

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



997

**Mémoire de fin d'étude  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

**Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Télécommunications  
Spécialité : Systèmes de Télécommunications**

---

**INTEGRATION DE SYSTEME RADIO SUR FIBRE DANS  
LES RESEAUX OPTIQUES PASSIFS**

---

Présenté par :

**CHENICHENE YEHYA**

Sous la direction de :  
**Mme : L. GRAINI**

**Juin 2018**

## REMERCIEMENT

18/3816

Avant tout, je remercie « ALLAH » de nous avoir aidées à réaliser ce présent travail,

J'ai l'honneur et le plaisir de présenter ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon encadreur **Mme L. GRIANI** pour sa précieuse aide, ces orientations et le temps qu'elle m'a accordé pour mon encadrement.

Je vous adresse mes plus vifs remerciements vaut également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Je remercie profondément **Mr D. ABED** les plus grandes leçons ne sont pas tirées d'un livre mais d'un enseignant tel que vous. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi ! tous les enseignants qui m'ont encouragé et soutenu pendant mon cursus.

Je voudrais remercier **Mr A. Bouchemel** par leur compréhension, leur aide et leur compétence, Vous avez toujours su rester à mon écoute et votre soutien permanent m'a été réellement précieux.

Mes remerciements **Mr. Nabil LOUNIS** de l'entreprise **algerie-telecom** de m'avoir ouvert les portes de l'entreprise et d'avoir mis à ma disposition moyens nécessaires pour mon étude.

A nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Finalement je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

## *DEDICACE*

Je dédie ce mémoire à:

*Mes parents :*

*Ma mère*, qui à œuvrer pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

*Mon père*, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

*Mes sœurs*, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

*Mes amis*, qui n'ont cessé de m'encourager surtout Khaled, Abdennour, Bilel 'raul', Ali, Madjed, Bilel 'bechbech', Ayyoub Et Bilel 'pinz'.

*Mes cousins*, Raouf, Kheiredidine Et Nedjmeddine pour pour ses collaborations pour réaliser ce travail

*Mes collègues*, Alla Eddine, Zakaria, Abderrahmen, Said, Youcef, Amir, Rachid, Toutou Et Sihem, Selma. A tous mes collègues de zeme licence, merci pour tous les moments inoubliables que nous avons passé Merci et bonne chance pour vos nouvelles aventures

*A Toute ma famille*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ربي لقد آتيتني من الملك وعلمتني ما تأويل الأحاديث

فاطر السماوات والأرض أنت وليّ في الدنيا والآخرة

توفني مسلماً وألحقني بالصالحين﴾

سورة يوسف الآية (101)



## **Résumé :**

En raison des besoins croissants en mobilité, connectivité, et bande passante, l'utilisation des technologies radio-sur-fibre (RoF) présente un intérêt grandissant au niveau de réseaux d'accès, et sont actuellement envisagées dans le cadre de déploiements pour les réseaux d'accès optique de type FTTx (Fiber to the home /building /curb).

Les futurs réseaux seront convergents, c'est-à-dire qu'ils desserviront les utilisateurs fixes et mobiles avec une infrastructure commune. Cette approche implique de nouveaux défis pour l'accès optique. Par conséquent, nous adoptons l'intégration de RoF au réseau optique passif (PON) en tant que réseau d'accès à large bande pour transmettre des données avec le trafic FTTH à travers la fibre partagée, exploitant la technique de multiplexage en longueur d'onde (WDM). Le but est de faire progresser la technologie d'accès optique pour les télécommunications de futures générations.

Les technologies RoF reposent sur des technologies de transmission par fibre optique pour la distribution de signaux RF entre une station centrale et des modules d'antennes distribuées ou des stations de base. L'objectif principal de ce travail est l'amélioration de l'infrastructure de réseau d'accès optique PON basée sur le modèle d'intégration amélioré ROF, et d'étudier l'infrastructure RoF-WDM-PON et ses fonctionnalités correspondantes. Ensuite, nous fournissons un modèle de simulation complet d'une liaison de transmission radio sur fibre en utilisant des outils de simulation existants pour modéliser respectivement des liaisons radiofréquences et des liaisons optiques respectivement, ainsi ses caractéristiques correspondantes.

**Mots clés :** radio sur fibre (RoF), réseau optique passif (PON), multiplexage en longueur d'onde (WDM), antennes distribuées, station centrale, stations de base.

## **Abstract:**

Due to the growing needs in mobility, connectivity, and bandwidth, the use of radio-over-fiber (RoF) technologies is of growing interest at the level of access networks, and are currently being considered for optical access networks FTTx (Fiber to the Home / Building / Curb) deployments.

Future access networks will be convergent, i.e. serve both, fixed and mobile users with a common infrastructure. This approach implies new challenges for the optical access. Therefore, we adopt the integration of RoF's to Passive Optical Network (PON) as a broadband access network to transmit data with FTTH traffic across the shared fiber, using wavelength division multiplexing (WDM) technique. The mission is to advance optical access technology for future telecommunications.

RoF technologies rely on optical fiber transmission technologies for distributing RF signals between a central station and distributed antenna modules or base stations. The main goal of this work is the improvement of the optical access network infrastructure based on the enhanced ROF integration model, and to investigate RoF-WDM-PON infrastructure and its corresponding features. Then, we provide a complete simulation model of a radio-over-fiber transmission link using existing simulation tools to modeling radio-frequency links and optical links respectively, and therefore its corresponding characteristics.

**Keywords:** Radio-over-Fibre (RoF), Passive Optical Network (PON), wavelength division multiplexing (WDM), distributed antennas, central station, base stations.

**SOMMAIRE**

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
 <b>Chapitre I : le réseau optique passif et son évolution</b>  	
I.1 Introduction .....	03
I.2 Les réseaux de télécommunications optiques.....	03
I.2.1 Le réseau de transport.....	03
I.2.2 Le réseau d'accès.....	04
I.2.2.1 FTTH dédié : L'architecture Point à Point .....	06
I.2.2.2 FTTH partagé : L'architecture point multipoint passif.....	07
I.2.2.3 Comparaison entre les deux architectures P2P et P2MP.....	08
I.3 Les réseaux optiques passifs (PON : Passive Optical Network).....	09
I.3.1 Eléments d'un PON.....	09
I.3.2 Principe de fonctionnement d'un PON.....	10
I.3.3 Les différents standards d'un PON.....	12
I.3.3.1 La norme APON .....	12
I.3.3.2 La norme BPON .....	13
I.3.3.3 La norme EPON.....	13
I.3.3.4 La norme GPON.....	13
I.3.4 Les futures générations du réseau d'accès optique.....	15
I.3.4.1 10 GPON à Multiplexage temporel optique (TDM-PON).....	15
I.3.4.2 PON avec multiplexage en longueur d'onde (WDM-PON).....	16
a. Architecture PON WDM broadcast and select.....	17
b. Architecture PON WDM avec aiguillage des longueurs d'onde .....	18
I.3.5 Contraintes lié à l'évolution du PON .....	19
I.4 Conclusion.....	20

**Chapitre II: la radio sur fibre RoF**



## SOMMAIRE

---

II.1	Introduction.....	21
II.2	La technologie Radio sur Fibre RoF.....	21
II.2.1	Définition de RoF .....	21
II.2.2	Avantages de la technique radio sur fibre.....	22
II.3	Systèmes de transport des signaux RF, IF, bande de base.....	24
II.3.1	Transport de fréquence RF sur fibre.....	24
II.3.2	Transport de fréquence IF-sur-fibre.....	25
II.3.3	Transport du signal en bande de base .....	26
II.4	Les techniques de modulation pour générer des signaux RF sur la fibre.....	27
II.5	Les composants optoélectronique d'une liaison RoF .....	28
II.5.1	Les diodes laser DL.....	29
II.5.2	Les Modulateurs optiques : Les Modulateurs Mach-Zehnder (MZM) .....	30
II.5.3	L'élément de connexion : la fibre optique.....	32
II.5.4	Le récepteur : Photodiode.....	32
II.6	Limitations du système RoF.....	33
II.6.1	Limitations du système RoF liées à l'optique.....	33
II.6.1.1	L'atténuation.....	33
II.6.1.2	La dispersion chromatique.....	34
II.6.1.3	La dispersion intermodale .....	35
II.6.2	Limitations du système RoF liées à la radio .....	35
II.6.2.1	Pertes liées à la propagation dans l'air.....	35
a.	Propagation sans multi-trajet .....	35
b.	Propagation multi-trajet.....	36
II.6.2.2	Non linéarité.....	36
II.6.3	Les sources de bruits dans une transmission radio sur fibre.....	36
II.6.3.1	Le bruit du laser.....	37
II.6.3.2	Le bruit de la photodiode.....	38
II.6.3.3	Les sources de bruit radio.....	38
II.7	Applications et perspectives de la technologie Radio sur Fibre .....	39
II.8	Conclusion.....	40

### Chapitre III: Intégration du système RoF dans les PONs



## *SOMMAIRE*

---

III.1	Introduction.....	41
III.2	Les futurs réseaux d'accès large bande Fi-Wi.....	41
III.3	Architecture hybride ROF-WDM-PON.....	42
III.4	Les Différentes architectures d'intégration ROF au réseau de distribution optique (ODN) pour les systèmes PON.....	44
III.5	Applications et architectures d'intégration au réseau PON.....	46
III.5.1	Le WiMAX .....	46
III.5.2	Contraintes liées au déploiement d'un système WiMAX.....	47
III.5.3	Choix de la technique ROF pour le réseau WiMAX.....	48
III.5.4	Les techniques de génération du signal RF.....	49
III.5.4.1	La détection directe.....	49
III.5.4.2	La détection hétérodyne.....	50
III.5.4.3	La génération du signal radio par la détection auto-hétérodyne optique.....	52
III.5.6	Architecture du réseau RoF-WDM-PON proposée.....	53
III.6	Conclusion.....	57

### **Chapitre IV : Résultat de la simulation**

IV.1.	Introduction .....	58
IV.2.	Présentation de logiciel.....	58
IV.2.1.	description .....	58
IV.2.2.	Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem.....	59
IV.2.3.	Applications du logiciel OptiSystem.....	60
IV.2.4.	Avantages du logiciel.....	60
IV.3.	Critères d'évaluation d'une transmission.....	60
IV.3.1.	Diagramme de l'œil.....	60
IV.3.2.	Le facteur de qualité.....	61
IV.3.3.	Taux d'erreurs binaires.....	62
IV.4	Présentation de l'architecture à simuler de RoF-WDM-PON.....	62
IV.4.1	Partie d'émission et de réception dans l'OLT.....	63

## *SOMMAIRE*

---

IV.4.1.1	Partie d'émission RF et optique dans l'OLT.....	63
IV.4.1.2	Partie de réception RF et optique dans l'OLT.....	64
IV.4.2	Partie d'émission et de réception dans les ONU <sub>s</sub> .....	65
IV.4.2.1	Partie d'émission de l'ONU ROF.....	65
IV.4.2.2	Partie de réception de l'ONU RoF.....	65
IV.4.3	Partie de transmission.....	66
IV.5	Résultats de la simulation.....	67
IV.6	Conclusion.....	65
	CONCLUSION GENERALE.....	76

**LLISTE DES FIGURES**

**CHAPITRE I**

<b>Figure I.1 :</b> <i>Architecture d'un réseau de télécommunication</i> .....	<b>04</b>
<b>Figure I.2 :</b> <i>Réseau d'accès optique</i> .....	<b>05</b>
<b>Figure I.3 :</b> <i>L'architecture FTTH point à point (p2p)</i> .....	<b>06</b>
<b>Figure I.4 :</b> <i>L'Architecture FTTH Point Multipoint passif(P2MP)</i> .....	<b>07</b>
<b>Figure I.5 :</b> <i>Les éléments constitutifs du PON</i> .....	<b>09</b>
<b>Figure I.6 :</b> <i>Architecture du sens montant</i> .....	<b>11</b>
<b>Figure I.7 :</b> <i>Architecture du sens descendant</i> .....	<b>11</b>
<b>Figure I.8 :</b> <i>Les différents standards d'un réseau PON</i> .....	<b>12</b>
<b>Figure I.9 :</b> <i>PON basé sur le multiplexage temporel (TDM-PON)</i> .....	<b>15</b>
<b>Figure I.10 :</b> <i>PON basé sur le multiplexage en longueur d'onde (WDMPON)</i> .....	<b>16</b>
<b>Figure I.11 :</b> <i>Architecture de base du WDM-PON</i> .....	<b>17</b>
<b>Figure I.12:</b> <i>Architecture PON-WDM "broadcast and select</i> .....	<b>18</b>
<b>Figure I.13:</b> <i>Architecture PON WDM avec aiguillage en longueur d'ond</i> .....	<b>19</b>

**CHAPITRE II**

<b>Figure II.1 :</b> <i>Synoptique d'un système radio sur fibre classique</i> .....	<b>22</b>
<b>Figure II.2 :</b> <i>Architecture RoF avec transport radio sur fibre optique</i> .....	<b>25</b>
<b>Figure II.3 :</b> <i>Architecture RoF avec transport IF sur fibre optique</i> .....	<b>26</b>
<b>Figure II.4 :</b> <i>Architecture RoF avec transport en bande de base sur fibre optique</i>	<b>27</b>
<b>Figure II.5:</b> <i>Les techniques de modulations directe(a) et externe(b) du signal optique</i> .....	<b>28</b>
<b>Figure II.6 :</b> <i>Structure d'une diode laser à une cavité de Fabry-Pérot</i> .....	<b>29</b>
<b>Figure II.7:</b> <i>Caractéristique statique P-I d'une diode laser</i> .....	<b>30</b>
<b>Figure II.8 :</b> <i>Principe du modulateur optique Mach Zehnder (MZM)</i> .....	<b>30</b>
<b>Figure II.9:</b> <i>Caractéristique DC du modulateur MZM</i> .....	<b>31</b>
<b>Figure II.10 :</b> <i>Structure d'un photodétecteur PIN</i> .....	<b>32</b>
<b>Figure II.11 :</b> <i>L'effet de l'Atténuation</i> .....	<b>34</b>
<b>Figure II.12 :</b> <i>Principales caractéristiques d'une chaîne radio.</i> .....	<b>35</b>
<b>Figure II.13 :</b> <i>Chaîne radio sur fibre typique.</i> .....	<b>36</b>
<b>Figure II.14 :</b> <i>Trois types de bruits du photodétecteur</i> .....	<b>37</b>

## Liste des figures

### CHAPITRE III

<b>Figure III.1 :</b> Architecture du réseau d'accès Wi-Fi RoF: PON et son extension sans fil RAU. ....	41
<b>Figure III.2:</b> l'architecture hybride RoF-WDM PON.....	43
<b>Figure III.3 :</b> Exemple d'architecture radio sur fibre (RoF)) couplée avec un réseau d'accès optique (PON).....	44
<b>Figure III.4 :</b> Un réseau de distribution optique conventionnel (ODN).....	44
<b>Figure III.5:</b> Les Différentes architectures d'intégration ROF au réseau de distribution optique (ODN).....	45
<b>Figure III.6 :</b> Architecture du réseau d'accès WiMAX.....	47
<b>Figure III.8 :</b> Schéma de principe d'un déport Radio sur Fibre avec conversion Analogique numérique.....	50
<b>Figure III.9 :</b> Schéma de principe d'un déport radio sur fibre avec une détection hétérodyne.....	51
<b>Figure III.10 :</b> Schéma d'une antenne déportée dans le cas d'une transmission d'une onde radio avec déport de l'oscillateur local.....	51
<b>Figure III.11 :</b> Schéma de principe d'un déport radio sur fibre avec la détection auto-hétérodyne.....	52
<b>Figure III.12 :</b> Trace temporelle et spectre du format NRZ.....	54
<b>Figure III.13 :</b> Module d'Emission NRZ.....	55
<b>Figure III.14:</b> Implémentation de l'architecture RoF-WDM-PON (a)- Architecture de liaison descendante, (b) Architecture de liaison montante.....	57
<b>CHAPITRE IV</b>	
<b>Figure IV.1 :</b> Description de logiciel OptiSystem.....	59
<b>Figure IV.2 :</b> diagramme de l'œil.....	61
<b>Figure IV.3 :</b> Schéma simplifié du RoF-WDM-PON simulé.....	62
<b>Figure IV.4 :</b> bloc globale d'émission au sein de l'OLT.....	63
<b>Figure IV.5 :</b> bloc d'émission pour chaque utilisateur.....	64
<b>Figure IV.6:</b> bloc de réception.....	64
<b>Figure IV.7 :</b> Schéma de bloc d'un émetteur ONU RoF.....	65
<b>Figure IV.8 :</b> Schéma de bloc du récepteur ONU RoF.....	66



## *Liste des figures*

---

<b>Figure IV.9 :</b> <i>spectres des utilisateurs au niveau de l'OLT</i> .....	<b>69</b>
<b>Figure IV.10:</b> <i>spectre du huit canaux après le passage de MUX</i> .....	<b>70</b>
<b>Figure IV.11:</b> <i>Spectre du multiplex a la sortie de l'amplificateur</i> .....	<b>70</b>
<b>Figure IV.12 :</b> <i>les spectres de chaque détection par le récepteur</i> .....	<b>71</b>
<b>Figure IV.13 :</b> <i>Diagramme de l'œil au niveau de l'ONU</i> .....	<b>73</b>
<b>Figure IV.14:</b> <i>Diagramme de l'œil au niveau de l'OLT</i> .....	<b>74</b>

**LISTE DES TABLEAUX**

**CHAPITRE I**

**Tableau I.1 :** *Comparaison entre P2P et P2MP*.....06

**Tableau I.2 :** *Comparaison des standards PON*.....12

**CHAPITRE III**

**Tableau III.1:** *comparaison entre WiMax fixe et MiWax mobile*.....47

**CHAPITRE IV**

**Tableau IV.1 :** *caractéristiques de photo détecteur*.....64

**Tableau IV.2 :** *Caractéristique de la fibre optique*..... 66

---

---

# INTROCUTION GENERALE

---

---

### Introduction générale

La plupart des systèmes d'accès optique déployés aujourd'hui sont basés sur les technologies GPON (Gigabit Passive Optical Network) qui est basé sur la technique de multiplexage temporel TDM-PON (Time Division Multiplexing PON). Pour la future demande de bande passante pour laquelle un débit de l'ordre des Gbits/s par utilisateur serait nécessaire, la technologie PON à base du TDM semble insuffisante ou moins économique à cause du débit trop élevé pour un grand nombre d'utilisateurs. Donc, l'utilisation de la technologie de multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) dans le PON est une solution très prometteuse pour pouvoir monter à un débit très élevé. La forte capacité de montée en débit du WDM-PON est expliquée grâce au fait que la communication avec chaque utilisateur est dédiée à une longueur d'onde. Pour cette raison, la technologie WDM-PON apparaît actuellement comme un des candidats les plus potentiels pour la future génération NGPON.

La fibre optique du PON est déployée généralement sous terre, le problème se produit lorsqu'il y'a des obstacles provenant soit d'obstacles artificiels, soit d'environnements géographiques naturels. L'intégration de systèmes d'accès sans fil avec le système WDM-PON surmonte le problème rencontré par ce réseau conventionnel en remplaçant la fibre par un émetteur-récepteur sans fil. Cette solution se base sur des technologies hybrides dites Radio sur Fibre (RoF) qui utilise de manière avantageuse la fibre optique pour distribuer des signaux radiofréquence RF à travers des antennes déportées. Ce principe offre une flexibilité favorable aux opérateurs confrontés aux contraintes de déploiement, et leur permet de fournir une couverture radio à leurs abonnés.

Donc, la demande parallèle de la bande passante et de la mobilité met plus de pression pour créer des solutions intégrées qui fusionnent les deux techniques fixe et mobile. Par conséquent, dans le cadre de ce mémoire, nous introduisons l'intégration de la technologie Radio sur Fibre (RoF) comme un réseau d'accès sans fil dans les réseaux optiques passifs avec le multiplexage WDM (WDM-PON) pour une infrastructure de futur réseau d'accès.

Les travaux effectués dans ce mémoire concernent la réalisation de solutions de convergence des réseaux d'accès fixes et mobiles. L'utilisation combinée de la fibre optique et sans fil (radiofréquence) est conçu donc pour fournir un futur réseau d'accès large bande appelé Fi-Wi (Fiber-Wireless).



Comme il n'existe pas de normes pour les futurs réseaux d'accès Fi-Wi fusionnant les deux techniques fixe et mobile, la question pour la meilleure mise en œuvre, et en effet, la compatibilité de RoF avec les PON reste ouvert. L'objectif principal de ce mémoire est de sélectionner une infrastructure de communication de données efficace pour soutenir les services de réseau d'accès Fi-Wi en considérant une technologie de communication hybride sans fil et optique. Les réseaux RoF-WDM-PON peut fournir la rapidité, la fiabilité et l'efficacité du réseau d'accès optique, et la flexibilité et la mobilité du réseau sans fil. Pour ce faire, ce mémoire est devisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre permet d'introduire les infrastructures du réseau d'accès très haut débit et particulièrement le réseau fibré FTTx. Le fonctionnement, les architectures et les différentes normes des PON sont décrites, une comparaison entre les technologies existantes et les contraintes lies aux déploiements des PON sont également présentées.

