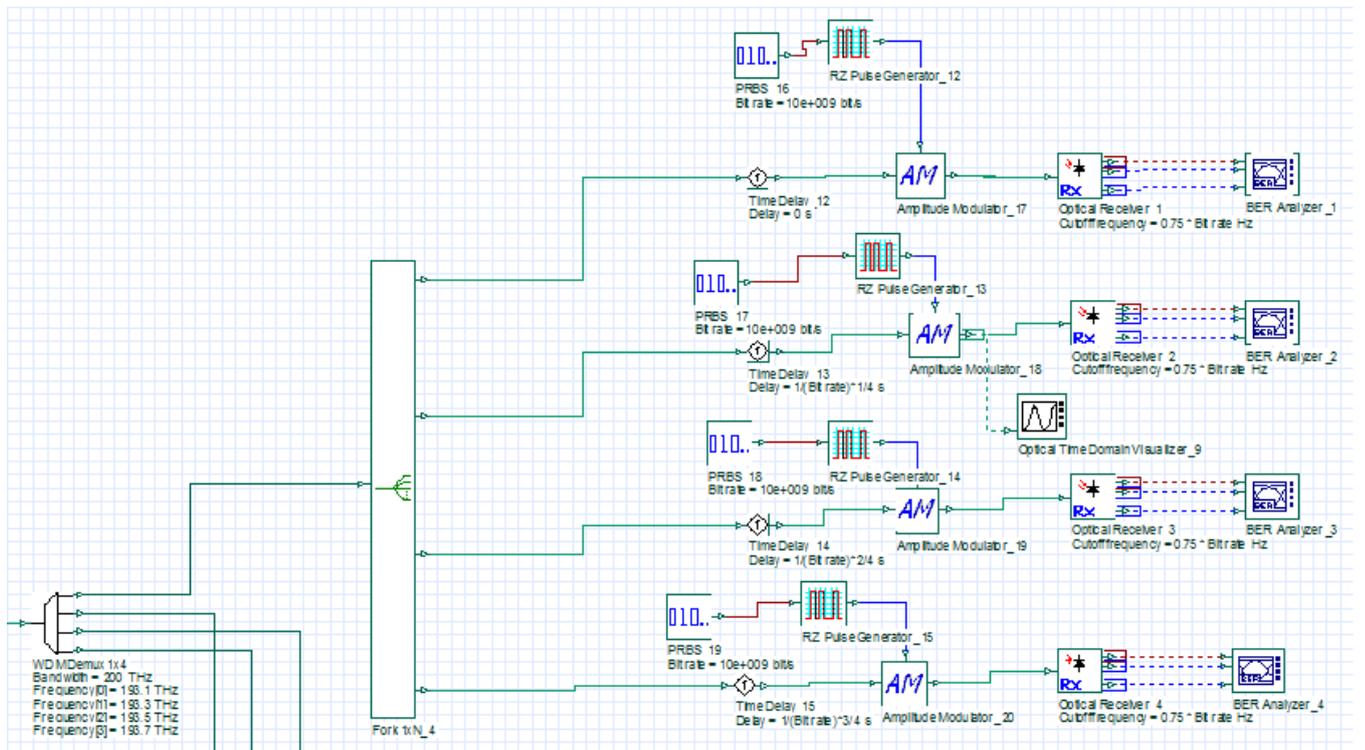


Figure III- 32 : Bloc de réception du système hybride OTDM/WDM.

### III.5.2.2 Paramètres de simulation :

Les paramètres de simulation pour le système hybride sont les mêmes que pour le système OTDM avec un système WDM (*espacement entre les canaux : 1,6 nm*) qui transmet les données sur des longueurs d'onde de : 1547.71, 1549.31, 1550.91 et 1552.51 nm.

### III.5.2.3 Etude de l'impact de la longueur de la liaison sur le système hybride :

D'après les figures III-33 et III-34, on constate ici que le système hybride OTDM/WDM donne des bons résultats pour le facteur de qualité Q et le taux d'erreur binaire (TEB) sur toutes les longueurs de la fibre proposées jusqu'à une limite de 360 km.

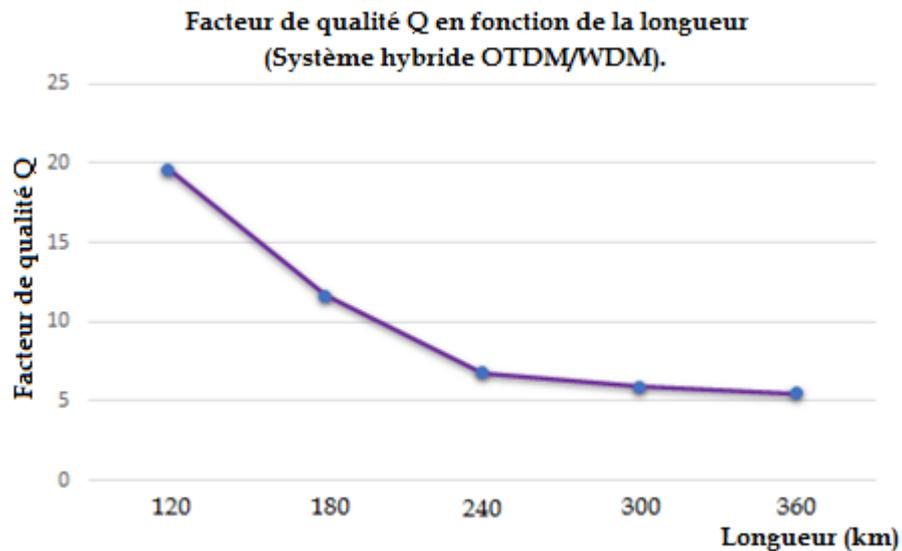


Figure III- 33 : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur (Système hybride OTDM/WDM).

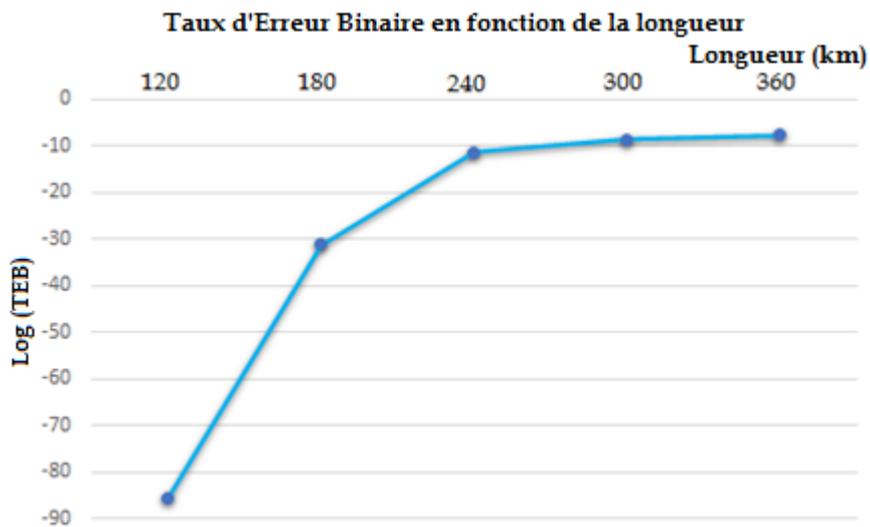


Figure III- 34 : Variation du taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur.