Le deuxième chapitre porte sur la notion de Radio-sur-fibre (RoF), ainsi que les différentes liaisons de transmission RoF par voie optique. Les principales caractéristiques de ces liaisons sont aussi décrites, ainsi que les différentes causes de dégradation de leurs performances.

Le troisième chapitre concerne les futures réseaux d'accès large bande Fi-Wi par l'intégration du système RoF dans un réseau optique passive avec multiplexage en longueur d'onde WDM-PON. Nous abordons le principe de base du réseau hybride RoF-WDM-PON. Nous rapportons ainsi, les différentes solutions d'intégration du RoF au PON, et les techniques de détection utilisés pour la génération des signaux RF. L'architecture physique proposée pour les PON de prochaine génération avec la collaboration du réseau WiMAX comme un réseau d'accès RoF est également présentées.

Le quatrième chapitre porte sur la simulation sous Optisystem, d'un réseau d'accès optique passif WDM-PON en collaboration de système RoF, dont le but d'évaluer ces performances pour les deux liaisons descendante et montante examinées en fonction du taux d'erreur binaire (BER), de facteur de qualité, et de diagramme de l'œil.

---

---

**CHAPITRE I**  
**LE RESEAU OPTIQUE PASSIF ET**  
**SON EVOLUTION**

---

## **I.1 Introduction**

Le réseau d'accès optique connaît actuellement une évolution très rapide qui accompagne à l'augmentation de la demande en débit. Téléchargement et d'autres applications à haut débit, toutes ces applications nécessitent une grande bande passante pour récupérer les informations le plus rapidement possible.

La demande d'utilisation une grande bande passante a provoqué mise en place le réseau optique passif PON (Passive Optical Network), ce dernier parmi les différents applications des réseaux d'accès de type FTTH (Fiber To The Home).

L'objectif de ce chapitre consiste à présenter tout d'abord le réseau optique de façon générale afin de se familiariser avec les termes et les technologies employés, dans la première partie nous allons décrire les différentes architectures FTTx (Fiber to the x) et les deux architectures FTTH (P2P et P2MP) comparaison entre eux. Ensuite on va aborder la partie du réseau optique passif, ses éléments constitutifs tels que l'ONU, l'OLT, splitter, son architecture ainsi son principe de fonctionnement et différentes normes des réseaux PON, à savoir, la norme APON, la norme BPON, la norme EPON, et la norme GPON.

Nous discutons par la suite les futures générations du réseau d'accès optique NGPON on s'intéresse sur l'intégration de multiplexage de longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) dans un PON, enfin on présente quelques limites lié au déploiement du réseau PON.

## **I.2 Les réseaux de télécommunications optiques**

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

### **I.2.1 Le réseau de transport**

Les commutateurs de télécommunications reliés entre eux (notamment pour des raisons de protection de trafic) forment le réseau de collecte (ou métropolitain) qui constitue le premier niveau du réseau de transport. On peut y distinguer principalement au niveau national des réseaux maillés formés de plusieurs sous-réseaux ayant une structure en boucle.



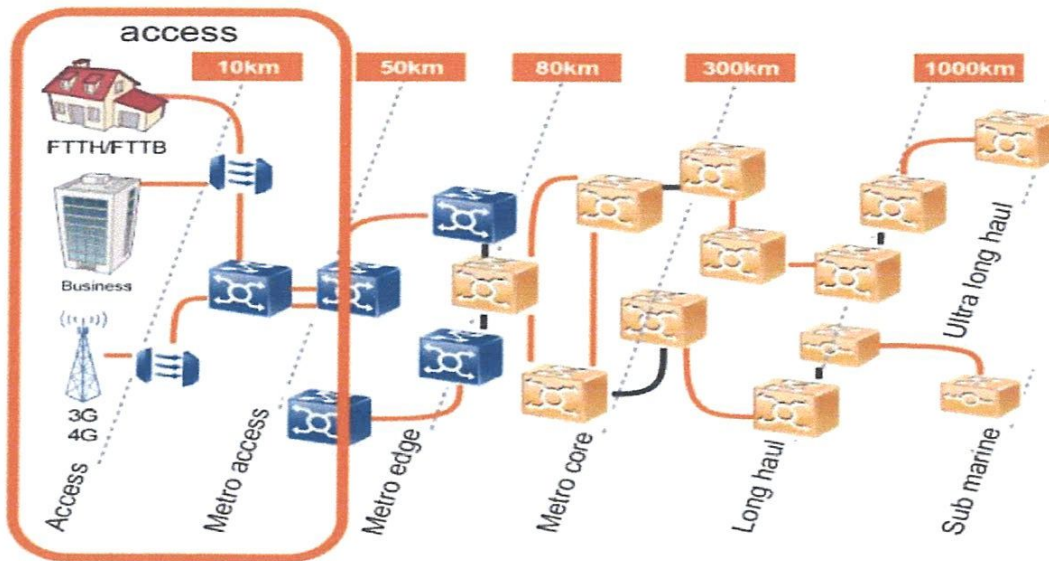


Figure I.1 : Architecture d'un réseau de télécommunication

Au-delà des réseaux nationaux, on trouve des réseaux s'étendant sur plusieurs milliers de kilomètres à l'échelle des pays les plus grands ou de continents. On parle alors de réseaux continentaux ou (très) longue distance ou encore de réseaux sous-marins. Le réseau de transport permet de réaliser des transmissions de données à des débits atteignant une centaine de Gigabit/s aujourd'hui, en partie grâce au multiplexage en longueur d'onde qui existe depuis une vingtaine d'années [1].

### I.2.2 Le réseau d'accès

Le réseau d'accès comprend tout ce qui est situé entre le réseau métropolitain et le terminal de l'abonné. Il englobe l'ensemble des moyens servant à relier des terminaux de télécommunications (fibre, mobile ou sans fil). Sa longueur varie de 2 à 50 km.

Le réseau d'accès optique est souvent constitué par une partie en fibre optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'à le terminal de l'abonné.

Plusieurs configurations pour raccorder les utilisateurs à la fibre optique sont définies (Figure II.2) : appelées aussi FTTx (fibre to the ..., fibre jusqu'à...), où la variable x décline le niveau plus ou moins profond de déploiement de la fibre optique vers l'abonné final: FTTC (C pour Curb) jusqu'à un sous répartiteur cuivre de quelque dizaine de mètres de l'abonné, FTTB (B pour Building) en pied de l'immeuble, et FTTH (H pour Home) jusqu'à l'abonné [2].



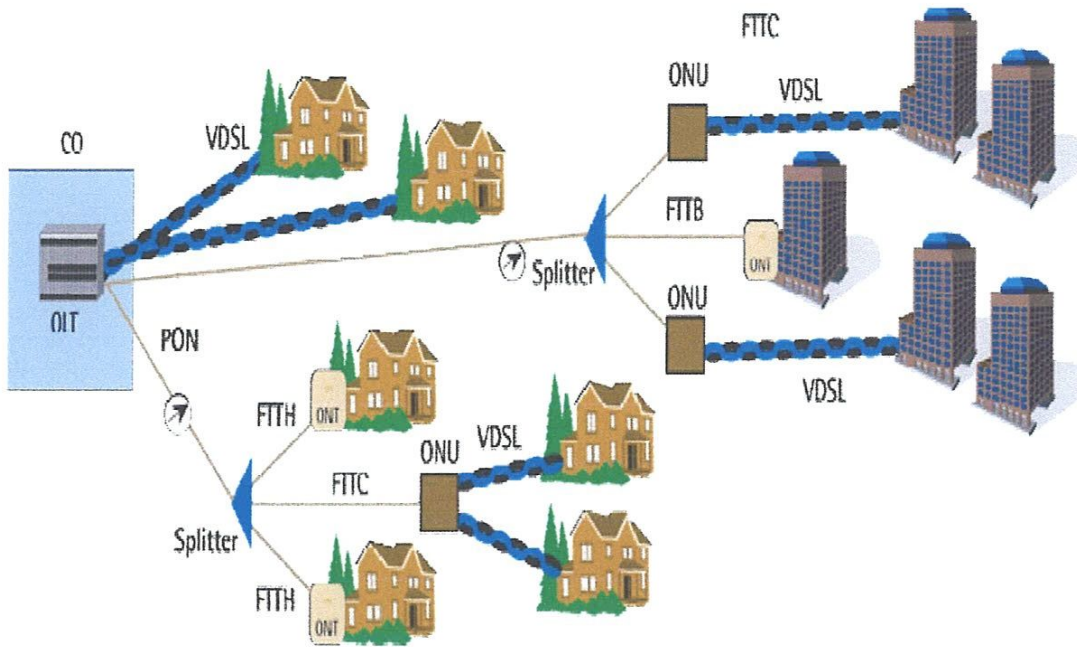


Figure I.2 : Réseau d'accès optique

Pour les architectures FTTC et FTTB, le réseau d'accès est constitué de fibres optiques jusqu'à un certain point, à partir duquel le signal est distribué classiquement sur des réseaux de type câble à paires de fils en cuivre ou câble coaxial. Ces architectures sont schématisées sur la Figure II.2. Pour l'architecture FTTC, la fibre optique ne relie que le sous-répartiteur de réseau desservant le quartier de l'utilisateur, tandis que les derniers mètres réutilisent les câbles de cuivre existants. Ce sous-répartiteur est alors équipé de matériel haut débit, qui permettra de transmettre un signal de type VDSL (Very high-bit rate DSL, DSL à très haut débit) jusqu'à l'utilisateur. Dans le cas des architectures FTTB et FTTH, la fibre optique relie le nœud de raccordement optique du réseau fibré (OLT: optical line termination) à un nœud de répartition (ONT : optical network termination) au pied de l'immeuble (FTTB) ou directement aux prises murales de l'abonné (FTTH).

Les réseaux FTTH actuellement déployés se présentent sous deux architectures : le point à point (FTTH dédié), et le point à multipoints (FTTH partagé) appelées aussi **PON** (passive optical network).

Le choix de l'architecture dépend du type de services devant être fournis, du coût de l'infrastructure, de l'infrastructure actuelle et des plans futurs de migration vers les nouvelles technologies.

### I.2.2.1 FTTH dédié : L'architecture Point à Point

FTTH point à point est l'architecture la plus simple qui soit en termes de topologie physique puisqu'elle consiste à avoir un lien physique en fibre optique directement entre le central (OLT) et le client (ONU : optical network unit). La fonction de concentration est assurée par un nœud de raccordement.

Cette architecture permet une étanchéité absolue entre les lignes des différents abonnés : Aucun risque de sécurité, et garantie absolue de disponibilité totale de la ligne (aucun partage de débit) [2].

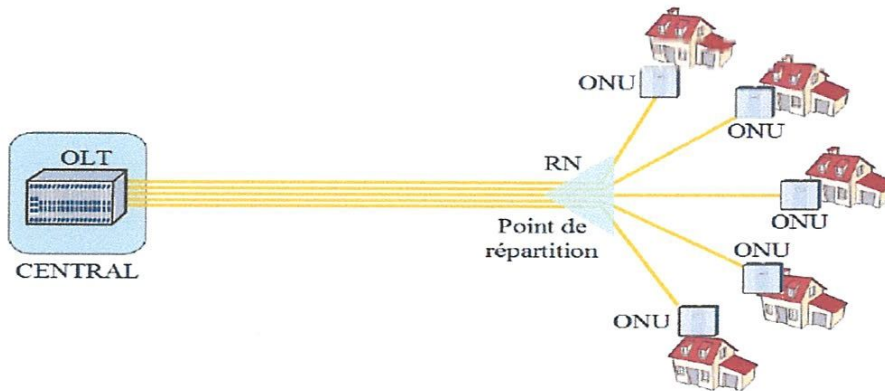


Figure I.3 : L'architecture FTTH point à point (p2p)

- **Les avantages**

- ☞ Solution universelle adaptée aux clients résidentiels et aux entreprises.
- ☞ Budget optique optimal : pas de composants optiques entre l'OLT et l'ONU.
- ☞ La sécurité des données est garantie puisqu'une ou deux fibres sont dédiées à chaque client.
- ☞ La gestion du réseau est très simplifiée.
- ☞ Bande passante illimitée.
- ☞ Plus économique dans des secteurs d'abonné de faible densité.
- ☞ Une plus grande flexibilité de service.

- **Les inconvénients**

- ☞ Gestion de la fibre au niveau de la centrale (la gestion TxRx).
- ☞ Pas de mutualisation de la fibre.
- ☞ Encombrement à l'intérieur du central dû au grand nombre de transcrives.
- ☞ Pas de partage de l'OLT ou de port optique, beaucoup de fibres à déployer (pas très économique) [3].

### I.2.2.2 FTTH partagé : L'architecture point multipoint passif

Une fibre unique part du central et dessert plusieurs habitations, lesquelles sont raccordées à cette fibre au niveau de l'équipement passif (coupleur ou multiplexeur), placé à proximité de la zone à desservir. Chaque maison reçoit toutes les informations envoyées par l'équipement central (OLT) ; l'équipement récepteur (ONU) de chaque abonné assure le filtrage, ce qui représente, une solution permettant de mutualiser l'infrastructure entre plusieurs clients.

L'architecture Point-a-Multipoint est composée d'éléments optiques passifs est appelée réseau optique passif (P.O.N. Passive Optical Networks) [2].

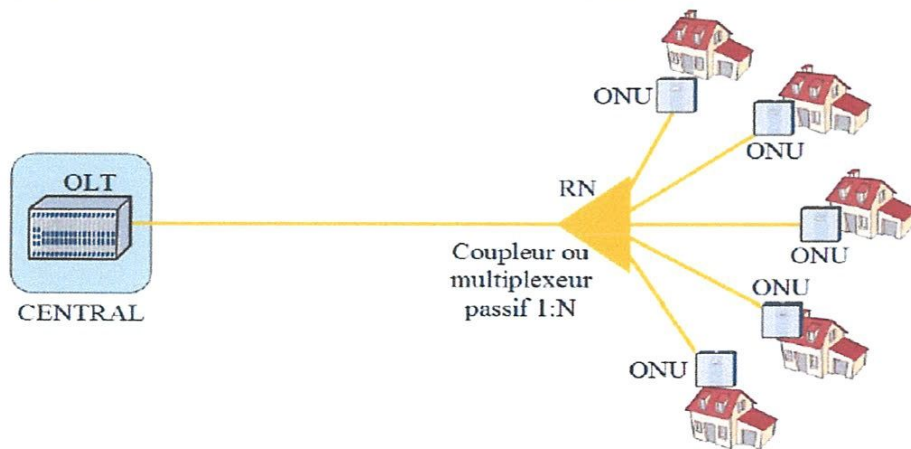


Figure I. 4 : L'Architecture FTTH Point Multipoint passif (P2MP).

- **Les avantages**

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

- **Les inconvénients**

- ☞ Bande passante partagée et limitée.
- ☞ Sécurité des données nécessaire.
- ☞ Zone de couverture limitée: en fonction du nombre de divisions (plus de divisions = moins de distance) [3].



### I.2.2.3 Comparaison entre les deux architectures P2P et P2MP

Le tableau ci-dessus résume une comparaison des deux architectures P2P et P2MP [3]:

Paramètre	Point à Point (P2P)	Point à multipoint (P2MP)
Gestion de chiffrement	Pas nécessaire	Requise
Gestion de la bande passante	Bande passante non partagée sur le réseau d'accès.	Allocation dynamique de la bande en fonction des besoins des utilisateurs.
Zone de desserte	L'habitat dispersé et pour les lignes spécialisées.	Le résidentiels et pour les zones forte densité.
Distance (kms)	15	20
Fibre	une fibre par abonné de bout en bout.	1 fibre par abonné en partie distribution et raccordement, 1 fibre pour n abonnés dans la partie transport.
Energie	2 watt / abonné Dissipé au NA	0,6 watt/ abonné Dissipé au NA
Débit garanti	100 Mbit/s ou 1 Gbit/s symétriques selon connexion.	Jusqu'à 78 Mbit/s descendants en split de 32.
Débit maximum	100 Mbit/s ou 1 Gbit/s symétriques selon connexion.	Jusqu'à 2,5 Gbit/s en descendant et 1 Gbit/s en montant.

Tableau I.1 : Comparaison entre P2P et P2MP

Comparée à une architecture P2P, l'architecture PON permet un investissement plus progressif mais présente des coûts d'exploitation et de maintenance plus élevés (gestion des abonnés plus complexe, interventions au niveau des points de flexibilité accueillant les coupleurs optiques). Néanmoins, les PON indiquent qu'un OLT desservant plusieurs milliers de clients utilisera moins de cartes qu'un commutateur P2P et de ce fait, aura une consommation énergétique bien moins élevée et nécessitera moins de surface au sol dans le centrale.



### I.3 Les réseaux optiques passifs (PON : Passive Optical Network)

Le réseau optique passif PON est l'architecture très majoritairement choisie, il est composé d'éléments optiques passifs, car les distances à parcourir ne nécessitent pas de régénération du signal ; ceci évite le besoin de courant électrique entre le nœud central de distribution et l'abonné, et réduit les coûts de matériel, d'installation, d'opération, et d'entretien du réseau [4].

#### I.3.1 Éléments d'un PON

Un réseau PON donné par la Figure I.5 est composé par un terminal de ligne optique appelé OLT (Optical Line Terminal), une fibre optique monomode, un coupleur optique passif (Splitter) et une unité de réseau optique appelé ONU (Optical Network Unit) [5].

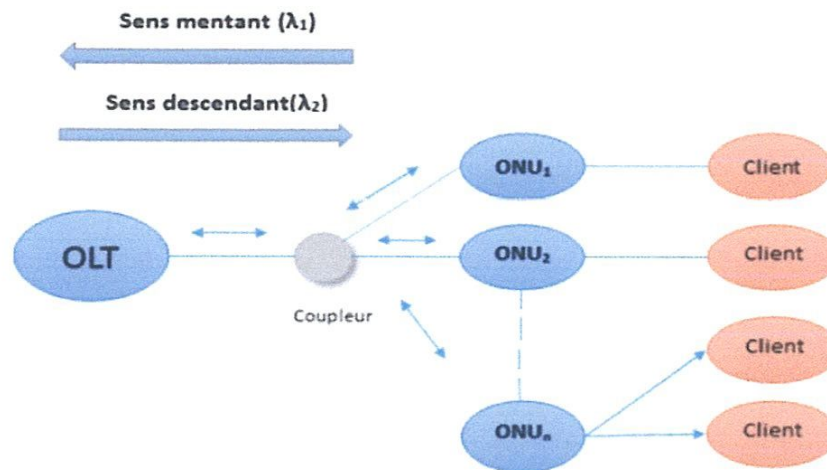


Figure I.5 : Les éléments constitutifs du PON.

- **OLT (Optical Link Terminal)**

L'OLT est l'équipement maître d'accès optique pour des clients connectés au FTTx, un lieu de collecte permet de distribuer des services tel que : l'internet, la téléphonie et la vidéo, c'est un équipement actif au niveau du central, envoie et reçoit des signaux lumineux porteurs des données [1].

Il offre deux (02) fonctions principales :

- La conversion des signaux électriques /Optiques entre l'équipement du fournisseur de service et le réseau optique passif.
- La coordination du multiplexage entre les dispositifs de conversion électriques /Optiques.

- **ONT (Optical Network Terminal)/ ONU (Optical Network Unit)**

L'ONT peut être considéré comme un modem optique auquel le client vient connecter sa passerelle d'accès au haut débit. C'est un élément terminal du réseau optique. L'ONU désigne un élément générique terminal du réseau d'accès optique FTTx. L'ONT se compose d'un module, d'un émetteur optique à base d'une diode LASER et un photorécepteur [1].

L'ONT est l'interlocuteur directe de L'OLT, les ONT émettent sur une même longueur d'onde pour des raisons de cout et de gestion des équipements.

- **Coupleur optique (splitter)**

On appelle coupleur le composant qui est intégré dans la ligne, assure la fonction diviseur ou concentrateur de la transmission. C'est un équipement passif qui nécessite aucune alimentation électrique, son fonctionnement est basé sur la seule propagation de la lumière à l'intérieur de la fibre [6].

les pertes du coupleur sont proportionnelles au nombre de ports N: et sont égales, en décibel, à  $10 \cdot \log(N)$ , ce qui donne le tableau suivant :

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

Dans le sens montant le coupleur permet de combiner par addition les signaux optiques, dans le sens inverse (sens descendant) il divise le signal optique qui vient de L'OLT. Le coupleur n'est pas capable d'aiguiller, de modifier, de retarder ou de bloquer les signaux qui le traversent.

- **Fibre optique des réseaux PON**

La transmission des données dans un réseau PON ce fait par des fibres optiques monomode G.652 (dispersion chromatique presque nulle à 1300 nm). L'UIT-T a dans un premier temps normalisé la fibre monomode G.652.

### I.3.2 Principe de fonctionnement d'un PON

Le PON est basé sur une architecture point-a-multipoint a base de multiplexage temporel (TDM). Il présente une architecture passive optique à base d'un coupleur. Le coupleur est achromatique pour permettre une transmission des différentes longueurs d'ondes.

Le trafic descendant et le trafic montant sont envoyés sur deux longueurs d'onde différentes (1490 nm pour la voie descendante, et 1310 nm pour la voie montante). Pour le sens descendant, l'OLT diffuse les données des abonnés destinataires. Puis, le signal est divisé par un coupleur (splitter) et dirigé vers les ONUs. Par conséquent, chaque ONU sélectionne le paquet qui lui est destiné et supprime les autres paquets [4].

- **Sens montant**

Le coupleur étant passif, et les ONT émettant tous dans la même longueur d'onde, si les signaux émis par deux ONT parvenaient simultanément au coupleur, ils ressortiraient sous la forme d'un mélange illisible par l'OLT [7].

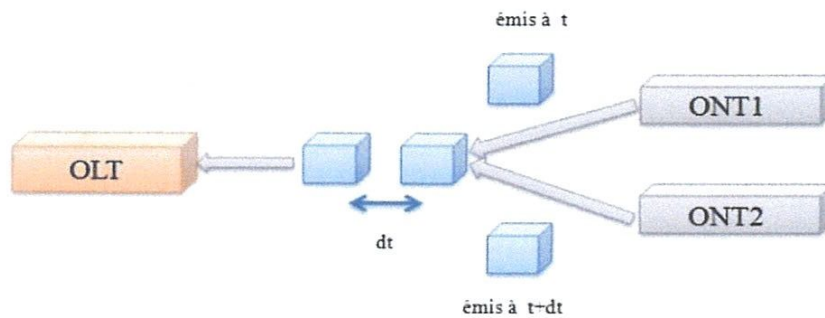


Figure I.6 : Architecture du sens montant.

- **Sens descendant**

Dans le sens descendant chaque abonné ne reçoit que les informations qui le concernent. Tous les ONT reçoivent l'ensemble des données mais seul l'ONT concerné les retransmet dans le réseau interne de l'abonné la Figure I.7 montre ce principe [6].

Dans le réseau PON et sur l'architecture du sens descendant, le débit instantané est partagé entre tous les abonnés qui reçoivent les données.

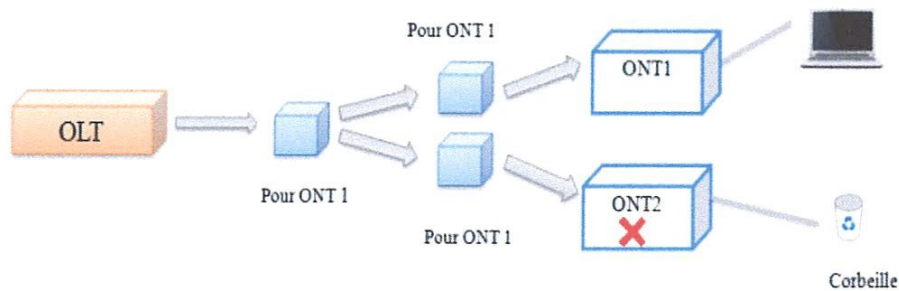


Figure I.7 : Architecture du sens descendant.



### I.3.3 Les différents standards d'un PON

Les réseaux optiques passifs PON peuvent être classés en deux grandes catégories, puisque standardisés de deux organismes différents : d'un côté l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), et de l'autre l'ITU-T appuyé par le Full Service Access Network (FSAN) [1].

**BPON** appuyés par l'instance de normalisation ITU (International Télécommunication Union). **EPON** appuyés par le groupe d'Ethernet IEEE (Electrical and Electronic Engineers). **GPON** appuyés par [UIT - T G984.1] et le **10G PON** (IEEE 802.3av - 2009 et l'UIT - T G.987).

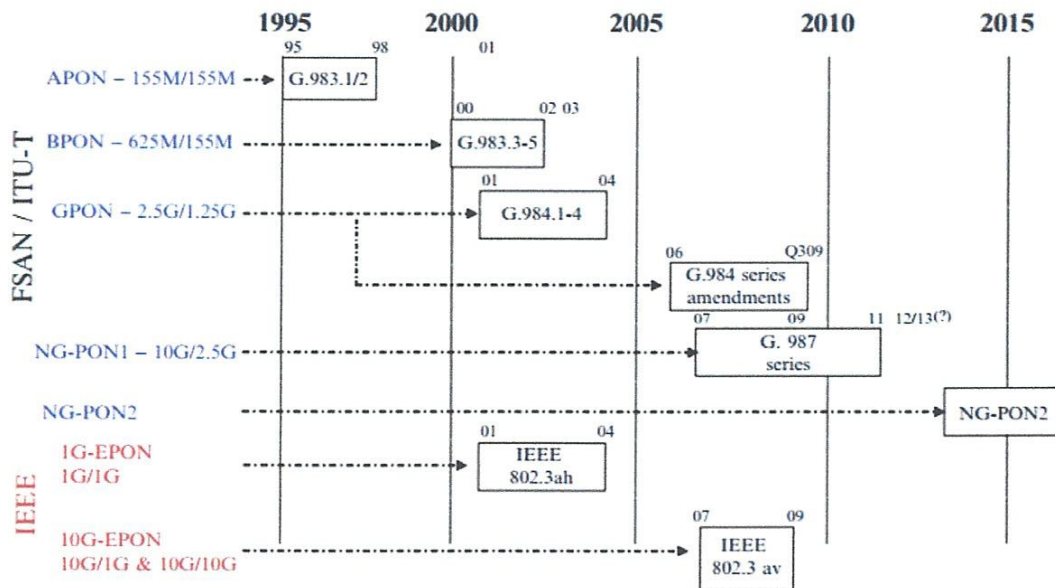


Figure I.8 : Les différents standards d'un réseau PON

#### I.3.4.1 La norme APON

La première technologie PON date de 1995 et des travaux du FSAN sur l'APON (PON basé sur le protocole ATM Asynchronous Transfer Mode). Avec l'APON, les données à haut débit, la voix et la vidéo peuvent être acheminées jusqu'aux abonnés sur une seule fibre. Un système APON peut relier jusqu'à 32 abonnés au PON et leur fournir un système d'accès flexible et un débit élevé (622 Mbit/s dans le sens descendant, 155 Mbit/s dans le sens montant). Le canal descendant est divisé en 53 emplacements de 56 octets à 155.520 Mbit/s. Dans le sens descendant, le multiplexage des cellules ATM est utilisé, alors qu'un protocole de TDMA commande l'accès ascendant des abonnés au réseau [8].



#### **I.3.4.2 La norme BPON**

Défini dans la série UIT-T G.983, est une autre amélioration du système APON modifiée pour permettre la diffusion de la vidéo. C'est un réseau de distribution en fibre optique à large bande (transmet la voix et les données sur la même fibre), et réserve des fréquences pour la télévision numérique et analogique [3].

Les améliorations récentes de l'APON incluent

- Une vitesse plus élevée.
- le multiplexage en longueur d'onde WDM.
- Une commande dynamique de la largeur de bande.
- Une meilleure sécurité de données [7].

#### **I.3.4.3 La norme EPON**

L'EPON (Ethernet PON) ou GE-PON (Gigabit Ethernet PON) sont deux acronymes différents pour une même spécification. Il s'agit d'un standard proposé cette fois-ci par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), qui a été ratifié en juin 2004 sous la référence 802.3ah et qui autorise un débit de 1,25 Gb/s maximum symétrique sur des distances d'une vingtaine de km, à partager entre les 32 utilisateurs possibles pour chaque arbre. Ce protocole s'appuie en natif sur une version du protocole de transport Ethernet, chaque paquet descendant porte l'adresse de l'ONU auquel il doit être fourni, mais ce paquet est transmis à tous les ONU [5].

#### **I.3.4.4 La norme GPON**

Le GPON a été standardisée par l'ITU en en 2005 sous la référence G984, qu'est venu l'avènement des technologies PON pour les marchés de masse, Basé sur une architecture point à multipoint où chaque ONU reçoit la totalité du signal provenant de l'OLT, le sens descendant et le sens montant n'utilise pas la même longueur d'onde, le GPON nécessite un partage de l'information, se fait dans le domaine temporel TDM (Time Division Multiplexing) sa capacité à transporter des paquets et des trames Ethernet de longueurs variables, l'avantage majeur de GPON est qu'il peut supporter plusieurs services à la fois et permet la transmission des paquets en se basant sur des protocoles différents (ATM, IP)[8].

Le tableau ci-dessus récapitule les caractéristiques des différentes normes définit précédemment [5].

Norme	APON	BPON	EPON	GPON
Norme de recommandation	ITU-T G.983	ITU-T G.983	IEEE802.3ah IEEE802.av	G.984 (FSAN)
Protocoles	ATM	ATM	Ethernet avec accès CSMA/CD	GEM (ATM, Ethernet, TDM)
Longueur D'onde (descendant/montant)	1490 nm / 1310 nm	1490 nm / 1310 nm	1490 nm / 1310 nm	1490 nm / 1310 nm
Débit descendant	155 Mbit/s ou 622 Mbit/s	155 Mbit/s ou 622 Mbit/s	1.25 Gbit/s ou 10 Gbit/s	2.5 Gbit/s
Débit montant	155 Mbit/s	155 Mbit/s ou 622 Mbit/s	1.25 Gbit/s ou 10 Gbit/s	1.25 Gbit/s
Taux de partage	16, 32	16, 32	16, 32, 64	16, 32, 64 jusqu'à 128.
Distance OLT/ONT	10 ou 20 Km	10 ou 20Km	20 Km	60 Km

Tableau I.2 : Comparaison des standards PON.

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

Les études incluses dans le NGPON2 doivent être considérées comme des propositions de solutions qui mèneront à la définition d'une norme successive au NGPON1. Pourtant, le NGPON2 pourrait également succéder directement aux technologies GPON si l'avancement du déploiement actuel se trouvait ralenti et que le NGPON1 ne serait pas retenu pour en prendre la suite [1].



### I.3.5 Les futures générations du réseau d'accès optique

La technique de multiplexage utilisée pour concevoir les futurs réseaux d'accès optiques est influencée par le débit par utilisateur, le nombre d'utilisateurs, la distance de fonctionnement, et le coût de l'architecture [9].

Les paragraphes suivants présentent différentes solutions utilisables pour un accès très haut débit avec quelques architectures types des futures générations du réseau PON qui sont en cours d'étude [4].

#### I.3.5.1 10 GPON à Multiplexage temporel (TDM-PON)

Le multiplexage temporel est la technique utilisée dans les réseaux optiques passifs actuels. Une évolution logique pour les PON est l'augmentation du débit global à 10 Gbit/s. Ceci est évoqué actuellement au FSAN qui est l'organisme de pré-normalisation de l'ITU ainsi qu'à l'IEEE pour la norme IEEE 802.3 EPON. Cette amélioration permettrait de réutiliser l'infrastructure existante et d'augmenter de façon sensible le débit par utilisateur. Son principe de fonctionnement est représenté dans la Figure I.9.

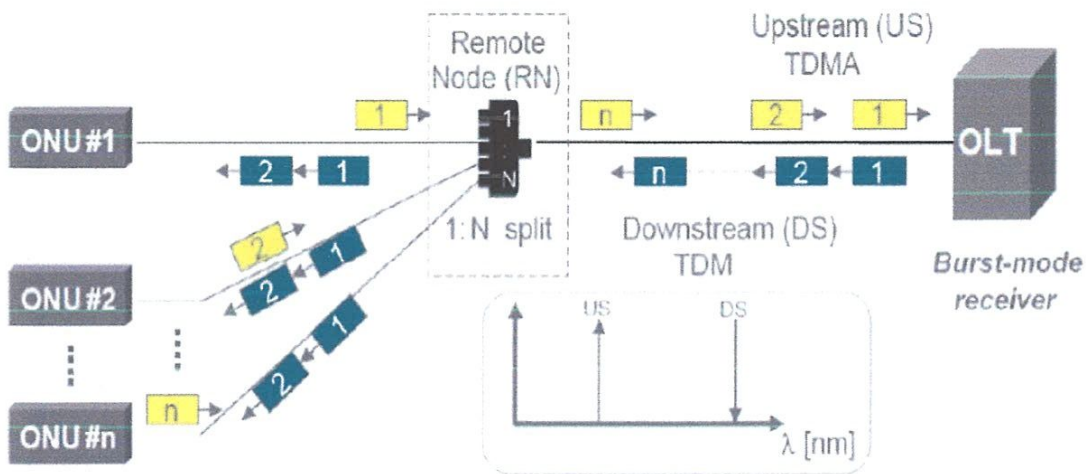


Figure I.9 : PON basé sur le multiplexage temporel (TDM-PON)

Pour la transmission en voie descendante ou "Down Stream", techniquement c'est possible d'obtenir un multiplexage temporel électrique à 10 et 40 Gbit/s. Pour un débit supérieur il faut passer à un multiplexage temporel optique avec des lignes à retard. A partir de 10 Gbit/s, la modulation directe n'est plus possible à cause du chirp des lasers. La solution sera très certainement les lasers à modulation externe (EML: electro-absorption

modulated laser), qui sont en fait constitués d'un laser et d'un modulateur à électro-absorption.

Pour la transmission en voie montante ou "Up Stream" la difficulté réside dans la conception de modules optoélectroniques bas coût, à 10 Gbit/s à l'émission et à la réception des lasers et photodiodes à 10 Gbit/s, est la conception du récepteur en mode rafale à 10 Gbit/s à l'OLT. En effet la technique existante à 1.25 Gbit/s n'est plus utilisable et même si un tel récepteur existe déjà, son coût est prohibitif [9].

### I.3.5.2 PON avec multiplexage en longueur d'onde (WDM-PON)

Le multiplexage en longueur d'onde du réseau optique passif ou WDM (pour Wavelength Division Multiplexing) est possiblement la prochaine génération de solution pour les réseaux d'accès NGPON2. La capacité totale de la bande passante du système d'accès est multipliée par le nombre de longueurs d'onde multiplexées sur la fibre. Ces signaux optiques sont ensuite séparés (ou démultiplexés) dans des fibres différentes. En allouant une longueur d'onde par client, il permettra de délivrer de nouveaux services très haut débits et d'atteindre facilement le gigabit chez l'abonné. [10].

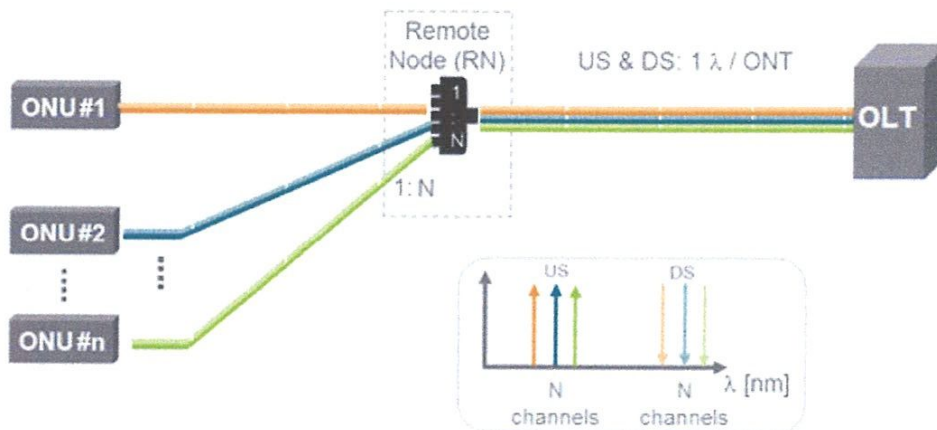


Figure I.10 : PON basé sur le multiplexage en longueur d'onde (WDM-PON)

Le multiplexage en longueurs d'onde est basé sur le fait qu'un grand nombre de longueurs d'onde peuvent se propager simultanément dans une fibre sans chevauchement entre elles (en respectant certaines précautions). Le WDM permet une transparence vis à vis du format des informations véhiculées ainsi, les signaux portés par les différentes longueurs d'onde peuvent être de débits et de formats très variés (transport simultanément de la voix dans des trames SDH, de la vidéo dans des cellules ATM, des données dans des trames IP... etc...).



La Figure I.11 montre l'architecture de base du WDM-PON. La terminaison de ligne optique (OLT) est composée de nombreux émetteurs optiques fonctionnant dans différentes longueurs d'onde. Tous les signaux optiques sont transmis par une seule fibre optique. Dans le nœud distant (RN), un démultiplexeur WDM passif (DEMUX) est appliqué pour sélectionner un signal optique différent à l'unité de réseau optique dédiée (ONU) placée à chaque utilisateur final.

Le WDM-PON peut être divisé en coarse WDM-PON (CWDM-PON) et dense WDM-PON (DWDM-PON) correspondant à différentes densités de longueurs d'onde possibles. CWDM est en train de devenir une solution robuste et économique. L'espacement CWDM typique est de 20 nm (grille UIT-T G.694.2, Union internationale des télécommunications) et ne nécessite pas de contrôle de température pour construire des sources de longueur d'onde suffisamment stables. L'extension de WDM est DWDM fonctionne avec un espacement de canaux aussi petit que 0,8 nm (100 GHz), 0,4 nm (50 GHz) ou même 0,2 nm (25 GHz), pour des applications de plus grande capacité par rapport à la technique CWDM [11].

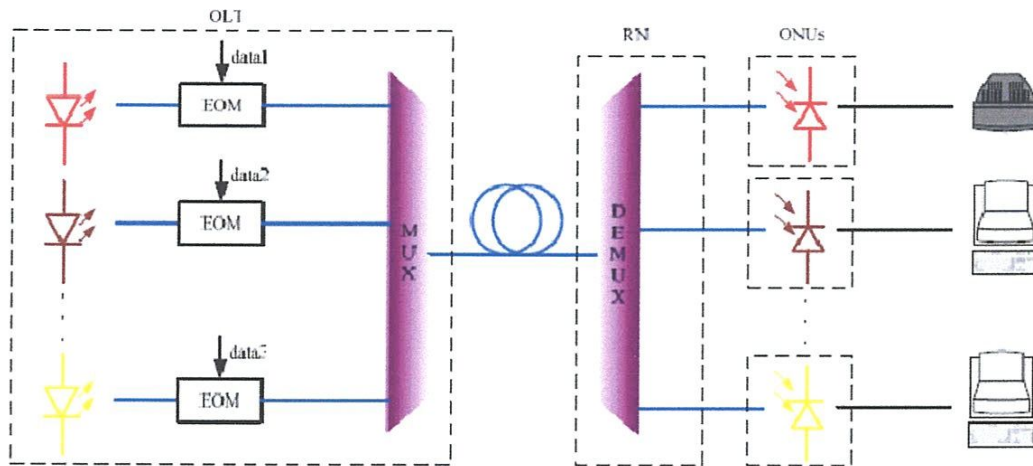


Figure I.11 : Architecture de base du WDM-PON

Il existe principalement deux techniques de PON-WDM, l'une utilisant un coupleur comme composant de répartition, il s'agit alors du "broadcast and select", l'autre utilisant un multiplexeur et faisant appel à "aiguillage des longueurs d'ondes".

#### a. Architecture PON WDM broadcast and select

Dans ce type d'architecture il existe un élément principal que dans un PON TDM, c'est-à-dire le coupleur passif 1 : N, il va diffuser toutes les longueurs

d'onde émises par le central à tous les clients ("broadcast"). Chaque abonné reçoit toutes les longueurs d'onde mais avec un filtre optique différent chez chaque ONU permet de sélectionner la longueur d'onde qui lui est attribuée ("select"). L'inconvénient majeur est qu'il faut autant de filtres différents que de clients raccordés au coupleur. Une solution plus souple est d'avoir un filtre accordable chez chaque client, et d'accorder la longueur d'onde de filtrage correctement à distance [4].