### III.5.3 Comparaison entre le système OTDM et le système OTDM/WDM :

Les figures III-35, III-36 ci-dessous, montrent que le système hybride proposé à 160 Gbps a été évalué avec succès par rapport au système OTDM. Le système OTDM/WDM fonctionnait sur une distance de 360 km avec un taux d'erreur binaire TEB de  $1,82 \cdot 10^{-8}$ , par contre dans

l'OTDM, les performances sont dégradées au-delà de la longueur de 180 km avec un TEB de  $7,98 \cdot 10^{-7}$ .

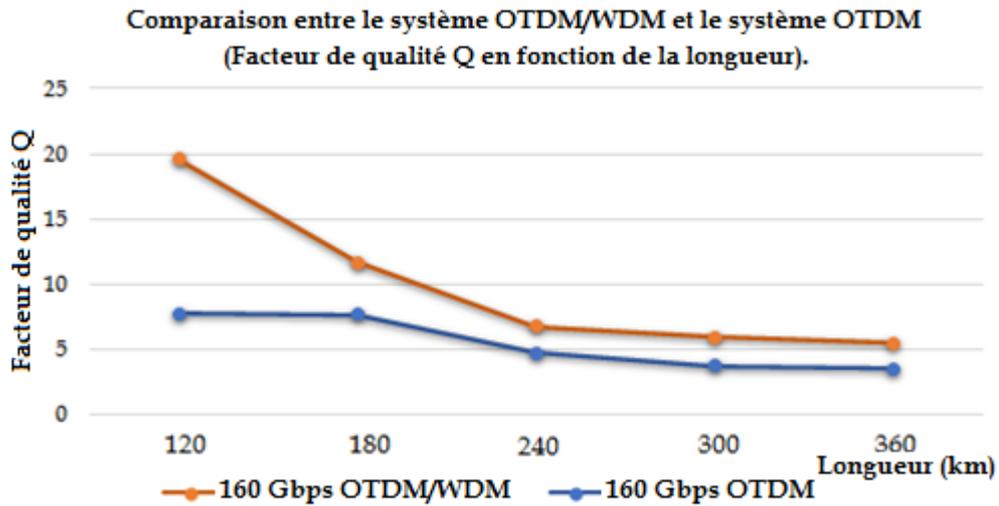


Figure III- 35 : Comparaison entre le système OTDM/WDM et le système OTDM  
(Facteur de qualité Q en fonction de la longueur).

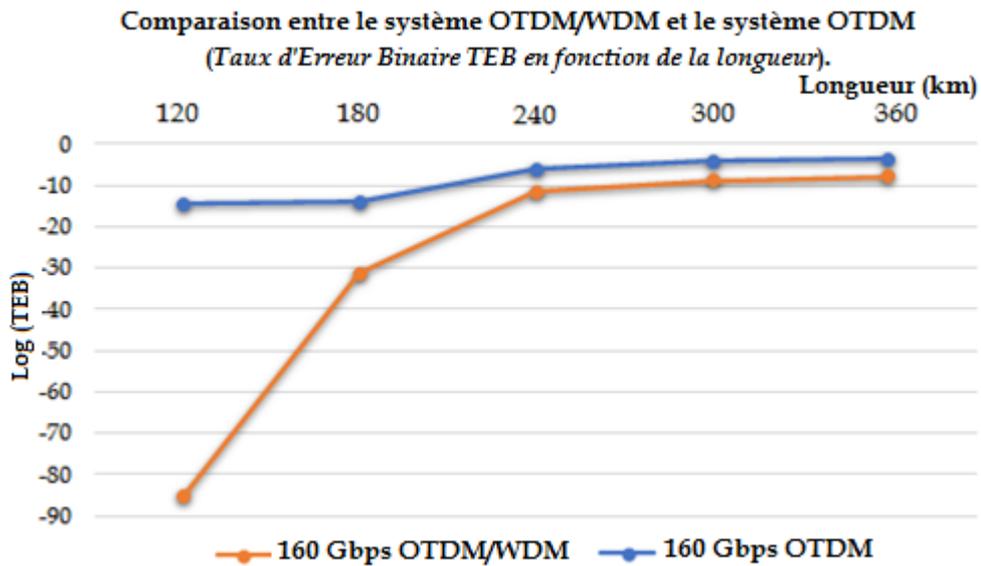


Figure III- 36 : Comparaison entre le système OTDM/WDM et le système OTDM  
(Taux d'Erreur Binaire TEB en fonction de la longueur).