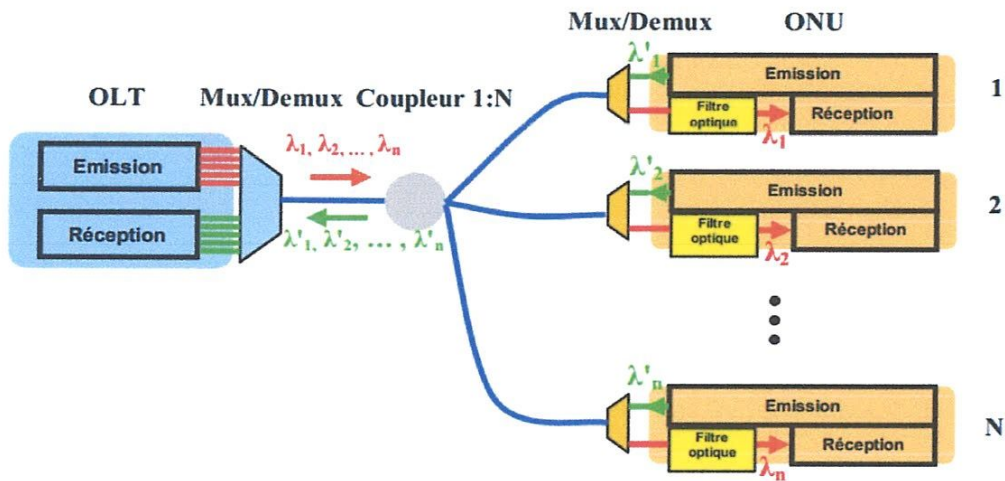


Figure I.14: Architecture PON-WDM "broadcast and select"

### b. Architecture PON WDM avec aiguillage des longueurs d'onde

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

Le principe de cette technique consiste d'abord à multiplexer les longueurs d'onde descendantes à l'OLT et à les faire se propager sur la fibre de distribution jusqu'au démultiplexeur qui sépare les longueurs d'onde et envoie chacune d'elles vers le client qui lui correspond, qui reçoit donc uniquement ses données. Il s'agit d'une architecture en arbre.

Pour le sens montant, chaque client a un laser de longueur d'onde différente qui correspond au port du multiplexeur sur lequel il est connecté. Tous les signaux montants sont multiplexés puis envoyés sur la fibre principale et ensuite démultiplexés à l'OLT [10].

Cette structure permet d'atteindre un maximum d'efficacité en bande passante par client. De plus, les pertes optiques du multiplexeur sont indépendantes du nombre de ports de sortie. Toutefois, le prix du multiplexeur / démultiplexeur reste très élevé pour l'instant [1].

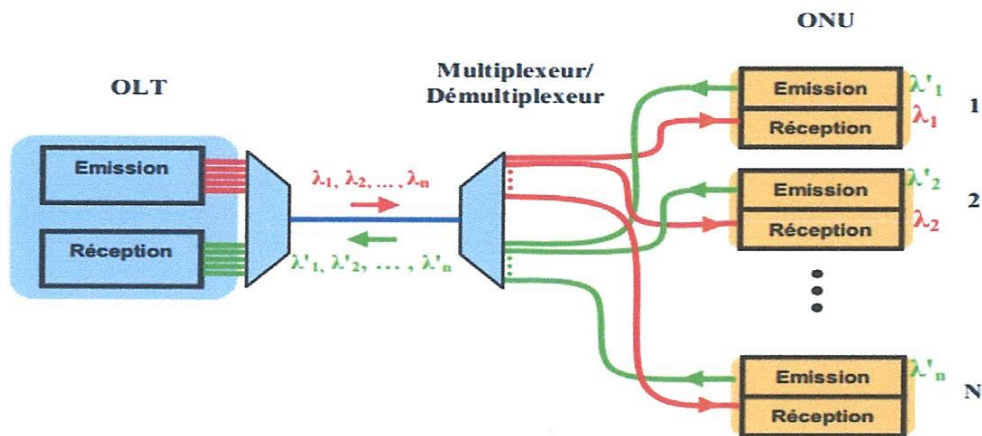


Figure I.15: Architecture PON WDM avec aiguillage en longueur d'onde

### I.3.6 Contraintes lié à l'évolution du PON

Le réseau PON permet d'autoriser des débits très importants tout en minimisant l'infrastructure (moins de fibres optique), néanmoins le réseau PON présente quelques points négatifs :

- Si les câbles optiques mis en place correspondent au strict nécessaire à la réalisation d'un PON, alors la capacité d'évolution du réseau est limitée. On ne dispose d'aucune réserve de capacité d'aucune fibre excédentaire. On ne peut évoluer sans réaliser de nouvelles infrastructures d'accueil.
- Dans certaines régions, la réglementation de l'autorité locale exige que la fibre soit déployée sous terre. Le problème se produit lorsqu'il y a des obstacles provenant soit d'obstacles artificiels (par exemple des bâtiments), soit d'environnements géographiques naturels (par exemple des rivières) qui empêchent l'installation de fibres entre ces deux points. Mis à part cela, les travaux de construction tels que le creusement augmenteront également le coût d'exploitation global.

L'intégration de systèmes d'accès sans fil avec le système WDM-PON surmonte le problème rencontré par ce réseau conventionnel en remplaçant la fibre par un émetteur-récepteur sans fil en utilisant la technologie de distribution de données sans fil à ondes radios tout en maintenant le débit de données de 100 Mb/s-1Gb/s.



La technique de Radio sur Fibre RoF (Radio over Fiber) devenue un bon candidat pour le système d'accès sans fil. Cette technique permet l'anticipation des réseaux du futur et la réalisation de solutions de convergence des réseaux d'accès fixes et mobiles. Ce principe offre une flexibilité favorable aux opérateurs confrontés à des contraintes de déploiement, liées notamment aux difficultés d'acquisition des sites ou à des limitations physiques de câblage sur différents sites, et leur permet de fournir une couverture radio à leurs abonnés.

On mettra dans le deuxième chapitre une étude détaillée, dont on tâchera de décrire le principe de la technique RoF.

#### **I.4 Conclusion**

Ce chapitre a présenté un panorama du réseau d'accès optique et de son évolution. Dans un premier temps nous avons présenté de manière générale l'état de l'art du réseau d'accès optique, plusieurs techniques ont été décrites qui consistent à amener la fibre optique au plus près de l'utilisateur tel que FTTH (Fiber To The Home) et les différentes architectures (P2P et P2MP). Nous avons défini ainsi le réseau optique passif (PON) qui permet une minimisation des infrastructures fibres. Une description succincte des standards PON existants ainsi que l'évolution vers les futurs standards a été abordée.

---

## **CHAPITRE II**

### **LA RADIOSUR FIBRE (ROF)**

---

## **II.1 Introduction**

Les réseaux d'accès sans fil devront répondre à des exigences d'usage telles que la mobilité, c'est-à-dire la possibilité de se connecter au réseau à partir d'un terminal mobile, sans avoir recours à un câble, ce qui assure une flexibilité et une facilité d'utilisation. L'utilisation de porteuses radiofréquences permettront transporter des flux de données suffisamment rapides. Afin de relier les différents points d'accès radio, une solution prometteuse consiste à utiliser une infrastructure optique. Cette solution se base sur des technologies hybrides dites radio sur fibre (RoF : radio on fiber) qui utilisent de manière avantageuse un support de transmission optique capable de distribuer des signaux radiofréquence (RF) à des débits au-delà de 1 Gbit/s par utilisateur. Par ailleurs, leur déploiement est à la fois rapide et flexible et d'un coût bien moindre que celui de la fibre ou du câble jusque chez le client puisque cette technique fait l'économie d'un raccordement physique de l'abonné dans des sites où l'installation des fibres est impossible.

Ce chapitre définit dans un premier temps la notion et les avantages de la technologie radio sur fibre, ainsi les différentes techniques utilisées pour sa transmission, puis nous allons définir les techniques de modulation utilisées dans la radio sur fibre. Dans la deuxième partie, nous allons présenter les composants optoélectronique d'un lien ROF complet et les limites et les sources de bruit liées à l'optique et à la radio, et enfin les applications de la RoF.

## **II.2 La technologie Radio sur Fibre RoF**

### **II.2.1 Définition de RoF**

Le terme « Radio-sur-Fibre » (RoF) fait référence à des techniques de génération et/ou de transmission de signaux radiofréquences (RF) par voie optique. La technique de transmission RoF est basée principalement sur la modulation d'une porteuse optique par au moins un signal RF portant lui-même des données à transmettre. Ainsi, les technologies Radio-sur-Fibre s'appuient sur des technologies de transmission par fibre optique pour distribuer des signaux RF entre une station centrale (CS ou Central Station) et des modules d'antennes distribués (Remote Antenna Units : RAUs ou Stations de Bases (SB ou Base Station). Ces dernières communiquent par signaux radio avec les stations des abonnés (MS : Mobile Station) [12].



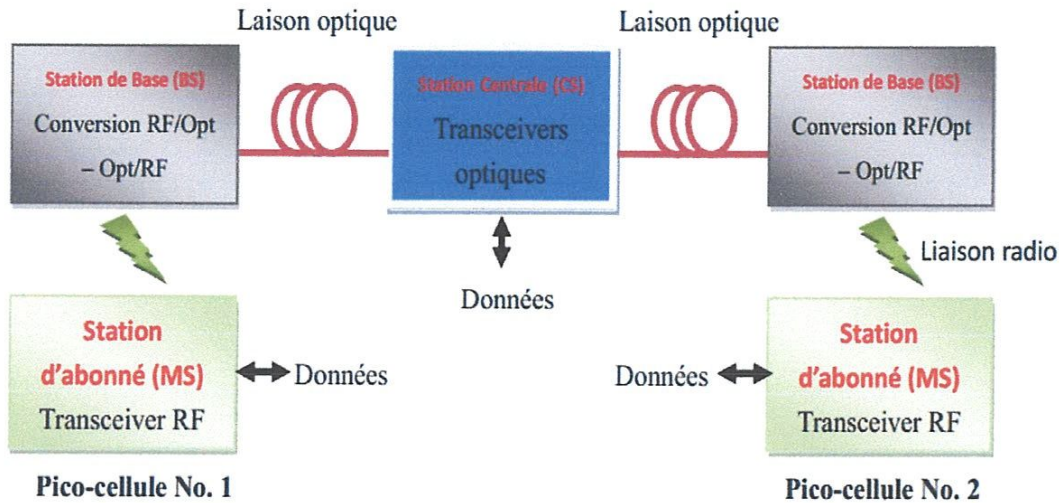


Figure II.1 : Synoptique d'un système radio sur fibre classique

L'utilisation du signal radio signifie que la liaison est de nature analogique, et son rendement doit être caractérisé en tant que tel.

La fréquence radio (RF) est l'étape de conversion vers le haut débit. Cette fréquence est appliquée à la liaison optique à l'aide du convertisseur électronique-optique (généralement un type de transmetteur laser). A l'extrémité de la réception, le signal RF est récupéré à partir du convertisseur optique-électronique (photodiode).

Dans les systèmes de communication à bande étroite et les réseaux d'accès sans fil, les fonctions de traitement de signaux RF, telles que la modulation et le multiplexage, sont exécutés au niveau du BS et immédiatement intégrées dans le module d'antenne. La technologie RoF rend possible la centralisation des fonctions de traitement du signal RF dans un emplacement partagé en utilisant la fibre optique afin de distribuer les signaux RF comme le montre la Figure II.1. Ainsi, la station de base dans un système RoF devient beaucoup plus simple par rapport au système traditionnel : l'adaptation aux niveaux désirés et la conversion entre le signal RF et le signal optique sont ses fonctionnalités. L'émission/réception des données en bande de base, le traitement du signal et les autres fonctions sont tous centralisés dans la station centrale.

## II.2.2 Avantages de la technique radio sur fibre

La technique radio sur fibre présente les avantages suivants : [13]

☞ **Faible atténuation:** La distribution des signaux RF sous forme électrique, en espace libre ou par le biais de lignes de transport est coûteuse et peut être fortement limitée en termes de portée. En effet, les pertes de propagation en espace libre sont d'autant plus importantes que la fréquence de la porteuse radio est élevée (les pertes sont inversement proportionnelles à la longueur d'onde). Dans les lignes de transmission, l'impédance augmente avec la fréquence impliquant des pertes d'autant plus importantes que la fréquence est élevée. Par conséquent, la distribution des signaux radio à haute fréquence sous forme électrique sur des longues distances nécessite des équipements de régénération coûteux. Une solution à ce problème consiste à distribuer optiquement les signaux en bande de base ou à des fréquences intermédiaires (FI) du CS (Central Station) vers la BS (Base Station). Toutefois, étant donné que la fibre optique offre une très faible perte, la technologie RoF peut être utilisée pour obtenir à la fois une distribution de signaux sur de longues distances.

☞ **Large bande passante:** L'énorme bande passante offerte par les fibres optiques a d'autres avantages en dehors de la grande capacité de transmission des signaux RF. La grande bande passante permet une haute vitesse de traitement du signal ce qui est plus difficile, voir impossible, de faire en électronique. Certaines fonctions nécessaires au traitement des signaux RF telles que le filtrage, le mélange pour la conversion de fréquence peuvent être mises en œuvre dans le domaine optique. L'utilisation de l'énorme bande passante offerte par les fibres optiques est gravement entravée par la limitation de la largeur de bande des systèmes électroniques, qui sont les principales sources et récepteurs de transmission de données.

☞ **Immunité aux interférences des ondes RF:** L'immunité aux interférences électromagnétiques est un avantage qu'offrent les fibres optiques, en particulier vis-à-vis des micro-ondes et aux ondes millimétriques. Il en est ainsi parce que les signaux sont transmis sous forme lumineuse à travers la fibre optique. En raison de cette immunité, les fibres sont préférables aux câbles électriques, même pour de courtes connexions, car elle assure la confidentialité et la sécurité [14].

☞ **Réduction de la consommation d'énergie:** La réduction de la consommation d'énergie est une conséquence de la simplification des BS avec des équipements réduits rendue possible par la centralisation des fonctions complexes.

La réduction de la consommation d'énergie au niveau des BS est particulièrement avantageuse dans la mesure où celle-ci doit être parfois placée dans des endroits reculés et



ne peut pas être alimentée par le réseau électrique (recours à l'utilisation de sources d'énergies renouvelable telles que les cellules photovoltaïques).

☞ **Facilité d'installation et d'entretien:** Selon la technologie RoF, les dispositifs complexes et coûteux sont maintenus au niveau de la station de contrôle (CS) permettant de simplifier au maximum l'architecture des stations de base (BS). Dans les cas les plus simples, la BS comprend juste un photo-détecteur, un amplificateur RF et une antenne. Les équipements de modulation et de multiplexage sont conservés au niveau du CS de manière à être avantageusement partagés par plusieurs BS. Ce dispositif conduit à des plus petits et plus légers BS réduisant effectivement le coût d'installation et d'entretien du système.

☞ **Une possibilité de multi-services et multi-opérateurs :** La technologie RoF offre une souplesse opérationnelle. En fonction de la technique de génération des signaux RF, la distribution des signaux peut être faite d'une manière transparente en allouant par exemple des longueurs d'ondes à chaque technologie ou à chaque opérateur. Ainsi, le système RoF peut être partagé entre plusieurs opérateurs pour distribuer une pluralité de services. Cette utilisation « multi-opérateurs » et « multiservices » permettant à chaque opérateur de disposer d'un nombre de longueurs d'ondes, entraîne d'énormes économies.

### **II.3 Systèmes de transport des signaux RF, IF, bande de base**

Les systèmes radio-sur-fibre sont généralement classés selon trois principaux types d'architecture de transport: Radio Fréquence (RF), fréquence intermédiaire (IF) et bande de base. Le choix de l'architecture détermine le matériel nécessaire au niveau de la BS et sa complexité. Un système duplex complet peut utiliser des architectures de transport différentes sur la liaison montante et sur la liaison descendante.

#### **II.3.1 Transport de fréquence RF sur fibre**

La solution "radio sur fibre" consiste à transporter directement sur fibre une porteuse optique modulée par un signal radiofréquence contenant les données. La station de base réalise alors uniquement les fonctions de conversion optique/électrique, d'amplification et d'émission hertzienne, évitant le recours à une quelconque conversion montante ou descendante. Une telle configuration présente l'avantage en centralisant la génération des signaux, d'une architecture simple des stations de base. Cette architecture centralisée permet de ne pas multiplier les équipements RF ce qui limite le coût du réseau et autorise de surcroît son évolution [15].



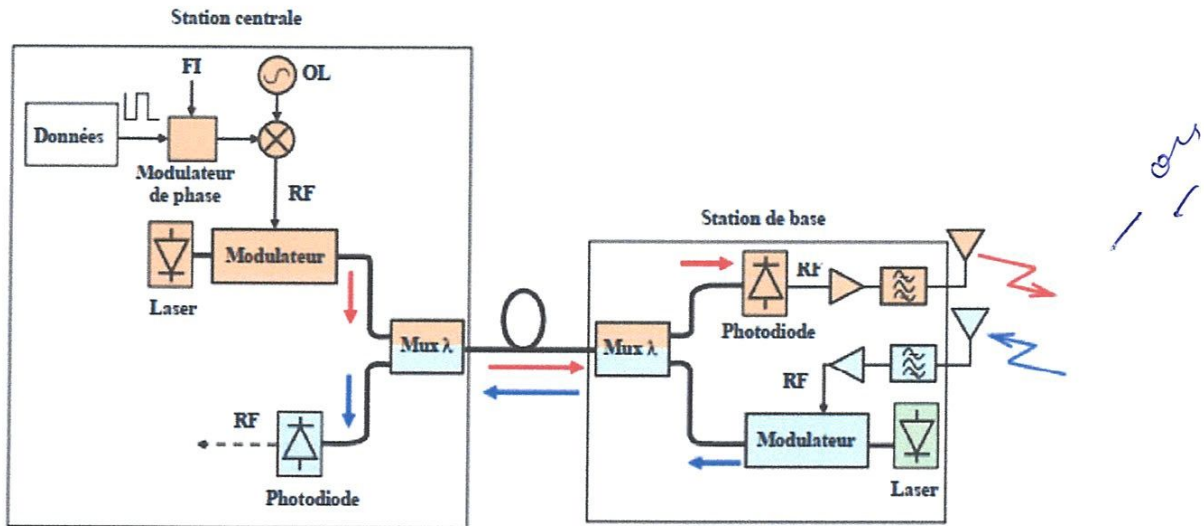


Figure II.2 : Architecture RoF avec transport radio sur fibre optique

Cette approche présente l'avantage que les signaux ne subissent aucune transposition de fréquence au niveau des stations de bases qui bénéficient d'une architecture simple nécessitant uniquement des conversions électro-optique et opto-électrique, amplification RF, et émission/réception RF. En outre, un contrôle centralisé de traitement des signaux permet de faciliter l'évolutivité du système.

Toutefois, la transmission directe des signaux RF s'avère d'autant plus difficile que la fréquence RF est élevée en raison des effets néfastes de la dispersion chromatique. Par ailleurs, dans le domaine millimétrique (30-300 GHz), les prix des composants optoélectroniques demeurent élevés. Des photodiodes à large bande passante avec un bon rendement de conversion sont nécessaires tant au niveau du CS que de chaque BS. La modulation externe est effectuée à l'aide des modulateurs ultra-rapides permettant d'atteindre des vitesses de modulation élevées ( $> 40$  GHz) comme le modulateur MachZehnder (MZM) ou le modulateur à électro-absorption (EAM) [13].

### II.3.2 Transport de fréquence IF-sur-fibre

L'architecture IF-sur-Fibre permet le transport des signaux RF en réduisant fortement l'effet de la dispersion chromatique des fibres par le fait de transmettre des signaux radio sur fibre par le biais des fréquences intermédiaires (IF) avec une transposition de fréquence effectuée à la BS comme le montre la Figure II.3.

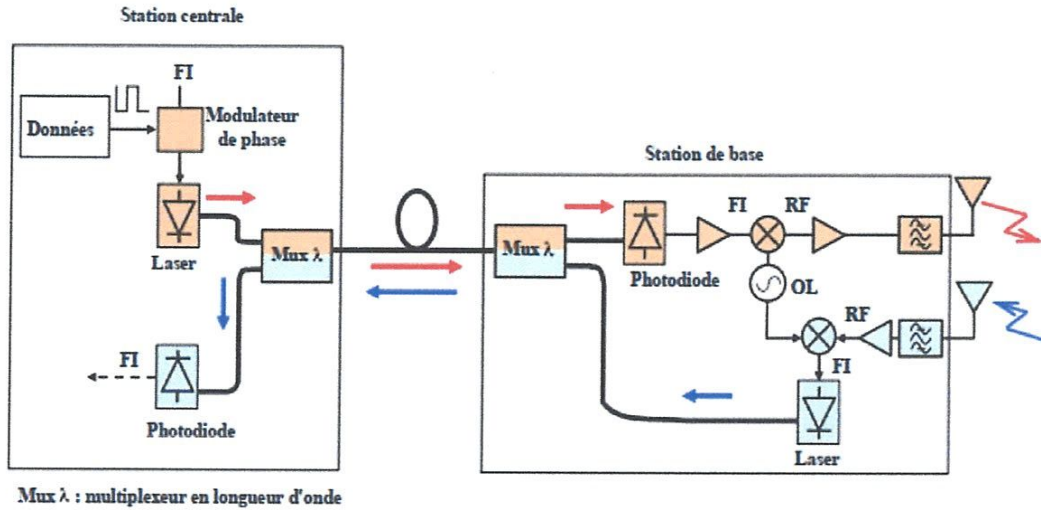


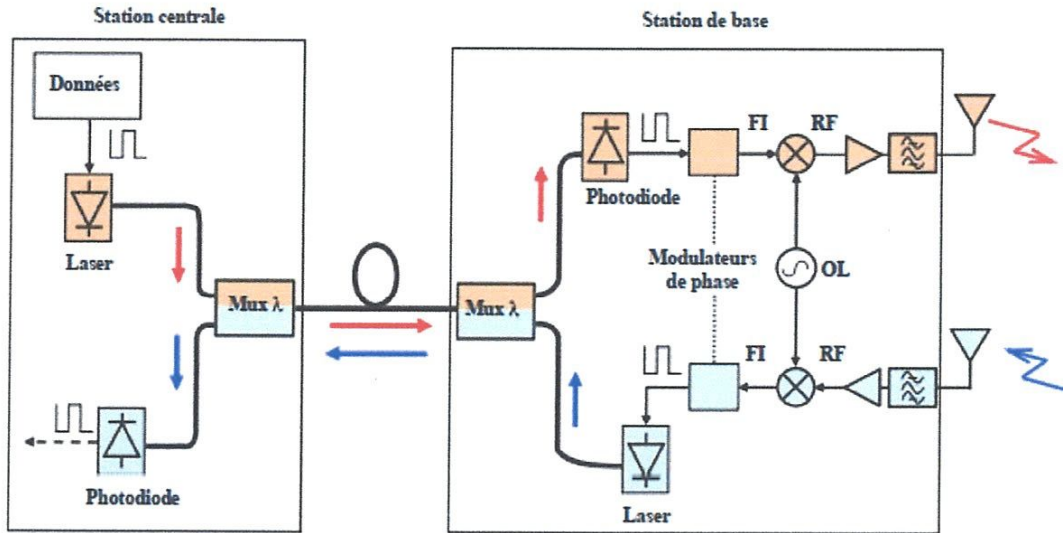
Figure II.3 : Architecture RoF avec transport IF sur fibre optique.

L'utilisation d'une fréquence de modulation intermédiaire dans le cas du transport IF-sur-Fibre permet avantageusement de réduire de manière significative les effets de la dispersion chromatique en comparaison avec le cas du transport RF-sur-fibre. Un autre avantage de ce système est d'offrir une efficacité en termes de coût, puisqu'il permet d'intégrer des composants électroniques à bas coût largement disponibles sur le marché.

Toutefois, cette architecture reste compliquée par rapport à l'architecture RF-sur-Fibre, dans la mesure où des oscillateurs locaux et des mélangeurs sont nécessaires au niveau de chaque BS pour effectuer les transpositions de fréquence, ces oscillateurs pouvant être partagés entre les liens montant et descendant [13].

### II.3.3 Transport du signal en bande de base

Une première architecture des systèmes RoF (Figure II.4) consiste à moduler directement de laser avec un signal électrique en bande de base et à acheminer ensuite le signal optique résultant ("signal optique en bande de base") par fibre depuis la station centrale jusqu'à la station de base. Dès lors, l'émission radio ne peut se faire qu'après transposition du signal électrique à la fréquence souhaitée. Symétriquement le signal radio montant peut être transposé en bande de base dès la station de base et ainsi venir moduler directement un laser pour la transmission optique vers la station centrale.



Mux  $\lambda$  : Multiplexeur en longueur d'onde

Figure II.4 : Architecture RoF avec transport en bande de base sur fibre optique.

L'avantage de cette technique est qu'elle permet de réduire considérablement les effets de la dispersion du fait d'une transmission en bande de base, mais elle exige des équipements électro-optiques à haute fréquence coûteux (mélangeurs) [15].

#### II.4 Les techniques de modulation pour générer des signaux RF sur la fibre

Il existe deux façons de faire la modulation de la porteuse optique. Une première solution dite « *modulation directe* » est de laisser le signal directement moduler la porteuse optique d'une source de lumière (i.e. laser). Une deuxième solution dite « *modulation externe* » consiste à utiliser un modulateur externe (Mach-Zehnder (MZM)) pour moduler la porteuse optique issue d'une source lumineuse. Dans les deux cas, le signal modulant l'intensité de la porteuse optique est le signal destiné à être transmis.

**La modulation directe** consiste à moduler le courant d'alimentation de la diode laser, ce qui induit une modulation de l'intensité lumineuse émise. La puissance optique émise par le laser à semi-conducteur est une fonction croissante du courant électrique d'alimentation du laser. Cette fonction est, en première approximation, linéaire au-dessus du courant de seuil du laser (courant d'alimentation minimum pour permettre l'effet laser). Il est donc possible, en faisant varier le courant d'alimentation du laser, de moduler la puissance optique émise : c'est le principe de la modulation directe. Cette technique ne permet pas de mettre en œuvre des formats de modulation complexes utilisant la phase



optique. Elle permet par contre d'émettre des signaux numériques en « tout ou rien », dans lesquels une forte puissance optique est associée au symbole "1" et une faible puissance optique au symbole "0" [10].

La modulation directe connaît beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en œuvre. Mais elle comporte aussi des limites. La bande passante est satisfaisante jusqu'à 5GHz et les lasers en sont souvent la cause. Leur temps de réaction, les oscillations, le bruit créé font que la modulation directe engendre pour les hauts et très hauts débits certaines dégradations sur le signal optique modulé. A cela, la modulation externe constitue un remède [16].

**La modulation externe** consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents dans le signal optique. La modulation externe est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable qui est le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe  $v(t)$ , modulée et représentative de l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie. Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon  $v(t)$  [17].

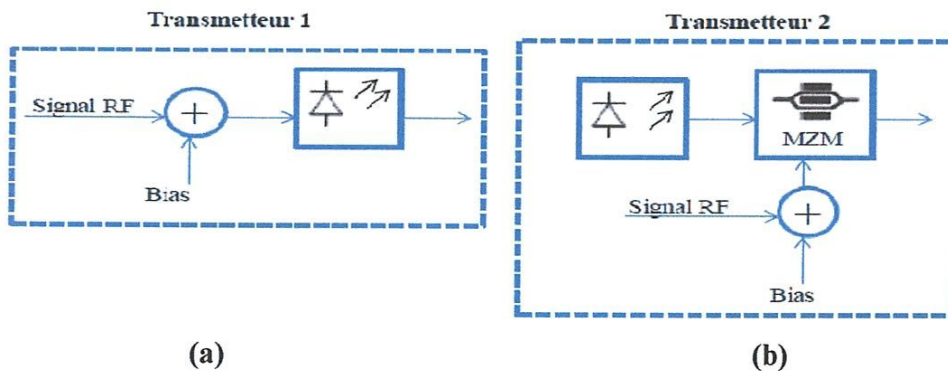


Figure II.5 : Les techniques de modulations directe(a) et externe(b) du signal optique

## II.5 Les composants optoélectronique d'une liaison RoF

Comme tout système de communication, les composants d'un lien complet doit contenir: un émetteur (l'émetteur-modulateur «émetteur + modulateur externe les cas échéant »), un canal de transmission et un récepteur.

### II.5.1 Les diodes laser DL

La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, elle est caractérisé par : une faible largeur spectrale et une bande passante importante. Il existe des lasers multimodes (au sens des résonances multiples) et des lasers monomodes. Ces derniers sont multimodes (FP : Fabry Pérot laser) mais intègrent un filtre de Bragg (DFB: Distributed Feedback laser, et DBR: Distributed Bragg Reflector laser) pour sélectionner un mode parmi tous, ces deux principaux types de structure laser sont largement considérées dans les liaisons RoF [12].

Dans son principe, le laser à semi-conducteur est basé sur le transfert d'électrons entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction. L'inversion de population entre ces deux bandes est obtenue par la polarisation d'une jonction, ce qui engendre le processus d'émission stimulée dans cette zone active.

Un résonateur optique de type Fabry Pérot est constitué de deux miroirs plans parallèles et semi-réfléchissants qui sont séparés d'une distance  $L$ , entre lesquels les ondes lumineuses effectuent des allers-retours. La valeur de l'indice du semi-conducteur est de l'ordre de 3,5, ce qui permet d'obtenir des coefficients de réflexions à l'interface semi-conducteur/air d'environ 30%. Ceci permet d'avoir une amplification dans le résonateur plus accrue, et ainsi de compenser les pertes dues à l'absorption. De cette manière, les pertes intra-cavités peuvent être compensées par le milieu amplificateur et ainsi, nous pouvons obtenir l'effet Laser [18].

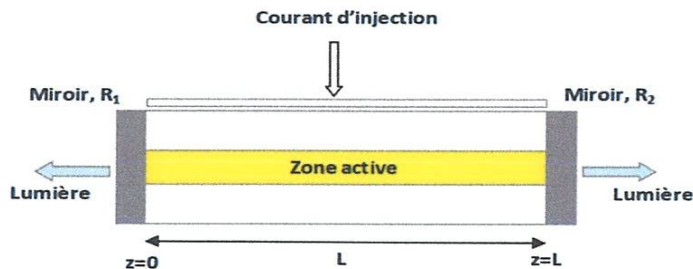


Figure II.6 : Structure d'une diode laser à une cavité de Fabry-Pérot.

La puissance de sortie de la diode laser dépend du courant de polarisation suivant la caractéristique représentée sur la Figure II.7. Le courant de seuil  $I_{th}$  renseigne sur la frontière entre l'émission spontanée et l'effet laser par émission stimulée. La modulation du courant de polarisation produit une modulation identique sur la puissance optique dont la fréquence maximale est déterminée par la dynamique des porteurs.

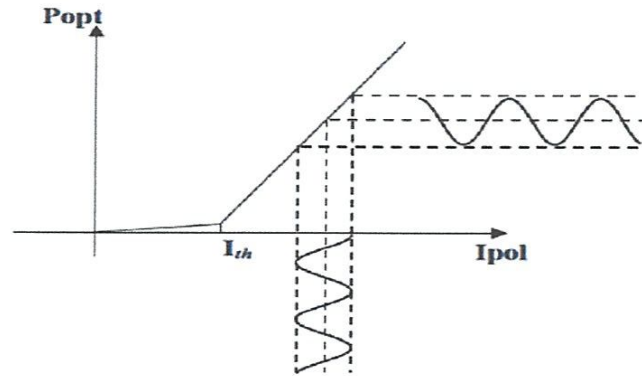


Figure II.7: Caractéristique statique P-I d'une diode laser.

La pente de la courbe statique représente le rendement de la diode laser. Il renseigne aussi sur le rendement quantique externe de la diode laser à partir de la relation suivante :

$$P_{opt} = \eta_{LI}(I_{pol} - I_{th}) = \eta \frac{h\nu}{q} (I_{pol} - I_{th}) \quad (\text{eq : II.1})$$

Où  $\eta$  est le rendement quantique externe,  $q$  est la charge de l'électron,  $h\nu$  est l'énergie du photon de fréquence  $\nu$ ,  $h$  est la constante de Planck.

### II.5.2 Les Modulateurs optiques : Les Modulateurs Mach-Zehnder (MZM) :

Plusieurs types de modulateurs sont disponibles. Actuellement, la technologie de modulation externe la plus utilisée est les modulateurs de Mach-Zehnder (MZ) sur niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) [19].

Le MZM est un interféromètre optique ayant deux branches de longueur équivalente comme illustré sur la Figure II.8. Le contrôle de déphasage entre ces deux branches permet ainsi la modulation de l'intensité du signal optique appliqué à son entrée. En effet, le déphasage entre les deux branches dépend de leur longueur [20].

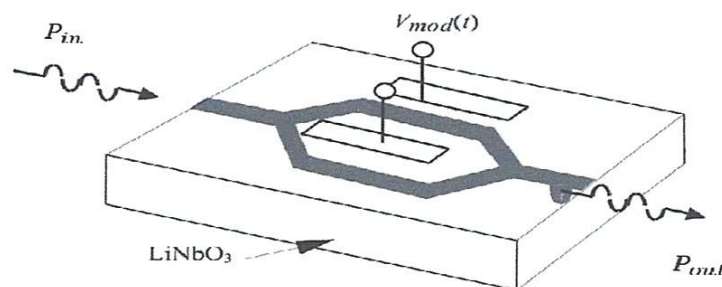


Figure II.8 : Principe du modulateur optique Mach Zehnder (MZM).



Une onde optique incidente d'intensité optique est divisée en deux faisceaux par un coupleur 50/50 et sont guidés dans les deux bras de l'interféromètre. L'application d'un champ électrique sur un des deux bras introduit une variation de la phase du signal optique par effet électro-optique "Pockels". A la sortie du MZM, un second coupleur permet la combinaison des deux ondes qui interfèrent mutuellement. La différence de phase entre les deux ondes permet d'avoir des interférences constructives ou destructives en fonction de sa valeur. Par conséquent, le signal optique est modulé en intensité en sortie du MZM et sa puissance optique est donnée par:

$$P_{out}(t) = A \frac{P_{in}}{2} (1 + \cos(\varphi(t))) \quad (\text{eq :II.2})$$

Avec les pertes de couplage optique entre le laser et le MZM et ( $V_{\pi}$ ) la différence de phase entre les ondes propageant dans les deux branches du MZM.

La caractéristique DC du MZM idéal en fonction de la tension est représentée sur la Figure II.9. La tension représente la valeur nécessaire pour obtenir un déphasage de  $\pi$  entre les deux faisceaux. Les points de polarisation donnant une transmission minimale ou maximale de la puissance optique sont ainsi relevés. La modulation de la tension de polarisation permet de moduler le déphasage entre les deux bras et ainsi l'intensité du signal recombinaison. Le gain maximum est obtenu pour le point de polarisation situé au milieu de la zone linéaire de cette caractéristique correspondant à une tension de polarisation de  $V_{\pi}/2$  sur la figure. Par contre, le choix du point de la transmission minimale permet l'utilisation de la technique de suppression de la porteuse optique [21].

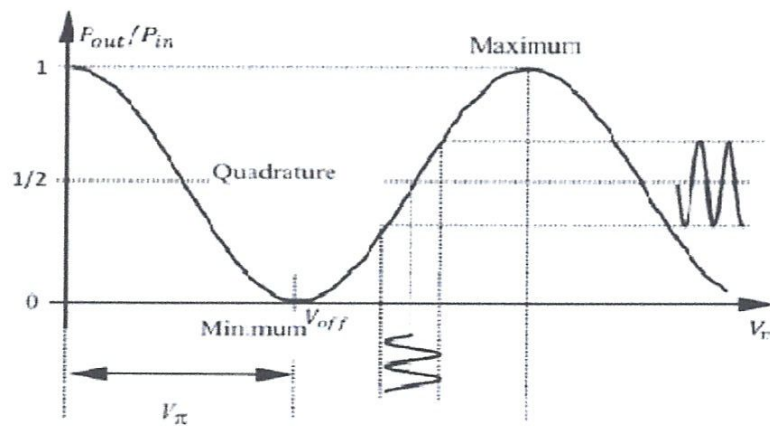


Figure II.9: Caractéristique DC du modulateur MZM.

### II.5.3 L'élément de connexion : la fibre optique

La fibre optique représente le canal idéal pour transmettre les signaux utiles sous forme de lumière sur des grandes distances grâce à ses faibles pertes (près de 0,2 dB/km aux longueurs d'onde télécom autour de 1,55  $\mu\text{m}$  pour des fibres en silice) [22].

Dans les liaisons Radio sur Fibre, Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur et la longueur d'onde utilisée les fibres optiques monomodes (SMF pour Single Mode Fiber) et multimodes (MMF pour Multi Mode Fiber), il existe deux familles la fibre multimode à saut d'indice et La fibre multimode à gradient d'indice. Les fibres multimodes sont réservées pour des applications sur des courtes distances, et on les utilise dans les réseaux locaux. Les fibres multimodes en verre, déployées ces dernières années, sont de type à gradient d'indice ; elles ont aussi été réalisées à base de polymères. Les fibres multimodes en polymère ont une atténuation plus élevée que celle en verre, et ne sont guère utilisées que sur de très courte distance. Quoique toutes les fibres présentent un intérêt pour la RoF, on constate que la plupart des technologies Radio sur Fibre font appel à l'utilisation de la fibre monomodes [21].

### II.5.4 Le récepteur : Photodiode

La photodiode est un dispositif essentiel du récepteur qui permet de convertir un signal optique en un signal électrique. Le photodétecteur le plus utilisé est la photodiode PIN, constituée par trois zones: une zone intrinsèque intercalée entre une région fortement dopée P et une autre fortement dopée N [23].

Le principe d'une photodiode est de convertir une puissance optique en libérant des électrons dans la jonction P-N de la photodiode.

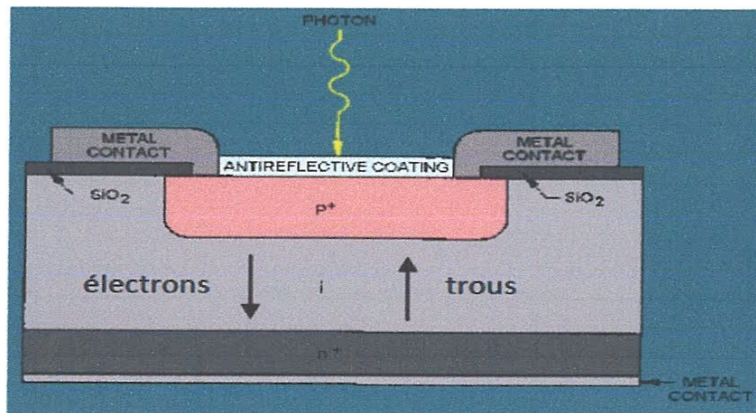


Figure II.10 : Structure d'un photodétecteur PIN



Mathématiquement, le courant photo-généré en sortie de la photodiode est proportionnel à la puissance optique selon la relation :

$$I_{ph} = S \times P_{opt} + I_{obs} \quad (\text{eq : II.3})$$

Où  $I_{obs}$  est le courant d'obscurité circulant dans la jonction en l'absence d'éclairement.

Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode PIN sont la sensibilité, et la longueur d'onde de coupure.

- la sensibilité dépend du rendement, elle varie selon le coefficient d'absorption du matériau, et selon la largeur de la zone intrinsèque. Le rendement quantique et la sensibilité sont reliés par les relations suivantes, avec  $e$  représentant la charge élémentaire de l'électron,  $h$  la constante de Planck,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $c$  la vitesse de la lumière :

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \eta \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad \text{avec} \quad \eta = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/h \cdot \nu} \quad (\text{eq II.4})$$

- Longueur d'onde de coupure correspond à la longueur d'onde maximale  $\lambda_c$  qui peut être absorbé par un matériau donné.

$\lambda \leq \lambda_c \rightarrow$  Photon incident absorbé (création d'une paires électron-trou).

$\lambda > \lambda_c \rightarrow$  Photon incident non absorbé.

## II.6 Limitations du système RoF

### II.6.1 Limitations du système RoF liées à l'optique

#### II.6.1.1 L'atténuation

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les micro-courbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour les fibres standards des télécommunications dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement. La Figure II.11 montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications [16].





Figure II.11 : L'effet de l'Atténuation

Selon l'atténuation les fibres peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux « fenêtres en longueur d'onde » : les fenêtres 1300 nm et 1500 nm. La fenêtre 800 nm étant pratiquement complètement abandonnée.

La fenêtre à 1300 nm a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne importante d'environ 0,4 dB/km ; mais les composants optoélectroniques à ces longueurs d'onde (lasers et récepteurs) sont peu coûteuses. Elle est utilisée pour les systèmes de télécommunications de courte distance (quelques dizaines de kilomètres) ou de faible capacité.

La fenêtre à 1550 nm a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km ; Elle se divise en trois bandes S, C et L. Elle est utilisée généralement pour les télécommunications longues distances et à haut débit car la faible atténuation dans cette fenêtre permet d'espacer bien davantage les coûteux régénérateurs et/ou amplificateurs nécessaires pour la compensation de l'atténuation dans la fibre de ligne [17].

### II.6.1.2 La dispersion chromatique

La dispersion d'un signal optique correspond à l'étalement temporel de l'impulsion lors de sa transmission dans une fibre, dépend de la longueur d'onde  $\lambda$ . Dans le cas d'un signal issu d'une source émettant sur une raie de largeur  $\delta\lambda$ , ces temps de propagation vont s'étaler sur une certaine durée. Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre symboles est possible. Cet élargissement  $\tau$  se calcule ainsi :

$$\tau = D(ps / nm.km) * L(km) * \Delta\lambda(nm) \quad (\text{eq : II.5})$$

Ou le coefficient de dispersion D chromatique de la fibre, L la longueur de la fibre et  $\Delta\lambda$  la largeur spectrale de la source [16].

### II.2.6.3 La dispersion intermodale

La dispersion intermodale, appelée également distorsion modale, a lieu dans les fibres multimodes. Une fibre est multimode lorsque le diamètre du cœur est grand devant la longueur d'onde. Dans les fibres multimodes, chaque mode a une vitesse de propagation différente. Lors de l'injection d'une longueur d'onde dans une fibre multimode, cette longueur d'onde excite un grand nombre de modes. Chaque mode correspond à un trajet différent dans la fibre et donc à un temps de propagation différent. C'est la différence de trajet entre le trajet le plus court et le trajet le plus long qui va créer des interférences entre les modes et ainsi limiter la bande passante de la fibre multimode [24].