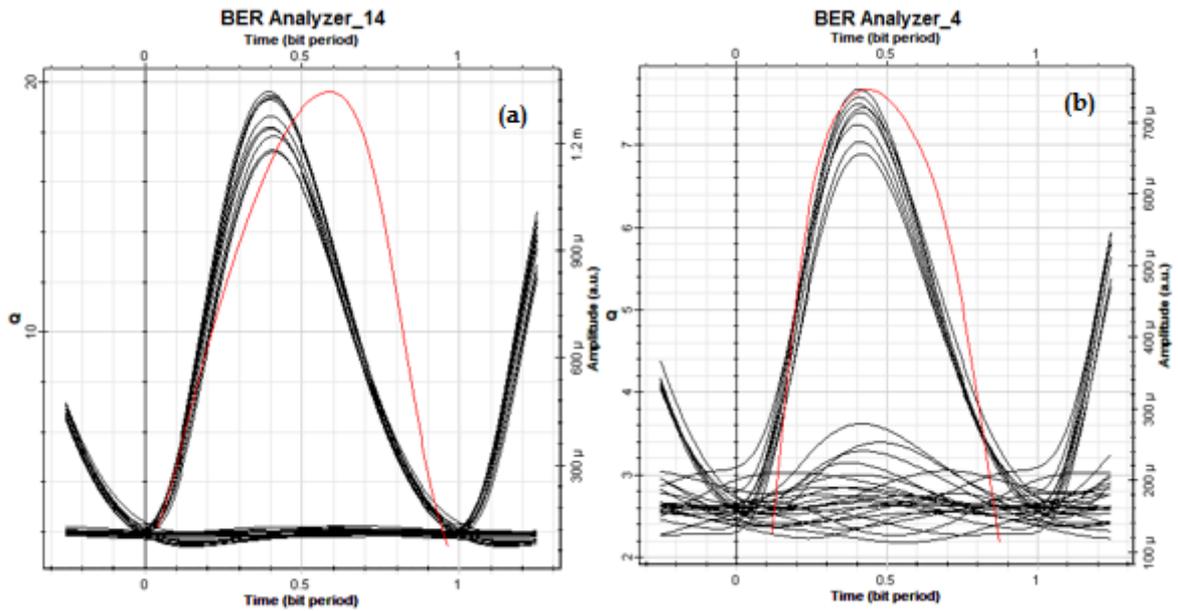


Figure III- 37 : Diagramme de l'œil pour l'OTDM/WDM sur 120 km et 160 Gbps (a), Diagramme de l'œil pour l'OTDM sur 120 km à 160 Gbps (b).

### III.6 Comparaison entre le WDM, le CWDM et l'OTDM :

La figure III-38, montre que le système OTDM est le plus performant par rapport aux WDM et CWDM. Il présente de meilleurs facteurs de qualité sur des longueurs allant de 20 km jusqu'à 60 km avec un débit fixe de 20 Gbps, une puissance de 0 dBm et un format de modulation RZ. L'OTDM donne aussi des résultats performants jusqu'à une longueur maximale de 360 km par contre le système WDM reste limité à 60 km et le CWDM à 100 km.

La figure III-39, illustre le système OTDM<sub>RZ</sub> avec de bons facteurs de qualité lorsque la puissance du laser varie au-delà de -30 dBm ( $Q_{-30dBm} = 6,62$ ), par contre le WDM est limité à une puissance de -10 dBm ( $Q_{NRZ} = 7,85$ ) et le CWDM à -12 dBm ( $Q_{NRZ} = 11,33$ ).

Mais ce système reste limité en canaux et en plus exige une synchronisation entre l'émetteur et le récepteur.

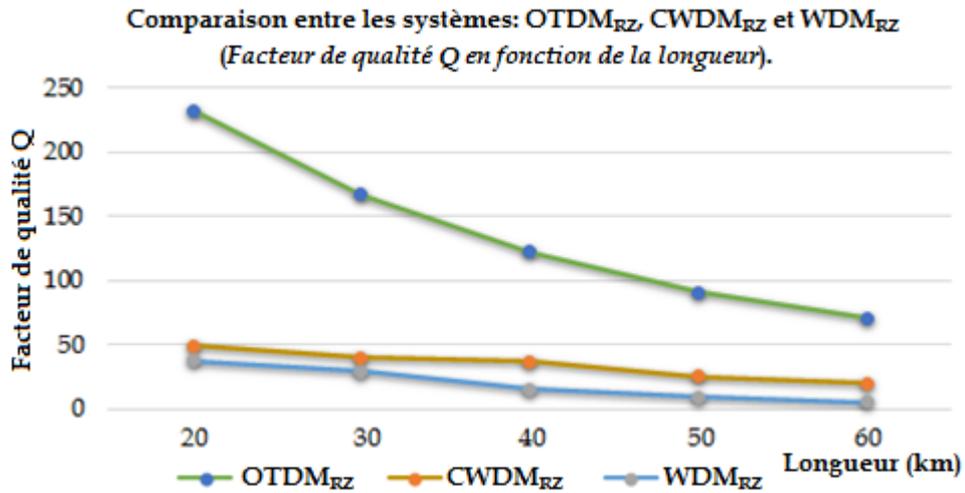


Figure III- 38 : Comparaison entre les systèmes : OTDM<sub>RZ</sub>, CWDM<sub>RZ</sub> et WDM<sub>RZ</sub>. (Facteur de qualité Q en fonction de la longueur).

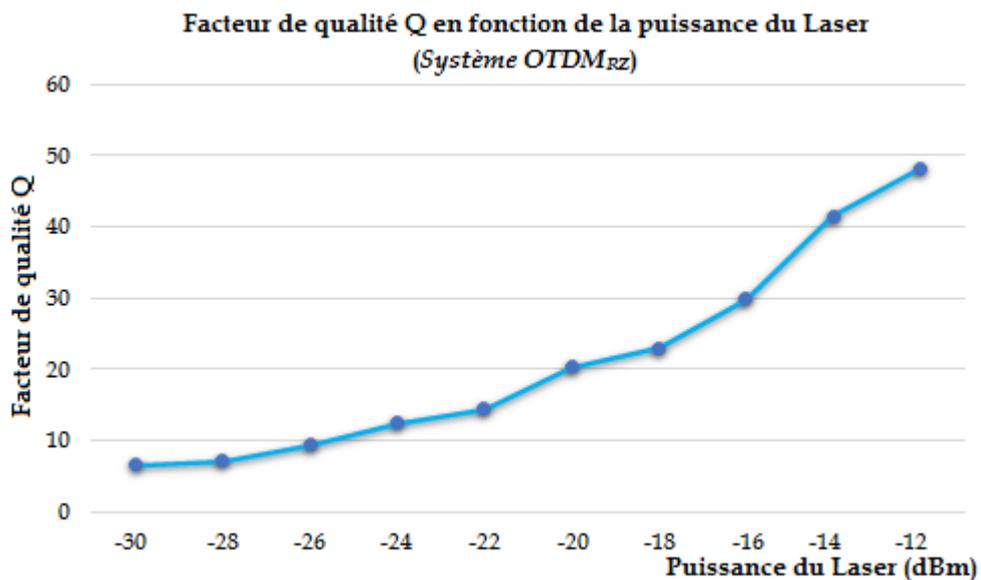


Figure III- 39 : Variation du facteur Q en fonction de la puissance du Laser (Système OTDM<sub>RZ</sub>)

### III.7 Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié deux techniques de multiplexages optiques à savoir le WDM et le CWDM dont les résultats obtenus par simulation concernant le comportement de chaque système révèlent que le CWDM présente de meilleures performances par rapport au système WDM. Les simulations effectuées dans cette partie tiennent compte de l'impact de plusieurs facteurs impliqués dans cette étude notamment la longueur de la liaison, la puissance d'émission du laser, le débit binaire et le type de format de modulation (RZ et NRZ), ainsi que les différentes limitations telles que : les effets non-linéaires (XPM et FWM), la dispersion chromatique CD et la PMD.

Dans la deuxième partie, nous avons évalué les performances de deux systèmes, il s'agit de l'OTDM et du système hybride OTDM/WDM. Les résultats de simulation obtenus démontrent l'intérêt du système hybride OTDM/WDM dans les réseaux PON par rapport aux systèmes précités.