## II.6.2 Limitations du système RoF liées à la radio

### II.6.2.1 Pertes liées à la propagation dans l'air

Dans cette section nous présenterons le cas d'une propagation sans multitrajet que nous appellerons de référence car seul le bruit thermique de l'antenne et les pertes liées à la propagation en espace libre limitent la transmission.

Par la suite nous présentons le cas d'une propagation d'un signal radio dans un canal multi-trajet.

#### a. Propagation sans multi-trajet :

La Figure II.12 représente l'architecture de base d'une transmission radio et les principales caractéristiques pour établir un bilan électrique linéaire de la liaison. Une liaison radio est composée d'une antenne d'émission avec un gain  $G_E$ , du canal hertzien avec des pertes  $L$  et d'une antenne de réception avec un gain  $G_R$ , alors que  $L_E$  et  $L_R$  sont les pertes entre d'une part l'émetteur et l'antenne et d'autre part l'antenne et le récepteur[24].

$$P_R = \frac{P_E G_E G_R}{L L_E L_R} \quad (\text{eq : II.6})$$

Avec  $P_R$  la puissance au niveau du récepteur, et  $P_E$  puissance au niveau de l'émetteur.

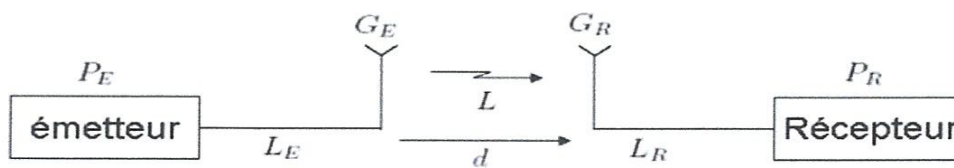


Figure II.12 : Principales caractéristiques d'une chaîne radio

### b. Propagation multi-trajet

Dans la majorité des environnements, le récepteur n'est généralement pas en visibilité directe de l'émetteur. Toutes les ondes qu'il reçoit lui parviennent donc par différents trajets provenant de l'interaction du signal émis avec les nombreux obstacles présents dans l'environnement et, s'il existe, grâce au trajet direct entre l'émetteur et le récepteur. Le signal reçu est donc la somme de nombreux échos (trajets multiples) du signal émis arrivant au récepteur avec une certaine atténuation, un certain déphasage et avec un certain retard, lié à la longueur du trajet. Ces différents échos engendrent au niveau du récepteur des interférences constructives ou destructives qui peuvent conduire à une détérioration importante du signal reçu. Lors de mesure ou de simulation du canal de propagation, deux configurations seront différenciées. Tout d'abord, dans le cas où l'émetteur et le récepteur sont en visibilité directe on parlera de situation LOS (Line Of Sight). A l'inverse lorsque la visibilité est obstruée par n'importe quel obstacle on parlera de situation NLOS (Non Line Of Sight) [15].

#### II.6.2.2 Non linéarité

Comme on utilise des signaux analogiques, il faut dimensionner le système en tenant compte des imperfections des circuits telles que, les non linéarités (point de compression, produits d'intermodulation). Ces effets limitent la dynamique de la Radio sur Fibre [21].

#### II.6.3 Les sources de bruits dans une transmission radio sur fibre

La connaissance des différents bruits dans une transmission permet de connaître les paramètres tels que le rapport signal sur bruit (SNR : *Signal to Noise Ratio*) et le facteur de bruit (NF : *Noise Factor*) qui déterminent la qualité de la liaison.

Les sources de bruits d'une liaison radio sur fibre sont variées. Quatre types de bruits peuvent être définis (**Figure II.13**): Les bruits provenant des amplificateurs avant la transmission, le bruit du laser, les bruits de la photodiode et les bruits provenant des amplificateurs après la réception [24].



Figure II.13 : Chaîne radio sur fibre typique



### II.6.3.1 Le bruit du laser

A un courant donné, la puissance optique fluctue à cause de la nature aléatoire des phénomènes de génération spontanée et recombinaison des paires électrons-trous. Cette fluctuation est gênante dans le cas d'une détection directe lorsque le taux de modulation du laser est faible. Ce bruit d'amplitude des diodes lasers est caractérisé par le bruit d'intensité relatif (RIN, Relative Intensity Noise) défini par l'équation ( II.7) comme le rapport entre la densité spectrale des fluctuations quadratiques de la puissance optique ( $\langle\langle\Delta P^2(f)\rangle\rangle$ ) et le carré de la puissance optique moyenne ( $P^2$ ). Le RIN est souvent décrit en dB dans une bande fréquentielle de mesure  $\Delta f$  [24].

$$RIN = \frac{\langle\langle\Delta P^2(f)\rangle\rangle}{P^2} \quad (\text{eq : II.7})$$

L'unité est 1/Hz.

En dB l'équation devient :

$$RIN_{dB} = 10 \log \left( \frac{\langle\langle\Delta P^2(f)\rangle\rangle}{P^2} \right) \quad (\text{eq: II.8})$$

L'unité est alors dB/Hz.

### II.6.3.2 Le bruit de la photodiode

Les bruits du photodétecteur (Figure II.14) contiennent :

- Bruit de grenaille ou Schottky (Shot Noise)
- Bruit thermique
- Bruit de courant d'obscurité. On néglige ici le bruit en 1/f

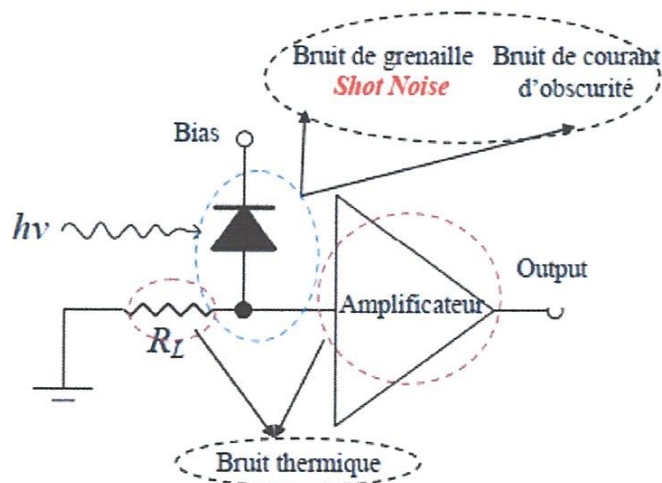


Figure II.14 : Trois types de bruits du photodétecteur

- Le bruit de grenaille est associé au passage des porteurs à travers une barrière de potentiel. Sa densité spectrale de courant de bruit est définie par :

$$i_{ShotNoise} = \sqrt{2qI_{ph}} \quad (\text{eq :II.9})$$

Où  $I_{ph}$  représente le photo-courant.

La densité de bruit de courant d'obscurité est défini par :

$$i_{obs} = \sqrt{2qI_{obs}} \quad (\text{eq: II.10})$$

Où  $I_{obs}$  est le courant moyen d'obscurité

- Le bruit thermique est lié à la résistance de charge. Sa densité spectrale est donnée par l'équation ci-dessous :

$$i_{th} = \sqrt{4kT/R_L} \quad (\text{eq:II.11})$$

Où :

- ✓  $k$  : la constante de Boltzmann,  $1.38 \times 10^{-23} J / K$
- ✓  $T$  : la température en Kelvin
- ✓  $R_L$  : la charge

Le courant de bruit de la photodiode s'écrit :

$$i_{total} = \sqrt{4kT/R_L + 2q(I_{ph} + I_{obs})} \quad (\text{eq: II.12})$$

### II.6.3.3 Les sources de bruit radio

Les sources de bruit dans une transmission radio peuvent avoir des origines différentes. Les différents bruits sont le bruit thermique, et le bruit provenant d'autres sources radios (radioélectrique).

- **Bruit thermique :** Le bruit thermique est provoqué par les différents étages électroniques de la liaison. Il est lié à la fluctuation thermique de la vitesse des porteurs et sa puissance est équivalente à un bruit blanc. L'agitation thermique des électrons dans les résistances se traduit par une tension de bruit de valeur :

$$E^2 = 4k_B \times T \times \Delta F \times R \quad (\text{eq: II.13})$$

Où  $R$  est la valeur de la résistance,  $k_B$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température absolue en °K,  $\Delta F$  est la bande passante du système. La puissance de bruit thermique est[24] :

$$P = k_B \times T \times \Delta F \quad (\text{eq: II.14})$$

▪ **Bruits radioélectriques :** Les bruits radioélectriques sont tous les bruits provenant des systèmes extérieurs au système étudié. Ces bruits peuvent provenir des équipements domestiques ou industriels, ou bien d'un système radio utilisant la même fréquence aux abords du système étudié. Ces sources de bruit sont difficiles à quantifier étant donné qu'elles sont aléatoires et dépendent de l'environnement dans lequel nous nous trouvons. Les origines du bruit radioélectrique extérieur capté par un système de réception radioélectrique sont les suivantes [25]:

- signaux émis par les éclairs (bruit atmosphérique dû à la foudre);
- rayonnements parasites des machines électriques, des équipements électriques et électroniques, des lignes électriques ou bruit des systèmes d'allumage de moteurs à combustion interne (bruit artificiel);
- émissions des gaz atmosphériques et des hydrométéores;
- bruit dû au sol ou aux autres obstacles se trouvant dans le faisceau de l'antenne;
- rayonnements des sources radioélectriques célestes.

## **II.7 Applications et perspectives de la technologie Radio sur Fibre**

Cette section est portée sur les applications de la technologie Radio sur Fibre et ce qu'elle peut apporter aux prochaines générations.

### **II.7.1 Les communications par satellite**

Les communications par satellite constituent deux applications de la technologie RoF: La première qui concerne la distribution des informations aux utilisateurs sur une courte distance (d'inférieurs à 1 km) des liens optiques fonctionnant à des fréquences comprises entre (1 GHz et 15 GHz). L'autre application dans le domaine satellitaire concerne la bande de la distribution des stations terrestres dont les antennes doivent être en dehors d'une zone de contrôle. Grâce à la technologie RoF, les antennes peuvent être situées à plusieurs kilomètres de distance par rapport à la zone de contrôle, avec pour objectif d'améliorer la visibilité du satellite ou de réduire les interférences avec d'autres systèmes terrestres [21].

### **II.7.2 Réseaux cellulaires**

Les réseaux mobiles représentent un domaine d'application important de la technologie RoF. Le nombre toujours croissant d'abonnés mobiles et l'augmentation de la demande des services à large bande passante ont maintenu une pression soutenue sur les réseaux mobiles pour offrir une plus grande capacité. Par conséquent, le trafic mobile (GSM ou UMTS)



peut être efficacement acheminé entre la station de contrôle et la station de base en exploitant les avantages de la fibre optique [13].

### **II.7.3 Communication routière**

L'objectif est de fournir en continu une couverture des réseaux mobiles sur les principaux axes routiers ou ferroviaires. Ceci sera rendu possible par la technique radio sur fibre avec un coût faible et un très grand nombre de BS le long des voies, Les fréquences entre 63-64 GHz et 76-77 GHz sont destinées pour ce service en Europe [12].

### **II.7.4 Réseaux d'accès sans fil**

Comme les terminaux mobiles deviennent de plus en plus répandus, les réseaux d'accès sans fil à haut débit évolueront vers une demande haute débit. La technique radio sur fibre est une solution de manière à répondre à cette demande en utilisant la conception de réseaux pico-cellulaires afin d'optimiser la couverture tout en transmettant les signaux au plus près de l'utilisateur.

### **II.7.5 Radio sur Fibre pour les futurs réseaux d'accès optiques**

L'intérêt de la technologie radio sur fibre, pour les réseaux d'accès optiques PON, est de pouvoir partager les infrastructures optiques déjà déployées. Elles permettent d'une part de proposer des services radio aux utilisateurs sans devoir déployer d'autres réseaux. D'autre part le partage des coûts du déploiement d'un réseau optique entre les systèmes optique et les systèmes radio est possible. Ces architectures permettent de regrouper toutes les fonctionnalités au central, de simplifier les stations de bases déportées, et de pouvoir ajouter des services sur une architecture déjà disponible pour le réseau d'accès fixe, par la superposition de longueurs d'ondes sur le PON, montre qu'on assiste actuellement à un renouvellement de l'intérêt porté à ce domaine prometteur des télécommunications radio et optiques.

Le troisième chapitre mis l'accent sur Les recherches en cours porte sur de nouvelles applications de la RoF (intégration de réseaux radio dans le PON).

## **II.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude sur le système Radio sur Fibre, les techniques de transport d'un signal RoF et les composants optoélectroniques utilisés, les limites de cette techniques liées à l'optiques et à la partie radio, le concept de cette technologie ainsi que son application.

---

**CHAPITRE III**  
**INTEGRATION DU SYSTEME ROF**  
**DANS RESEAU OPTIQUE**  
**PASSIVE**

---

### III.1 Introduction

Le déploiement de systèmes sans fil, et l'augmentation des abonnés au réseau FTTH de type PON poussent les futurs réseaux d'accès large bande NGPON appelé *Fi-Wi* (Fiber-Wireless) à prendre en charge les technologies câblées et sans fil. Il nécessite un réseau de communication de données qui utilise la flexibilité et la mobilité de la technologie sans fil, tout en garantissant la bande passante, la fiabilité et la sécurité sont au maximum. Par conséquent, dans le cadre de ce chapitre, nous introduisons l'intégration de la technologie Radio sur Fibre (RoF) comme un réseau sans fil dans les réseaux optiques passifs avec le multiplexage WDM (WDM-PON) pour une infrastructure de futur réseau d'accès.

Nous allons tout d'abord aborder les futurs réseaux d'accès large bande *Fi-Wi*, et le déploiement d'un réseau d'accès optique PON entre les systèmes optiques et les systèmes radio RF partageant la même infrastructure optique. On présentera par la suite, un schéma générale du système RoF-WDM-PON et les différentes possibilités d'architectures d'implantation RoF dans le réseau de distribution optique ODN (Optical distribution network) du PON, et enfin, une application de la technologie RoF comme un réseau d'accès sans fil de type WiMax, ainsi que les techniques de génération du signal RF utilisés sont choisis et discutées, l'architecture proposée est également montrée.

### III.2 Les réseaux d'accès large bande Fiber-Wireless (*Fi-Wi*)

L'intérêt de la technologie Radio sur Fibre RoF, pour les réseaux d'accès optiques, est de pouvoir partager les infrastructures optiques déjà déployées. Elles permettent d'une part de proposer des services radio aux utilisateurs sans devoir déployer d'autres réseaux. D'autre part le partage des coûts du déploiement d'un réseau optique entre les systèmes optiques et les systèmes radio est possible. La figure suivante montre un exemple de déploiement du futur réseau d'accès large bande *Fi-Wi* [26].

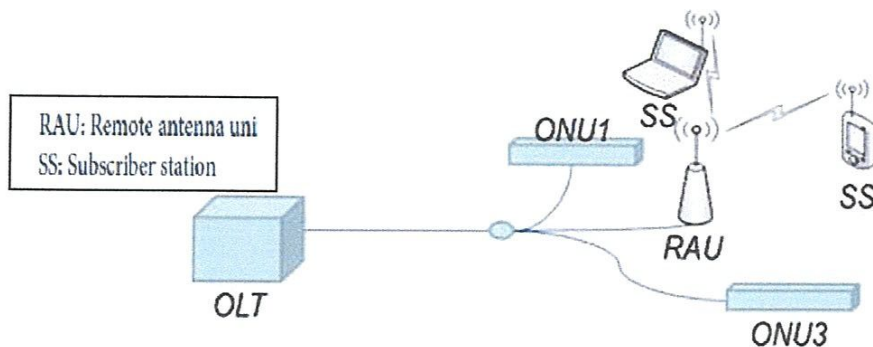


Figure III.1 : Architecture du réseau d'accès *Fi-Wi* : PON et son extension sans fil RAU.



Les caractéristiques des réseaux d'accès à large bande *Fi-Wi* nous attirent de concevoir une nouvelle architecture d'accès avec la capacité de fournir une connectivité et une qualité de service QoS (quality of services) de bout en bout pour les abonnés sans fil et optiques. Certaines des caractéristiques des réseaux d'accès *Fi-Wi* sont de réduire les coûts et augmente la flexibilité, et d'améliorer les performances du réseau en termes de débit, de connectivité et de QoS.

Il existe d'autres moyens de résoudre le problème d'optimisation de la capacité du réseau par rapport au coût du système consiste à utiliser le multiplexage en longueur d'onde sur un réseau optique passif (WDM-PON) pour intégrer le réseau sans fil (RoF).

L'application de WDM dans les réseaux RoF-PON présente de nombreux avantages, y compris la simplification de la topologie du réseau en allouant différentes longueurs d'onde à des BS individuelles, simplifiant la gestion du réseau. Bien qu'un grand nombre de longueurs d'onde soit disponible dans les technologies DWDM. Puisque les réseaux RoF peuvent nécessiter encore plus de BS, les ressources de longueur d'onde devraient être utilisées efficacement. Donc, nous adoptons l'intégration du RoF aux réseaux optique passif (PON) en tant que réseau d'accès à large bande pour transmettre les données du réseau avec le trafic Fibre to the Home / Building / Curb (FTTx) à travers la fibre partagée, et utilisant le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM-PON).

### **III.3 Architecture hybride RoF-WDM-PON**

La Radio sur Fibre (RoF) est une technologie plutôt idéale pour l'intégration de réseaux sans fil et câblés. La raison principale est qu'elle combine les meilleurs attributs de deux méthodologies de communication communes. Une connexion réseau sans fil libère l'utilisateur final des contraintes d'une liaison physique vers un réseau, ce qui est un inconvénient des réseaux de fibres optiques conventionnels. Au fait, les réseaux optiques disposent d'une bande passante pratiquement illimitée pour saturer même les clients les plus gourmands en bande passante où la bande passante pour les réseaux sans fil peut être un goulot d'étranglement important. Ainsi, les réseaux RoF offrent aux clients le meilleur des mondes en leur permettant de maintenir leur mobilité tout en leur fournissant également la bande passante nécessaire pour les applications de communication/divertissement actuelles et futures (HDTV, 3DTV, vidéoconférence, etc.). En outre, les réseaux RoF offrent également une plus grande flexibilité géographique par rapport à l'utilisation de l'une ou l'autre des méthodologies. Ces topologies de réseau pourraient être utiles dans des endroits tels que les grands bâtiments, les métros et les

tunnels où de grandes quantités de personnes sont mobiles, rendant ainsi les connexions physiques impossibles et les réseaux sans fil étant confronté à des difficultés de bande passante et de transfert. La Figure III.2 montre l'architecture hybride RoF-WDM-PON proposée pour être considérée comme une application pour un futur réseau d'accès large bande *Fi-Wi*. Cette architecture est idéalement mise en œuvre dans une nouvelle zone de développement qui nécessite à la fois un système PON et un réseau RoF.

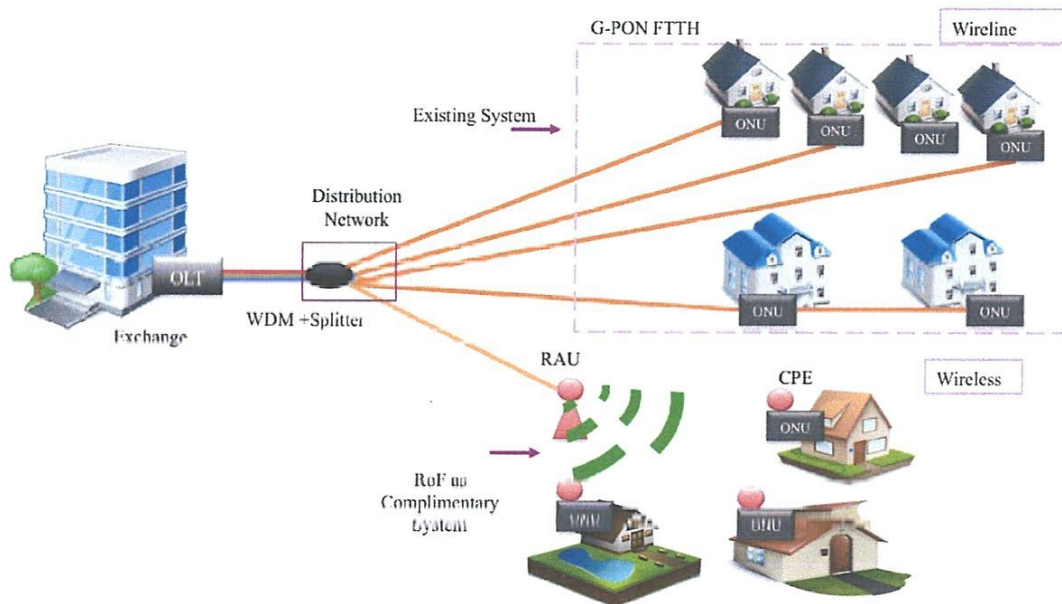


Figure III.2 : l'architecture hybride RoF-WDM-PON

La Figure III.3 montre l'idée de la mise en œuvre de l'architecture RoF-WDM-PON dans une zone résidentielle, il peut être divisé l'architecture en 4 sections. La première section est un terminal de ligne optique (OLT) qui se compose d'un certain nombre de cartes WDM-PON et de cartes RoF dans plusieurs armoires, et un multiplexeur optique WDM. Les cartes WDM-PON et les cartes RoF qui génèrent les longueurs d'onde ( $\lambda_{i,N}$ ) pour le PON, et la longueur d'onde  $\lambda_{RoF}$  pour le RoF, et sont liés ensemble au WDM-MUX. La longueur d'onde de combinaison multiple qui traverse le WDM-MUX est transmise à la deuxième section appelée réseau de distribution (ODN : Optical distribution network). Dans cette section, toute connectivité fibre depuis le WDM-MUX est connectée à un répartiteur optique généralement un coupleur qui fonctionne comme une interface intermédiaire entre la connexion fibre dans l'OLT et la connexion réseau fibre optique de distribution externe. Pour cette architecture, la fibre monomode (SMF) est utilisée pour la connexion entre l'ODN et le coupleur. Le coupleur contient un WDM-DEMUX utilisé pour



séparer les longueurs d'ondes des signaux optiques respectifs en ONUs ou en unités d'antennes distantes (RAU).