# *Conclusion générale et perspectives*

## Conclusion générale et perspectives :

Cette thèse est une étude comparative entre les différentes techniques de multiplexage optique utilisées dans les télécommunications à savoir, le WDM, le DWDM, le CWDM, l'OTDM ainsi que les systèmes hybrides. Elle a pour but la contribution à l'amélioration des performances du système hybride OTDM/WDM, en termes de capacité de multiplexage et de flexibilité en tenant compte du coût (*le nombre de composants utilisés*), des avantages et des inconvénients ainsi que la possibilité de leur implémentation dans les réseaux PON.

Dans le premier chapitre, nous avons mis en évidence les différentes techniques de multiplexage optique notamment le multiplexage en longueurs d'ondes et ses dérivés, le multiplexage temporel ainsi que le multiplexage CDMA optique. Une comparaison détaillée a suivi, nous avons tenu compte des paramètres de chaque système à savoir le débit, le format de modulation, la distance, la puissance d'émission en mettant en évidence à chaque fois des avantages et des inconvénients.

Dans le second chapitre, nous nous sommes concentrés d'abord sur l'étude comparative des différents réseaux PON à savoir, le BPON, l'EPON, le GPON, le NGPON2, ...etc. et de leurs architectures, dans un premier temps. Dans une deuxième phase, nous avons présenté les architectures hybrides pour les réseaux PON afin de mettre en évidence la technique adéquate en augmentant la capacité de multiplexage et l'efficacité spectrale du système tout en évitant les interférences d'accès multiples (MAI).

Dans le dernier chapitre, et en premier lieu, nous nous sommes intéressés à introduire deux techniques de multiplexages utilisées dans les systèmes optiques notamment le WDM et le CWDM. La comparaison détaillée des caractéristiques entre ces deux systèmes, à savoir le WDM et CWDM, nous a amené à opter pour la technique CWDM par rapport à la technique WDM. Le concept de la technique, les raisons de son attribution ainsi que leur simplicité à intégrer dans le réseau PON ont été explicités.

L'évaluation des performances du système hybride OTDM/WDM a montré des résultats performants en termes de taux d'erreur binaire (TEB), de facteur de qualité Q, et de bonne ouverture du diagramme de l'œil par rapport aux systèmes précités, cela confirme le bien-fondé de l'approche proposée.

Les simulations effectuées tiennent compte de l'impact de plusieurs facteurs impliqués dans notre travail, notamment la longueur de la liaison, la puissance d'émission du laser, le débit binaire et les types de format de modulation RZ et NRZ, ainsi que les différentes limitations telles que les effets non-linéaires et la dispersion chromatique CD.

Pour comparer les deux systèmes CWDM-PON et WDM-PON, nous avons choisis un type de format de modulation NRZ parce qu'il donne des résultats bien meilleurs que le format RZ. Ensuite pour les systèmes OTDM et OTDM/WDM, nous avons choisis le format RZ au lieu du NRZ, puisque l'énergie des impulsions RZ est concentrée dans une fenêtre temporelle plus courte qu'une période de bits. Les résultats sont concluants pour le système hybride OTDM/WDM.

D'après nos simulations, nous avons constaté que le système hybride présente une puissance d'émission minimale du laser de -30 dBm équivalent à un facteur de qualité  $Q_{-30\text{dBm}} = 6,62$ . Cela implique que l'OTDM/WDM est plus rentable et avantageux par rapport aux systèmes OTDM, CWDM et WDM, parce que ce dernier reste dépendant du type de format de modulation RZ dont nous avons discuté.

Nous avons abouti à un facteur de qualité  $Q_{\text{OTDM/WDM}} = 5,47$  et un  $TEB_{\text{OTDM/WDM}} = 1,82 \cdot 10^{-8}$  pour une distance maximale relative au système hybride de 360 km et un débit maximal de 160 Gbps. Ces résultats sont meilleurs par rapport aux systèmes précités.

Dans le système OTDM/WDM, les effets non-linéaires tel que le mélange à quatre ondes (FWM) sont compensés par la fibre dispersive SMF (G-655) dont la dispersion chromatique (CD) provoque un élargissement temporel dans le bit qui permet d'empêcher le FWM, c.à.d. l'impulsion provoquée par la dispersion chromatique joue un rôle très important pour ne pas composer d'autres ondes grâce à sa largeur, ainsi que l'espacement de 1,6 nm entre les canaux pour le WDM permet de surmonter les effets non-linéaires par rapport au système DWDM qui présente un espacement plus serré. La dispersion chromatique est compensée par une fibre compensatrice DCF.

En ce qui concerne le nombre d'utilisateurs, le système OTDM/WDM peut atteindre jusqu'au 128 utilisateurs ( $4_{\text{OTDM}} \times 32_{\text{WDM}}$ ) par rapport aux systèmes : WDM (32 utilisateurs au max.), CWDM (18 utilisateurs au max.) et OTDM (4 utilisateurs au max.).

Les résultats obtenus dans cette thèse permettent de dire que le système hybride était la technique la plus appropriée à la transmission optique dans notre réseau d'accès.

Le travail accompli dans cette thèse constitue un point de départ à toute une série de travaux possibles. Plusieurs perspectives peuvent être envisagées, nous suggérons pour les futurs travaux :

- Etude comparative entre le système hybride élaboré dans notre thèse et les autres systèmes hybrides notamment l'OCDMA/WDM-PON, l'OTDM/OCDMA-PON afin de sécuriser le réseau PON, d'augmenter le nombre d'utilisateurs ainsi que l'efficacité spectrale en jouant sur différents paramètres à savoir, le débit, le format de modulation, les codes, ...etc.
- Etudier la possibilité d'adapter le système OFDMA avec l'OCDMA dans le réseau PON pour mieux répondre aux contraintes d'efficacité spectrale, de sécurité et du nombre d'utilisateurs.