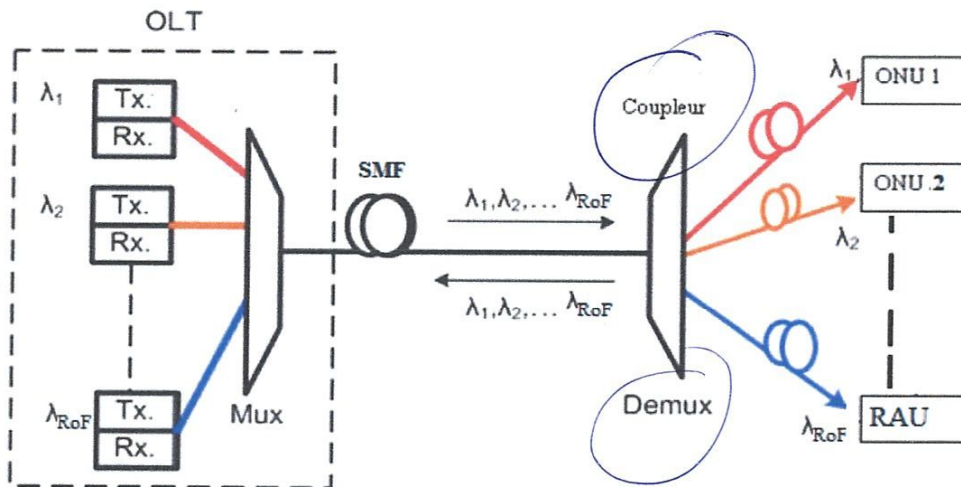


Figure III.3 : Exemple d'architecture radio sur fibre (RoF) couplée avec un réseau d'accès optique (PON)

#### III.4 Les Différentes architectures d'intégration RoF au réseau de distribution optique (ODN) pour les systèmes PON

La figure III.4 montre un réseau de distribution optique conventionnel (ODN) pour les systèmes PON, qui consiste essentiellement en un terminal de ligne optique (OLT), un ODN et certaines unités de réseau optique (ONU). L'ODN est généralement constitué de fibres optiques en tant que ligne de transmission et séparateur (s) en tant que point de distribution comme montrer dans la section précédente.

Pour résoudre le problème géographique, il est souhaitable que la zone ODN soit étendue avec les technologies radio.

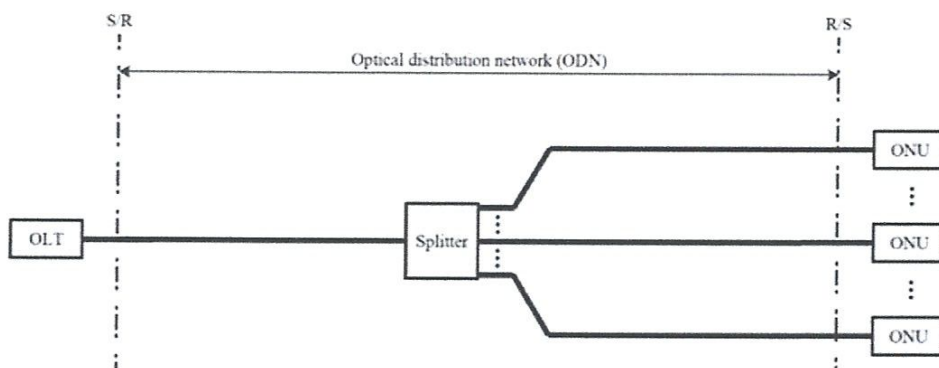


Figure III.4 : Un réseau de distribution optique conventionnel (ODN).



La figure III.5 montre les ODN fondamentaux avec la collaboration radio, dans lesquels une partie d'ODN est remplacée par une liaison radio. La figure III.5 (a) représente l'ODN, dans lequel une fibre de distribution de longueur d'onde est partiellement remplacée par une liaison radio. La figure III.5 (b) représente l'ODN, qui fait bon usage de la nature multidiffusion de la radio à un point de distribution (coupleur, DEMUX). La figure III.5 (c) est un exemple typique de ce cas. La figure III.5 (c) représente l'ODN, dans lequel la fibre partagée est partiellement remplacée par une liaison radio [27].

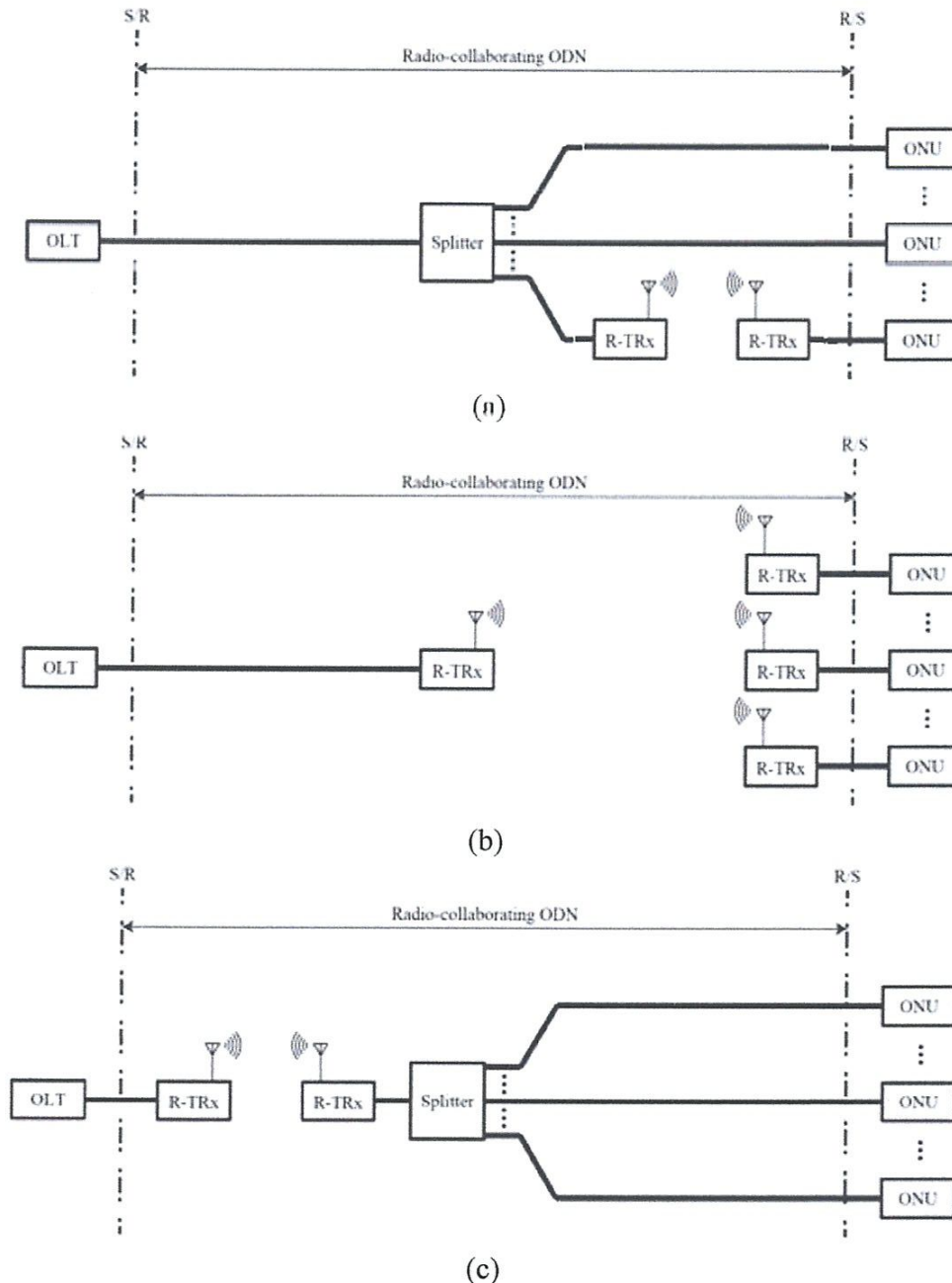


Figure III.5: Les Différentes architectures d'intégration ROF au réseau de distribution optique (ODN)

### III.5 Applications et architectures d'intégration au réseau PON

L'intégration entre les réseaux sans fil à large bande et les réseaux d'accès optique permet une large gamme d'applications et de services pour la connectivité sans fil entre les utilisateurs. Les réseaux RoF ont des architectures différentes selon l'application requise. Cette partie présente un système radio utilisés pour les réseaux d'accès tels que le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) a pour objectif de remplacer les autres technologies à large bande concurrentes du même segment pour devenir une solution pour le dernier kilomètre dans le déploiement des infrastructures d'accès dans des endroits avec des conditions difficile pour les autres technologies ; par exemple là où le câble ou l'ADSL ne seraient pas rentables pour des raisons de coûts de déploiement ou d'entretien. Ainsi, le WiMAX tente de relever le défi en reliant des secteurs ruraux dans les pays en voie de développement tel que des services de sous zones métropolitaines.

#### III.5.1 Réseaux WiMAX

Le WiMAX (ou 802.16-2004) est une norme destinée aux réseaux métropolitains sans fils fixe (WMAN : Wireless Metropolitan Area Network).

Le WiMAX permet de mettre en place une boucle locale radio (figure III.6), c'est-à-dire un lien par ondes radio entre l'utilisateur et le point de collecte, appelé « station de base ». Le point de collecte assure la liaison avec le réseau Internet mondial. Depuis le cœur du réseau et en descendant vers l'utilisateur, nous trouvons les éléments suivants :

- ☞ Une liaison à très haut débit, par exemple par fibre optique ou faisceau hertzien, alimentant l'émetteur WiMAX.
  - ☞ Une antenne WiMAX, ou « station de base », placée sur un point haut (pylône, château d'eau,...) afin d'assurer la couverture maximale.
  - ☞ Entre l'antenne et l'utilisateur, plusieurs kilomètres de transmission sans fil.
- Le WiMAX peut assurer une transmission sans ligne de vue (c'est-à-dire même lorsque des obstacles tels que des arbres se trouvent entre l'émetteur et le récepteur), mais cela a généralement pour effet de réduire notablement la portée.
- ☞ Chez l'abonné, une antenne WiMAX assure la liaison entre l'émetteur de la zone et l'équipement connecté (ordinateur ou autre).

Les bandes prévues dans la norme WiMAX sont très étendues. Cependant, certaines contraintes, inhérentes aux techniques radios, limitent les performances du système et les

usages possibles. La portée, les débits et surtout la nécessité ou non d'être en ligne de vue (LOS : Line Of Sight) dépendent de la bande de fréquence utilisée. WiMAX est défini pour exploiter une gamme de fréquences allant de 2 à 66 GHz. Dans la bande 10 à 66 GHz, les connexions se font en en ligne de vue avec la technique Single Carrier. De 2 à 10 GHz, les connexions peuvent être réalisées avec le non LOS[24].

La meilleure avantage de WiMax est permet une connexion sans fils entre BS et milliers des utilisateurs situe dans la portées de couverture.

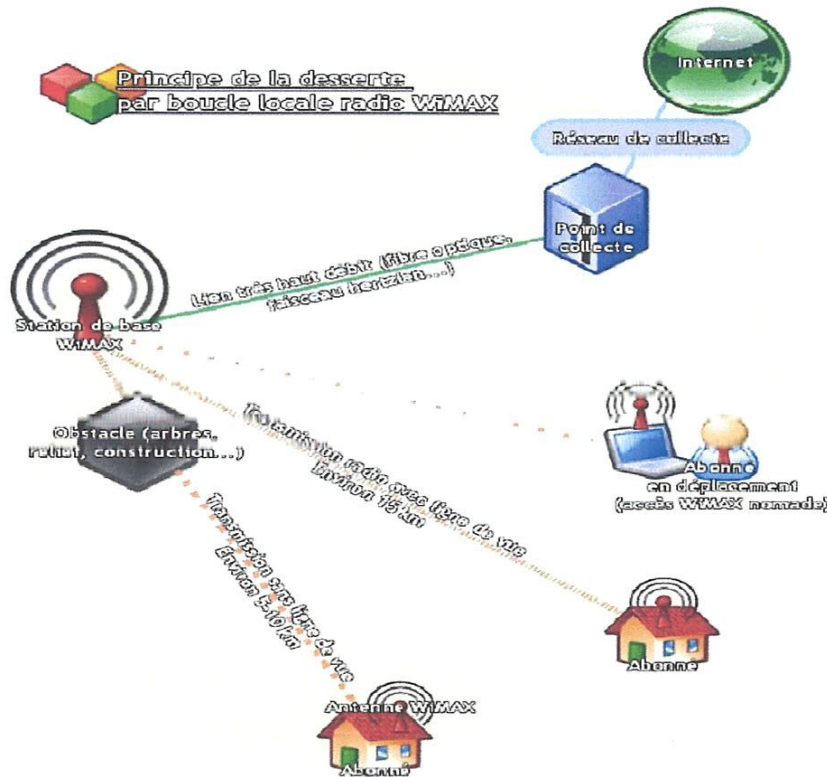


Figure III.6 : Architecture du réseau d'accès WiMAX

### III.5.2 Contraintes liées au déploiement d'un système WiMAX

Les contraintes liées au déploiement d'un système WiMAX pour lesquels la radio sur fibre RoF est une solution, sont :

- ☞ la nécessité de disposer d'un point haut afin d'assurer la meilleure couverture possible.
- ☞ la nécessité de desservir les stations de bases WiMAX par un réseau de collecte (fibre optique, faisceau hertzien...).

Dans le cas du déploiement d'une antenne sur un point haut, la radio sur fibre est une solution pour parcourir une grande distance entre la station de base BS et l'antenne. Les



stations de bases WiMAX doivent être desservies par un réseau de collecte. Dans les zones rurales où le point de collecte peut être éloigné de la zone à couvrir en WiMAX, la technologie radio sur fibre RoF est une solution pour transporter le signal WiMAX. Dans les zones denses, la technologie radio sur fibre peut aussi être utilisée en ajoutant une longueur d'onde sur un système optique de type PON pour transmettre le signal WiMAX (figure III.7).

Donc, nous adoptons la 1<sup>ère</sup> technique d'intégration du RoF aux l'ODN du PON représenté par la figure III.5 (a), dans lequel la fibre de distribution de la longueur d'onde est partiellement remplacée par une liaison radio pour garder l'infrastructure du réseau d'accès PON et le réseau d'accès WiMAX comme un réseau RoF.

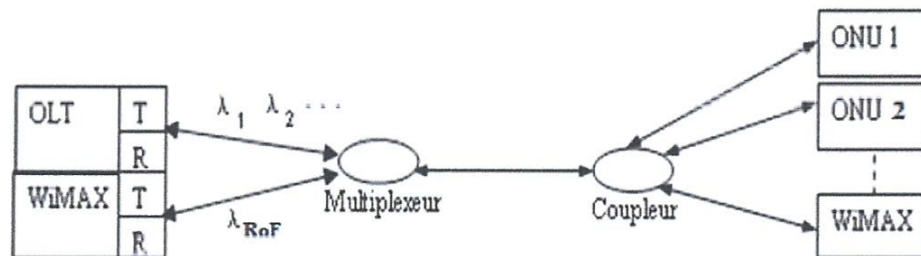


Figure III.7: Architecture WiMAX couplée avec un réseau d'accès optique PON.

### III.5.3 Choix de la technique ROF pour le réseau WiMAX

La plupart des réseaux optiques conventionnels utilisent une transmission de signal numérique. Cependant, le système radio sur fibre (RoF) typique est fondamentalement un système de transmission analogique. Comme nous avons montré dans le deuxième chapitre, la transmission de signaux analogiques nécessite des performances de haute qualité sur la linéarité et la dynamique de la liaison optique. De plus, il existe un certain nombre de distorsions provenant des caractéristiques non linéaires et des limitations de réponse en fréquence associées au laser ou au modulateur externe ainsi que l'effet de la dispersion des fibres. Beaucoup de problèmes associés à la modulation analogique pourraient être contournés s'il est possible de numériser d'abord le signal d'information et de le transporter ensuite numériquement [28].

On notera quelques avantages de la RoF numérique:

- ☞ Il peut maintenir sa dynamique indépendamment de la distance de la fibre.
- ☞ L'architecture de CB est des BS hautement simplifiés et la rentabilité du réseau RF est atteinte.

- ☞ La RF-sur-fibre numérisée peut être basée sur des émetteurs et des récepteurs numériques à faible coût.
- ☞ Il possède une plage dynamique élevée qui peut être maintenue sur de longues distances par rapport à celle des liaisons optiques analogiques.

Comme nous avons montré dans le chapitre précédent, Le signal transmis sur la fibre optique peut être soit un signal radiofréquence (RF), un signal de fréquence intermédiaire (IF) ou un signal de bande de base (BB). Il existe un compromis entre la complexité de la station de base, l'immunité de dispersion et l'interface optoélectronique. Dans le premier système, bien que la large bande passante de la modulation optique et de la détection soit requise, la configuration RAU devient simple. Dans le second système, bien que la configuration RAU devienne un peu complexe, la bande passante requise de la modulation optique et de la détection peut être réduite. Dans le troisième système, bien que la configuration RAU devienne complexe, la bande passante requise de la modulation optique et de la détection peut être minimale.

Pour le cas de transmission IF-sur-fibre numérisée, la conversion de fréquence vers le haut et vers le bas est la même que dans la liaison IF-sur-fibre analogique, mais la configuration BS sera encore plus complexe en raison des dispositifs électroniques supplémentaires. Dans le schéma IF-sur-fibre, l'effet de la dispersion chromatique des fibres sur la distribution des signaux IF est très réduit. Toutefois, cela signifie que les stations de base d'antenne mises en œuvre pour le système radio sur fibre afin d'incorporer le transport IF sur fibre nécessiteront du matériel électrique supplémentaire tel que des oscillateurs locaux radiofréquences et des mélangeurs pour la conversion de fréquence montante et descendante.

#### **III.5.4 Les techniques de génération du signal RF**

Les techniques de modulation permettant de réaliser un déport radio sur fibresur une fréquence porteuse ou intermédiaire peuvent se classer en deux catégories, la détection directe, et la technique de détection hétérodyne [24].

##### **III.5.4.1 La détection directe**

La détection directe utilisée dans le cas d'une modulation d'amplitude est constituée d'une phase de conversion du signal optique reçu en signal électrique. La conversion se

fait à l'aide d'une photodiode. Cette technologie n'a pas que des avantages. La complexité située au niveau de l'antenne, avec l'utilisation d'un processeur pour convertir un signal numérique en un signal analogique et d'un oscillateur local pour mettre le signal sur une porteuse RF, n'est pas diminuée. En effet, numériser la porteuse RF augmente considérablement le débit, car il est nécessaire de respecter le théorème de Nyquist Shannon. Enfin, ce système n'est pas aisément évolutif dans le cas où le nouveau système radio a une bande passante beaucoup plus grande que l'ancien.

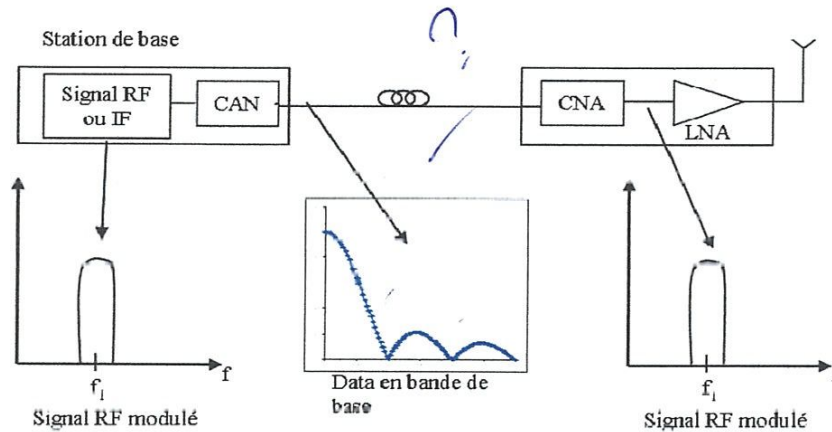


Figure III.9 . Schéma de principe d'un déport Radio sur Fibre avec conversion analogique numérique.