Les travaux présentés dans cette thèse ont donné lieu aux résultats scientifiques suivants :

**Publications internationales :**

- **KHERICI, Cheikh** and KANDOUCI, Malika. “A Comparative Study of Performances Between the WDM PON System and the CWDM PON System in an Optical Access Network”. Journal of Optical Communications, 2020, vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.1515/joc-2019-0248>. eISSN: 2191-6322, ISSN: 0173-4911, Published online: 12 Feb. 2020.
- **KHERICI Cheikh** and KANDOUCI Malika, “Comparative Study Between the WDM System and the DWDM in an Optical Transmission Link at 40 Gb/s”, Journal of International Conference on Electrical Engineering and Control Applications. Springer, Cham, Vol. 522, p. 488-498, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97816-1\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97816-1_37). ISSN: 1876-1100, eISSN: 1876-1119.
- **KHERICI Cheikh** and KANDOUCI Malika, “Contribution to the performances study of Optical Time Division Multiplexing OTDM and OTDM/WDM hybrid multiplexing at 160 Gbps”, Journal of International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS). Added to IEEE Xplore® Digital Library in April 3-4, 2019., DOI: <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723826>. Electronic ISBN:978-1-5386-7850-3.
- **KHERICI Cheikh** and KANDOUCI Malika, “Contribution of CWDM multiplexing in bidirectional Passive Optical Network at 4\*2.5 Gbps”, the 7<sup>th</sup> International Conference on Control Engineering & Information Technology. Proceedings of Engineering & Technology-PET-Vol. 56, ISSN: 1737-9934. p. 96 - 9924-26, October 2019. [http://ipcco.com/PET\\_Journal/PET\\_Issues.html](http://ipcco.com/PET_Journal/PET_Issues.html)

**Expériences acquises :**

- **Certificat de Training ITEC**, intitulé : “Optical Fiber Cable, Systems & Modern Telecom Transport Technologies”, au Centre for Excellence in Telecom Technology & Management CETTM, ITEC Program, 2 mois du 01/10/2018 au 23/11/2018. **Mumbai, India.**

# *Bibliographie*

## Références :

- [1] NEBELING, Marcus. "CWDM: lower cost for more capacity in the short-haul". Fiber Network Engineering: Livermore, CA, USA, 2002.
- [2] IUT-T. "G.694.2 : Grilles spectrales pour les applications de multiplexage par répartition en longueur d'onde : grille espacée CWDM", sur [www.itu.int](http://www.itu.int). Consulté le 13 juin 2018.
- [3] IUT-T. "From O to L: The Evolution of Optical Wavelength Bands - Fiber Optic Cabling Solutions", Fiber Optic Cabling Solutions, 13 October 2015.
- [4] Thiele, Hans-Jorg. et Nebeling, Marcus. "Coarse wavelength division multiplexing: technologies and applications". CRC Press. ISBN 9781420018691 et 1420018698, OCLC 854787186. 2007.
- [5] GILLES, Marin. "Effets de modulation de phase croisée dans les fibres à dispersion normale et leurs applications". Thèse de doctorat. Bourgogne Franche-Comté. 2018.
- [6] KAMILA, Zerrar et FATMA, Ouzia. "Réseau de transport optique DWDM". Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri. 2017.
- [7] NOORUZZAMAN, Md et HALIMA, Elbiaze. "Low-cost hybrid ROADM architectures for scalable C/DWDM metro networks". IEEE Communications Magazine, vol. 54, no 8, p. 153-161. 2016.
- [8] DRISCOLL, Jeffrey B., DOUSSIÈRE, Pierre, ISLAM, Syed, et al. "First 400G 8-channel CWDM silicon photonic integrated transmitter". In: 2018 IEEE 15th International Conference on Group IV Photonics (GFP). IEEE, p. 1-2. 2018.
- [9] KUMARI, Annapurna et SRIVASTAVA, Pankaj. "Performance analysis of 16-channel CWDM system with EDFA and SOA amplifiers". In: 2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP). IEEE, p. 1-2. 2018.
- [10] Amitabha Banerjee, Youngil Park, Frederick Clarke and Huan Song, "Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access", Vol. 4, No. 11/JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING, USA, November 2005.
- [11] ZHAO, Chong, MA, Wei, et LIU, Quanchun. "Hybrid WDM-TDM PON enabled by TWC based switch". In: 2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI). IEEE, p. 203-206. 2016.
- [12] KUMAR, Anil et RANDHAWA, Rajneesh. "An Improved Hybrid WDM/TDM PON Model with Enhanced Performance Using Different Modulation Formats of WDM Transmitter". Journal of Optical Communications, vol. 1, no ahead-of-print. 2018.
- [13] MOHAMMED, Husam Abduldaem. "Optical time division multiplexing (OTDM) and hybrid WDM/OTDM PON performance investigation". Int J Electron Commun Comput Eng., vol. 4, p. 8. 2013.
- [14] Monirul Islam\*, N. Ahmed, Sharafat Ali, S. A. Aljunid, R. B. Ahmad, Md. Shawkat Ali, "Hybrid (OCDMA/WDM) System with DPSK Modulation Using Different Detection Technique at Bit Rate 2.5Gbps for Optical Access Network". Centre of Excellence, Advanced Communication Engineering Cluster, School of Computer and Communication Engineering, University Malaysia Perlis, International Journal of Microwave and Optical Technology, vol.11, no.4, July 2016.
- [15] A. O. ALDHAIBANI, S. A. ALJUNID, M. S. ANUAR, AR ARIEF, "Increasing performance of SAC-OCDMA by combine OFDM technique", Advance Communication Engineering Centre (ACE) School of Computer and Communication Engineering, Universiti Malaysia Perlis, Journal of Theoretical and Applied Information Technology. Vol. 66 No.2. 20th August 2014.
- [16] CHANG, Yung-Cheng, CHOU, Emin, et KUO, Ken. "WDM multiplexing/de-multiplexing system and the manufacturing method thereof". U.S. Patent Application No 15/698,580, 2 Juin 2020.
- [17] BUTT, Muhammad Ali, KOZLOVA, Elena Sergeevna, et KHONINA, Svetlana Nikolaevna. "Conditions of a single-mode rib channel waveguide based on dielectric TiO2/SiO2". Компьютерная оптика, vol. 41, no 4. 2017.

- [18] TIAN, Ke, FARRELL, Gerald, WANG, Xianfan, et al. "Strain sensor based on gourd-shaped single-mode-multimode-single-mode hybrid optical fibre structure". *Optics Express*, vol. 25, no 16, p. 18885-18896. 2017.
- [19] BORA, Mihail, VOSS, Lars F., GRIVICKAS, Paulius V., et al. "A total internal reflection photoconductive switch". *IEEE Electron Device Letters*, vol. 40, no 5, p. 734-737. 2019.
- [20] John M. Senior, M. Yousif Jamro, "Optical Fiber Communications Principles and Practice", 3rd Edition », ISBN: 978-0-13-032681-2, 2009.
- [21] AIYING, Y. A. N. G. et CHEN, Xiaoyu. "Method of measuring optical fiber link chromatic dispersion by fractional Fourier transformation (FRFT)". U.S. Patent No 9,602,199, 21 mars 2017.
- [22] Benoît Clouet, "Étude de la dispersion modale de polarisation dans les systèmes régénérés optiquement", thèse doctorat, L'UNIVERSITÉ DE RENNES I, 2007.
- [23] G. P. AGRAWAL. "Non-linear Fiber Optics". Academic Press, San Diego, 3 ed., 2001.
- [24] J. L. AUGUSTE, J. M. BLONDY, AND P. ROY, "La fibre optique micro-structurée air-silice, Techniques de l'Ingénieur", vol. 43 - 2005.
- [25] J. TOULOUSE, "Optical non linearities in fibers: Review, recent examples, and systems applications", *IEEE Journal of light wave technology*, vol. 23, pp. 3625-3641. 2005.
- [26] HU, Yinglu, WANG, Yong, et CHEE, Kuan WA. "Optical communications and modulation techniques in 5G". In: Smart grids and their communication systems. Springer, Singapore. p. 401-464. 2019.
- [27] ZHANG, Hongyuan, SUN, Yakun, XU, Mingguang, et al. "High efficiency orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) physical layer (PHY)". U.S. Patent No 9,832,059, 28 Nov. 2017.
- [28] Marwa Chafii, "Etude d'une nouvelle forme d'onde multi porteuses à PAPR réduit". Thèse Doctorat en Télécommunications. Université de Rennes 1, Novembre 2007.
- [29] John M. Senior, Assisted by M. Yousif Jamro. "Optical Fiber Communications, Principles and Practice" Third Edition. 2009.
- [30] ETSI TS 101475 V1.1.1, "Broadband Radio Access Networks (BRAN)"; HIPERLAN Type 2; Physical (PHY) layer, Online: <http://www.etsi.org>. April 2000.
- [31] Cheong Yui Wong, Roger S. Cheng, Member, IEEE, Khaled Ben Letaief, Senior Member, IEEE, and Ross D. Murch, Senior Member, IEEE. "Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation" 1999.
- [32] S. Liu, K. J. Lee, F. Parmigiani, M. Ibsen, P. Petropoulos, D. Richardson, and K. Gallo, "OTDM to WDM format conversion based on cascaded SHG/DFG in a single PPLN waveguide", presented at the Optical Fiber Communication, San Diego, CA, Paper OWF4. 2010.
- [33] H. A. Mohammed: "Optical Time Division Multiplexing (OTDM) and Hybrid WDM/OTDM PON Performance Investigation", ISSN, 4(3), pp. 2278-4209, 2013.
- [34] K. Uchiyama, H. Takara, K. Mori, and T. Morioka, "160 Gbit/s all optical time-division demultiplexing utilising modified multiple-output OTDM demultiplexer (MOXIC)", *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 20, pp. 1190-1191, Sep. 2002.
- [35] Arpana Mishra, Priyesh Mishra, "Optical Communication with Time Division Multiplexing (OTDM) and Hybrid WDM/OTDM PON", *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Volume 3 Issue 12, December 2014.
- [36] Hans-Georg Weber, Reinhold Ludwig, Sebastian Ferber, Carsten Schmidt-Langhorst, Marcel Kroh, Vincent Marembert, Christof Boerner, and Colja Schubert. "Ultra-high Speed OTDM-Transmission Technology" Invited paper *Journal of Lightwave Technology*, vol.24 No.12, page 4616-4627. December 2006.
- [37] VIORRETA GÓMEZ, Álex. "Toward to design of 5G Optical Communications". Thèse de baccalauréat. Universitat Politècnica de Catalunya. 2017.
- [38] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", Fourth Edition, the Institute of Optics, University of Rochester, New York, 2010.

- [39] PALANKI, Ravi, KHANDEKAR, Aamod Dinkar, et SUTIVONG, Arak. "Code division multiplexing in a single-carrier frequency division multiple access system". U.S. Patent No 9,693,339, 27 Juin 2017.
- [40] Hongxi Yin, David J. Richardson: "Optical Code Division Multiple Access Communication Networks Theory and Applications". Springer © 2007.
- [41] A. A. Garba et J. Bajcsy, "A new approach to achieve high spectral efficiency in wavelength-time OCDMA network transmission". IEEE Photonics Technology Letters, 19(3) : 131-133, Fev. 2007.
- [42] Sharma, A. and V.K. Kakar. "Security performance and enhancement of physical layer in optical-CDMA with multicode keying encryption". In Emerging Trends in Computing and Communication Technologies (ICETCCT), International Conference on IEEE. 2017.
- [43] Younes Zouine and Zhour Madini. "Direct Sequence-Optical Code-Division Multiple Access (DS-OCDMA): Receiver Structures for Performance Improvement". DOI: 10.5772/intechopen.85860. Paper Published: September 4th 2019.
- [44] L. Tancevski et I. Andonovic. "Hybrid wavelength hopping/time spreading schemes for use in massive optical networks with increased security". IEEE J. Lightwave Technol., 14(3): 2636-2647, June 1996.
- [45] P. Wang et T. Le-Ngoc. "2D Optical CDMA networks using multi-wavelength pulse modulation and modified carrier-hopping prime sequence". Proc. Of Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 4, Nov. 2005.
- [46] LOURDIANE, Mounia. "CDMA à séquence directe appliqué aux systèmes de communications optiques". Thèse de doctorat, Institut des Sciences et Technologies ParisTech. Oct. 2005.
- [47] S. Lee and S-W. Seo, "New construction of Multi-wavelength Optical Orthogonal Codes », IEEE Transaction on Communications, vol. 50, n°12, pp. 2003-2008, Dec. 2002.
- [48] R. Petrovic: "Orthogonal codes for CDMA optical fiber LAN's with variable bit interval". IEE Electronics Letters, Vol.26, N°10, pp 662-664. 1990.
- [49] L. Dafa Seynabou, "Transmissions radio haut débit multiservices sur fibres optiques-Application à l'optimisation de la capacité utilisateurs en emprises de transport". Doctorat, Université De valenciennes et du Hainaut-Cambresis 2012.
- [50] Hmud, I.S., F.N. Hasoon, and S. Shaari, "Optical CDMA system parameters limitations for AND subtraction detection scheme under enhanced double weight (EDW) code based on simulation experiment". Optica Applicata, 40(3): p. 669-676. 2010.
- [51] S. A. A. H.M.R. Al-Khafaji, A. Amphawan, H.A. Fadhil, A.M. Safar, "Reducing TEB of spectral-amplitude coding optical code-division multiple access systems by single photodiode detection technique" J. Europ. Opt. Soc. Rap.Public.8, 13022, 2013.
- [52] S. A. A. Sarah G. Abdulqader, Hamza M.R. Al-Khafaji, Hilal A. Fadhil "Investigation of transmission performance for SACOCDMA system under long haul transmission distance based on single photodiode detection technique". Presented at the IEEE 11th International Conference on Communications, Malaysia, 2013.
- [53] G.-C. Yang and Wing C. Kwong: "Performance Comparison of Multi-wavelength CDMA and WDMA+CDMA for Fiber-Optic Networks". IEEE Trans. On Communications, Vol.45, No.11, pp1426-1434. 1997.
- [54] L. Tancevski, I. Andonovic: "Wavelength hopping/time spreading code division multiple access systems". IEE Electronics Letters, Vol.30, No.17, pp1388-1390. 1994.
- [55] P. A. Perrier and P. R. Prucnal: "Wavelength-division integration of services in fiber-optic networks". Int. J. Digital Analog Cabled Syst., Vol. 1, pp149-157. 1988.
- [56] Binh, L. N., Optical Modulation: "Advanced Techniques and Applications in Transmission Systems and Networks": CRC Press. 2017.
- [57] C. Kherici, M. Kandouci, "Comparative Study Between the WDM System and the DWDM in an Optical Transmission Link at 40 Gb/s", Advanced Control Engineering Methods in Electrical Engineering Systems pp 488- 498 - Springer 2019.

- [58] F. RAHARIMANITRA, "Contribution à l'étude des architectures basses 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", Thèse de Doctorat de l'Université européenne de Bretagne, janvier 2012.
- [59] Ali Shahparia. Ricardo Ferreira. Vitor Ribeiro. Artur Sousa. Somayeh Ziaiea. Ana Tavares. Zoran Vujicica. Fernando P. Guiomara Jacklyn. D. Reisb Armando. N. Pinto. António Teixeira. "Coherent ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical networks", doi.org/10.1016/j.yofte.2015.07.001. Optical Fiber Technology. Vol. 26 pp 100-107, Part A, Dec. 2015.
- [60] Gorshe DS, Raghavan A, Starr T, Galli S. "Broadband access: Wire line and Wireless-alternatives for internet services", 1st ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [61] Nazir M, Arshad F, Asif R. "Design and evaluation of power budget for a bidirectional CWDM-Passive Optical Network". In: International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE), Islamabad, Pakistan, 04 May 2017.
- [62] Biswanath Mukherjee, "Optical WDM Networks", Series Editor University of California, Davis. Department of Computer Science, University of California, 2006.
- [63] CHEN, Xue, ZHANG, Zhiguo, et HU, Xintian. "The evolution trends of PON and key techniques for NG-PON". In: 2013 9<sup>th</sup> International Conference on Information, Communications & Signal Processing. IEEE, p. 1-6. 2013.
- [64] S. J. Park, C. H. Lee, K. T. Jeong, H. J. Park, J. G. Ahn, and K. H. Song, "Fiber-to-the-home services based on wavelength division multiplexing passive optical network". Journal of Light-wave Technology, vol. 22, no. 11, pp. 2582 \_ 2591, Nov. 2004.
- [65] WANG, Kun, GAVLER, Anders, MACHUCA, Carmen Mas, et al. "Migration strategies for FTTx solutions based on active optical networks". IEEE Communications Magazine, vol. 54, no 2, p. 78-85. 2016.
- [66] Fabia Raharimanitra, "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". Thèse de Doctorat. Université Européenne de Bretagne. 13 Janvier 2012.
- [67] ITU-T G.982, "Optical access networks to support services up to the ISDN primary rate or equivalent bit rates", 1996.
- [68] OBITE, Felix, JAJA, Edward Tamunoiyowuna, IJEOMAH, Geoffrey, et al. "The evolution of Ethernet Passive Optical Network (EPON) and future trends". Optik, vol. 167, p. 103-120. 2018.
- [69] Gaël SIMON, "Introduction des technologies de multiplexage en longueur d'onde dense dans les futures générations de réseaux d'accès optique", thèse Doctorat ParisTech. Décembre 2016.
- [70] D. Nessel. "NG-PON2 Technology and Standards". Journal of Lightwave Technology, 33(5) :1136\_1143, March 2015.
- [71] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng dan Y. Ma, "Time-and-Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2)" Journal of Lightwave Technology, vol. 31, 2013.
- [72] Batagelj B, Erzen V, Tratnik J, Naglic L. "Optical access network migration from GPON to XG-PON". In: The Third International Conference on Access Networks, Slovenia, 2012.
- [73] Oh JM, Koo SG, Lee D, Park S-J. "Enhancement of the performance of a reflective SOA-based hybrid WDM/TDM PON system with a remotely pumped erbium-doped fiber amplifier". J Lightw Technol.; 26:144-9. 2008.
- [74] Gorshe DS, Raghavan A, Starr T, Galli S. "Broadband Access: Wireline and Wireless-Alternatives for Internet Services", 1st ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [75] Poboril R, Latal J, Koudelka P, Vitasek J, Siska P, Skapa J, et al. "A concept of a hybrid WDM/TDM topology using the fabry-perot laser in the optiwave simulation environment". Adv Electr Electron Eng. 167-78, ISSN 1804-3119-2011.
- [76] Simon G. "Introduction of Dense Wavelength Division Multiplexing technologies in future generations of optical access networks". PhD Thesis, Telecom ParisTech ENST, 1st December 2016.

- [77] F. Effenberger et al., "An introduction to PON technologies [Topics in Optical Communications]". In IEEE Communications Magazine, vol. 45, no. 3, pp. S17-S25, doi : 10.1109/MCOM.2007.344582, March 2007.
- [78] ITU-T Recommendation G.992.x Series : "Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)". ITU-T Study Group 15, 1999.
- [79] D. Qian, N. Cvijetic, J. Hu, and T. Wang, "108 Gb/s OFDMA-PON With Polarization Multiplexing and Direct Detection", Journal of Lightwave Technology, vol. 28, no. 4, pp. 484 \_493, 2010.
- [80] D. Qian, T.-O. Kwok, N. Cvijetic, J. Hu, and T. Wang, "41.25 Gb/s real-time OFDM receiver for variable rate WDM-OFDMA-PON transmission", in Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC 2010, pp. 1 \_3. 2010.
- [81] S. Yoshima, N. Nakagawa, N. Kataoka, N. Suzuki, M. Noda, M. Nogami, J. Nakagawa, and K.-I. Kitayama, "10 Gb/s-Based PON Over OCDMA Uplink Burst Transmission Using SSFBG Encoder/Multi-Port Decoder and Burst-Mode Receiver". Journal of Lightwave Technology, vol. 28, no. 4, pp. 365 \_371, 2010.
- [82] Hans-Georg Weber, Reinhold Ludwig, Sebastian Ferber, Carsten Schmidt-Langhorst, Marcel Kroh, Vincent Marembert, Christof Boerner, and Colja Schubert. "Ultra-high Speed OTDM Transmission Technology". Invited paper Journal of Lightwave Technology, vol.24 No.12, page 4616-4627. December 2006.
- [83] S. Yoshima, N. Nakagawa, J. Nakagawa, and K. Kitayama, "10 G-TDM OCDMA-PON systems", in Proc. pp. 724-725. 15th OECC July 2010.
- [84] Hongxi Yin, David J. Richardson. "Optical Code Division Multiple Access Communication Networks Theory and Applications". Tsinghua University Press, Beijing and Springer, © 2007.
- [85] S. Tseng, J. Wu, and W. Yang, "Two-dimensional spectral/spatial fiber-optic CDMA PON with EMS/EPD codes", IEEE Trans. Commun., Vol. 60, No. 11, pp. 3451-3460, 2012.
- [86] G. Pandey and A. Goel, "Long reach colorless WDM OFDM-PON using direct detection OFDM transmission for downstream and OOK for upstream". Optical and Quantum Electronics, vol. 46, no. 12, pp. 1509-1518, Jan. 2014.
- [87] Cevik T. "A hybrid OFDM-TDM architecture with decentralized dynamic bandwidth allocation for PONs". Sci. World J. 2013.
- [88] Razaq A, Khan SA. "Optical power budgeting in colorless WDM PON". Int J Comput; 177:0975-8887. Appl. 2019.
- [89] El-Nahal FI, Alhalabi M, Husein AH. "Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network (WDM-PON) technologies for future access networks". J Eng Res Technol; 2:34-40. 2015.
- [90] Basnotra A. "Coarse wavelength division multiplexing technology - a review". Int J Adv Res Comput Eng Technol (IJARCET); 4:1815-7. 2015.

كل يوم تزداد الحاجة إلى نقل موثوق للبيانات بسرعة عالية جدًا. تتم حاليًا دراسة هذا التحدي على نطاق واسع لتلبية الطلب المرتفع على النطاق الترددي. تعمل الشبكة الضوئية PON على حل مشكلة سعة الإرسال باستخدام تقنيات تعدد إرسال بصرية مختلفة حيث نضاعف العديد من المستخدمين في قناة واحدة عبر الألياف البصرية. تمثل مساهمتنا الأولى في تحسين نظام تعدد الإرسال الذي تم تكيفه مع شبكات PON من خلال محاكاة النظامين WDM-PON و CWDM-PON باستخدام بنيتين مختلفتين بتدفق 10 جيجابت في الثانية على أطوال مختلفة تتراوح من 20 كم إلى 60 كم مع استطاعات إرسال مختلفة لليزر التي تتراوح بين -10 ديسيبل ميلي و +10 ديسيبل ميلي. تحسين شبكة PON هو زيادة مؤشر الجودة Q، وكذلك نسبة الإشارة على الضجيج OSNR والتقليل من معدل الخط في البت  $TEB \sim 10^{-9}$ . نوضح من خلال عمليات المحاكاة أن معيار التحسين لدينا أسفر إلى أداء أفضل من حيث المسافات، القوى، الضياع والتوهين لنظام CWDM-PON. المساهمة الثانية هي استخدام نظام هجين قادر على مواجهة صمود قدرة الإرسال والسعة. لقد تمت دراسة مقارنة تفصيلية بين نظام الهجين OTDM/WDM والأنظمة الأخرى المذكورة أعلاه ولقد أظهرت أن نظامنا الهجين كان النمط الأنسب لشبكات الاتصال البصرية من حيث السعة، المرونة والفعالية. الكلمات المفتاحية: تعدد الإرسال البصري، إزالة تعدد الإرسال، WDM، CWDM، PON، OTDM، EDFA، مخطط العين، معدل الخط في البت TEB، مؤشر الجودة Q، مقارنة، OSNR.

### Abstract:

Every day the need for reliable data transmission at very high-speed increases more and more. This challenge is currently being studied extensively to meet the high demand for bandwidth. Passive optical network PON solves the problem of transmission capacity by using different optical multiplexing techniques whereby we multiply multiple users in a single channel through optical fiber.

Our first contribution consists in optimizing a multiplexing system adapted to PON networks by simulating the two systems WDM-PON and CWDM-PON by using two different architectures at a rate of 10 Gbps, over different link lengths ranging from 20 km up to at 60 km, with different laser emission powers varying between -10 dBm and 10 dBm. The optimization is to improve the quality factor Q as well as the Signal to Noise ratio OSNR in order to minimize the bit error rate  $BER \sim <10^{-9}$ . We show by simulations that our optimization criterion led to better performances in terms of distances, powers, losses and attenuations for the CWDM-PON system.

The second contribution consists in using a hybrid system capable of meeting the challenges of transmission capacity and throughput. A detailed comparison was studied between the hybrid OTDM/WDM system and the above systems which showed that our hybrid system was the most suitable technique for optical access networks in terms of capacity, flexibility and cost effectiveness.

**Keywords:** Multiplexing, demultiplexing, WDM, CWDM, PON, OTDM, EDFA, eye diagram, Bit error rate BER, Q factor, comparison, OSNR.

## Résumé :

Chaque jour, le besoin de la transmission des données fiables à très haut débit augmente de plus en plus. Actuellement ce défi fait l'objet d'études approfondies pour répondre à la demande importante de la bande passante. Le réseau optique passif PON résout le problème de la capacité de transmission en utilisant différentes techniques de multiplexage optique par lesquelles nous multiplions plusieurs utilisateurs dans un seul canal à travers la fibre optique.

Notre première contribution consiste à optimiser un système de multiplexage adapté au réseaux PON en simulant les deux systèmes WDM-PON et CWDM-PON, en utilisant deux architectures différentes à un débit de 10 Gbps, sur différentes longueurs de liaison allant de 20 km jusqu'à 60 km, avec différentes puissances d'émission du laser variant entre -10 dBm et 10 dBm. L'optimisation consiste à améliorer le facteur de qualité Q ainsi que le rapport Signal/Bruit OSNR afin de minimiser le taux d'erreur binaire TEB  $\sim <10^{-9}$ . Nous montrons par simulations que notre critère d'optimisation a conduit à meilleures performances en termes de distances, de puissances, de pertes et d'atténuations pour le système CWDM-PON.

La deuxième contribution consiste à utiliser un système hybride capable de répondre aux défis de capacité de transmission et du débit. Une comparaison détaillée a été étudiée entre le système hybride OTDM/WDM et les systèmes précités qui a montré que notre système hybride était la technique la plus appropriée pour les réseaux d'accès optique en termes de capacité, de flexibilité et de rentabilité.

**Mots clés :** Multiplexage, démultiplexage, WDM, CWDM, PON, OTDM, EDFA, diagramme de l'œil, Taux d'erreur binaire TEB, facteur de qualité Q, comparaison, OSNR.