#### III.4.5.2 La détection hétérodyne

La technique de détection hétérodyne consiste à détecter sur une photodiode deux longueurs d'ondes proches l'une de l'autre ( $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ ). La photodiode détecte le signal optique aux fréquences optiques  $f_1$  et  $f_2$  associées à  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  respectivement qui sont élevées et génère alors un courant continu. Cependant la photodiode détecte un autre courant de signal dit hétérodyne. La fréquence  $f_3$  de ce courant correspond à la différence de fréquence entre les deux lasers, en effet c'est juste la différence de fréquence entre les lasers qui donne la fréquence de la porteuse RF.

Sur la Figure III.9, deux lasers sont utilisés pour générer le signal radio sur fibre. Pour transmettre l'information, un seul laser est modulé avec un signal en bande de base ou signal IF. L'intérêt d'une telle méthode est de pouvoir transmettre le signal en bande de base d'un côté et la porteuse RF de l'autre. Cela permet aussi de générer des oscillateurs hyperfréquences.



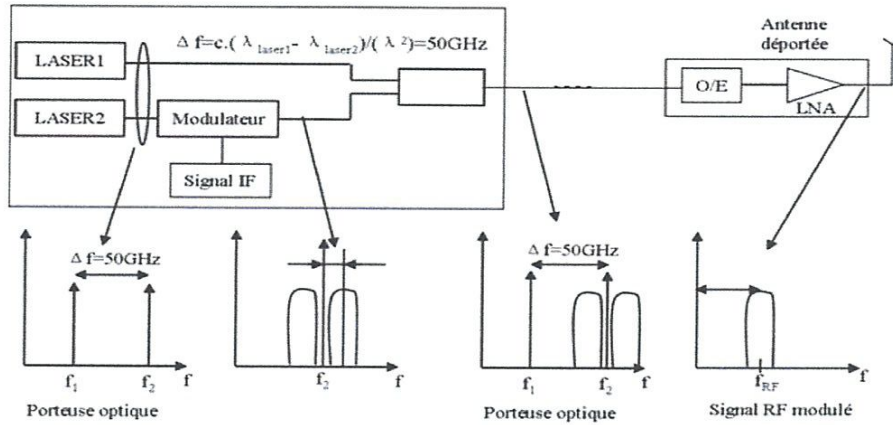


Figure III.9 : Schéma de principe d'un déport radio sur fibre avec une détection hétérodyne

La figure III.10 montre le schéma de réception d'un oscillateur local déporté généré avec la radio sur fibre. L'oscillateur local est produit par deux lasers espacés de la fréquence voulue. Ces lasers sont détectés avec une photodiode qui donne un signal hyperfréquence. Sur un troisième laser, un signal en bande de base est transmis. Au niveau de l'antenne déportée, le signal hyperfréquence et le signal en bande de base sont mélangés pour donner un signal radio. Pour la voie descendante, le signal radio reçu par l'antenne est transposé à une fréquence intermédiaire plus basse à l'aide de l'oscillateur généré optiquement.

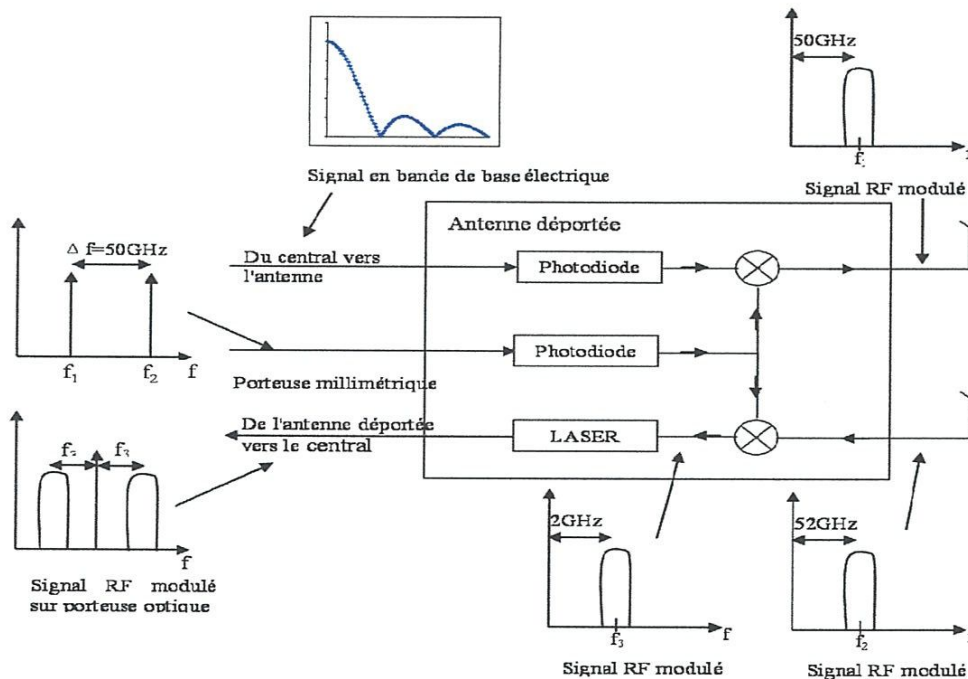


Figure III.10 : Schéma d'une antenne déportée dans le cas d'une transmission d'une onderadio avec déport de l'oscillateur local

Néanmoins la création d'un signal hyperfréquence à l'aide de l'optique présente aussi des inconvénients. Le principal désavantage de cette méthode est le bruit de phase. Il existe plusieurs moyens pour contrôler les dérives fréquentielles, les boucles à verrouillage de phase optique (OPLL : Optical Phase-Locked Loop).

### III.4.5.3 La génération du signal radio par la détection auto-hétérodyne optique

La Figure III.11 montre le principe de la génération optique du signal radiobasée sur la technique de détection optique auto-hétérodyne. Dans cette technique, un modulateur Mach-Zehnder (MZM) double bras, qui est piloté par un signal RF avec la fréquence  $f_{LO}$  d'un oscillateur local électrique (LO) génère deux portuses séparés par  $2f_{LO}$  utilisant la porteuse optique unique entrante. Les deux portuses optiques sont transmises à la BS pour la photodétection [11].

Un tel système RoF a une réduction de l'infrastructure, de maintenance simple, rentable et immunisée contre le bruit de phase laser.

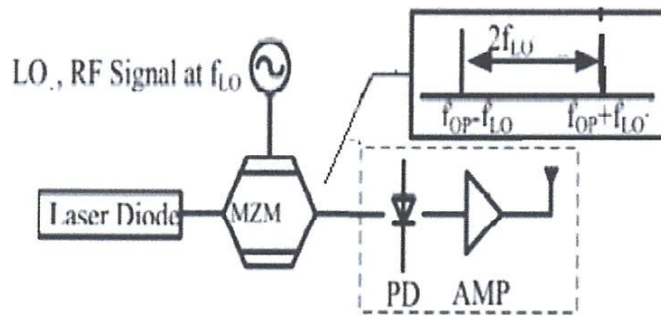


Figure III.11 : Schéma de principe d'un déport radio sur fibre avec la détection auto-hétérodyne

Le champ optique du laser est exprimé par :

$$E_{LD}(t) = E_{OP} \exp \left[ j \left( 2\pi f_{OP} t + \phi_{OP}(t) \right) \right] \quad (\text{eq : III.1})$$

Où  $E_{OP}$  est l'amplitude de l'onde optique,  $f_{OP}$  est la fréquence centrale de la porteuse optique,  $\phi_{OP}(t)$  est la phase optique.

Le générateur LO délivre une tension exprimée comme suit :

$$V_{LO}(t) = V_{LO} \cos \left( 2\pi f_{LO} t + \phi_{LO}(t) \right) \quad (\text{eq : III.2})$$

De l'équation (III.1) et (III.2), le champ optique de sortie du MZM à double bras est exprimé comme suit:

$$E_{MZM}(t) = -E_{OP} \exp[j(2\pi f_{OP}t + \phi_{OP}(t))] \sin\left(\pi \frac{V_{LO} \cos(2\pi f_{LO}t + \phi_{LO}(t))}{2V_{\pi}}\right) \quad (\text{eq : III.3})$$

Le signal RF de LO est un petit signal comparé à la tension demi-onde ( $V_{\pi}$ ) de MZM, l'équation (2.4) peut être écrite comme suit :

$$\begin{aligned} E_{MZM}(t) &\approx -\pi \frac{V_{LO}}{2V_{\pi}} E_{OP} \exp[j(2\pi f_{OP}t + \phi_{OP}(t))] \cos(2\pi f_{LO}t + \phi(t)) \\ &= -\pi \frac{V_{LO}}{4V_{\pi}} E_{OP} \exp[j(2\pi f_{OP}t + \phi_{OP}(t))] \times \left\{ \exp[j(2\pi f_{LO}t + \phi_{LO}(t))] + \exp[j(-2\pi f_{LO}t - \phi_{LO}(t))] \right\} \\ &= -\pi \frac{V_{LO}}{4V_{\pi}} E_{OP} \left\{ \exp[j(2\pi(f_{OP} + f_{LO})t + \phi_{OP}(t) + \phi_{LO}(t))] + \exp[j(2\pi(f_{OP} - f_{LO})t + \phi_{OP}(t) - \phi_{LO}(t))] \right\} \end{aligned} \quad (\text{eq : III.4})$$

L'équation (III.4) montre que l'onde lumineuse à la sortie de MZM contient deux spectres séparés avec l'intervalle de fréquence de  $2f_{LO}$ . Les fréquences  $f_{OP} - f_{LO}$ , et  $f_{OP} + f_{LO}$ .

On ne considère que le spectre de la fréquence  $f_{OP} - f_{LO}$  pour la génération du signal RF désiré exprimer comme suit :

$$E(t) = E \exp[j(2\pi(f_{OP} - f_{LO})t + \phi_{OP}(t) - \phi_{LO}(t))] \quad (\text{eq : III.5})$$

Le photocourant à la sortie de la photodiode PD ( $I(t)$ ) peut être calculé comme suit :

$$\begin{aligned} I(t) &= R(E(t) \times E(t)^*) \\ I(t) &= R \times E^2 \end{aligned} \quad (\text{eq : III.6})$$

où R représente la sensibilité de la PD.

### III.5.6 Architecture du réseau RoF-WDM-PON proposée

Pour les cas d'applications d'un signal WiMAX sur fibre optique nous considérons un cas d'architecture correspond à un déport d'antenne, dans le sens descendant et le sens montant.

Les réseaux d'accès optiques conventionnels utilisent une transmission de signal numérique à modulation d'amplitude OOK (pour On/Off Keying) de type NRZ (non retour à zéro). Cependant, Par la différence de format de modulation dans la liaison radio, il y a deux configurations du RAU. L'une est que le format de modulation de la liaison radio est le même que celui de la liaison optique, et l'autre est que le format de modulation de la liaison radio est différent de celui de la liaison optique. Dans ce le premier système, les données PON sont converties en fréquence centre des liaisons optiques et radio avec le même format de modulation, généralement avec l'OOK. D'autre part, dans le



deuxièmesystème, les données PON peuvent être transmises sur la liaison radio avec le format de modulation différent de celui de la liaison optique. Dans ce cas, un signal de sous-porteuse avec le même format de modulation que celui de la liaison optique est généré, puis la sous-porteuse générée est transmise sur la liaison à fibre optique. Par la différence de fréquence de sous-porteuse, il y a deux transmissions RoF. L'une est une transmission de sous-porteuse à bande de fréquences intermédiaires (IF), et l'autre est une transmission de sous-porteuse à bande RF. Dans le premier système, bien que la configuration RAU devienne un peu complexe, la bande passante requise pour la modulation optique et la détection peut être atténuée. Dans le deuxième système, bien que la large bande passante de la modulation optique et de la détection soit requise, la configuration RAU devient simple.

Nous avons fait le choix d'effectuer la conversion RF au RAU par la détection auto-hétérodyne. Ce choix est pour avoir un système RoF-PON simple, rentable, réduit la maintenance, et permet d'utiliser des composants actifs peu onéreux. A l'émission, la conversion électrique/optique est effectuée par modulation d'un Laser à travers la modulation d'amplitude (OOK) avec le modulateur Mach-Zehnder.

Le codage OOK regroupe plusieurs formats de modulation, le principal format de la modulation d'amplitude est NRZ.

Dans le format NRZ, l'amplitude du signal optique est maintenue pendant tout le temps bit, et ne retourne pas à zéro entre deux (ou plusieurs) bits «1» successifs.

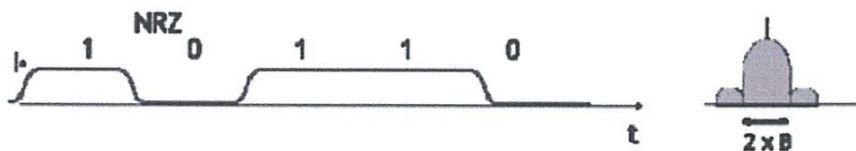


Figure III.12 : Trace temporelle et spectre du format NRZ

Le spectre de ce format comporte, un lobe principal et des lobes secondaires deux fois plus étroits. Le lobe principal du spectre du format NRZ a une largeur égale à deux fois la fréquence d'information du signal optique.  $BP_{NRZ} = 2 \cdot \text{Débit}$

Le signal NRZ électrique code le signal optique grâce à un modulateur d'intensité de Mach-Zehnder, il suffit de moduler sa tension de commande par un signal proportionnel au signal binaire initial et variant entre un minimum et un maximum de la fonction de

transfert en intensité du Mach-Zehnder. Le signal en sortie est un signal NRZ optique modulé en intensité au débit des données.

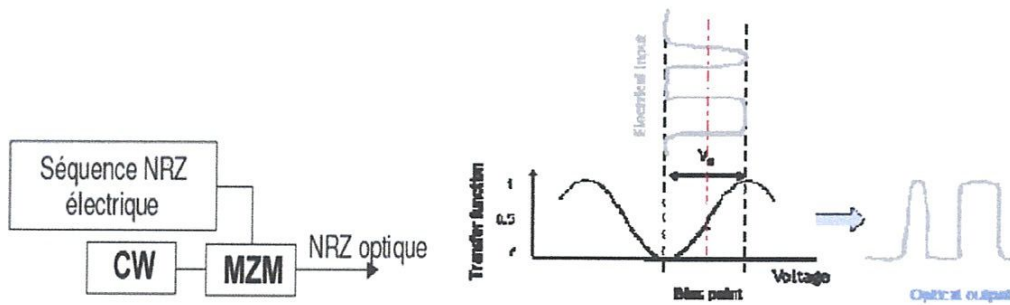


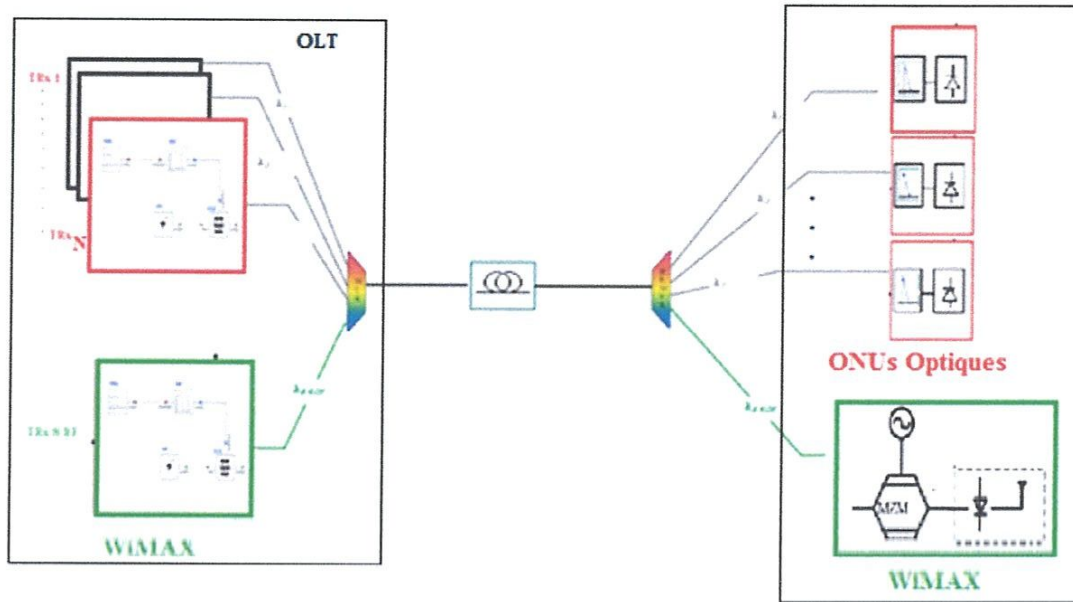
Figure III.13. Module d'Emission NRZ

- **Architecture de liaison descendante**

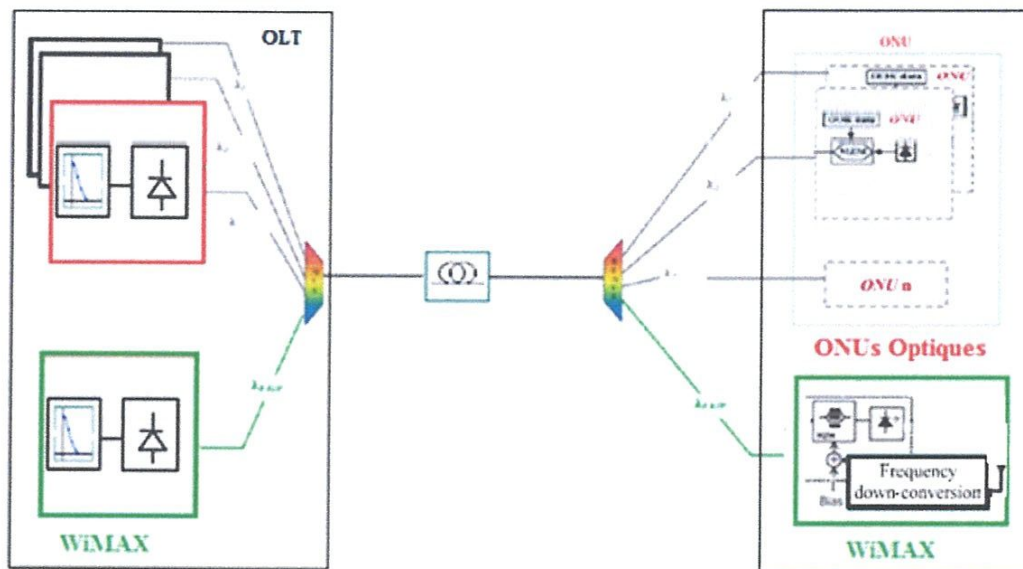
La Figure III.14(a) montre le schéma synoptique de l'architecture de liaison descendante qui décrit une OLT, une unité d'antenne distante (RAU) et un équipement d'abonné (ONUs) optiques. En OLT, les diodes laser (LD) génèrent des lasers à onde continue (CW) à des puissances optiques spécifiques. Ces lasers CW seront utilisés par le modulateur optique pour générer les porteuses optiques à des fréquences espacées régulièrement dans la grille WDM, puis la fréquence porteuse optique pour le signal RoF sera utilisée par un autre modulateur pour convertir en amont les données de signal au niveau du RAU. Cette technique est appelée suppression de la porteuse optique (Optical Carrier Suppression : OCS), en utilisant la technique d'auto-hétérodyne. Après, le signal modulé provenant du module OCS est transmis via une antenne au RAU. Dans les ONUs optiques, le signal optique transmis par l'OLT sera converti en un signal électrique par un photodétecteur (PD).

- **Architecture de liaison montante**

La Figure III.14 (b) montre le schéma synoptique de l'architecture de liaison montante qui décrit les ONUs optiques, une unité d'antenne distante (RAU) et un équipement OLT. Au RAU, le signal reçu est amplifié puis converti en signal optique. Ensuite, le signal est transmis à l'OLT. Dans les ONUs optiques, le signal électrique transmis à l'OLT est converti en un signal optique par une diode laser par le biais du modulateur MZM.



(a)



(b)

**Figure III.14:** Implémentation de l'architecture RoF-WDM-PON (a)- Architecture de liaison descendante, (b) Architecture de liaison montante

Dans le chapitre suivant, Nous allons évaluer la performance de l'architecture présenté par la figure III.14 qui montre l'architecture du système d'accès pour les liaisons d'extension WDM-PON avec les technologies RoF de type WiMAX utilisant un format de conversion différentes entre les liaisons optiques et radio.



### **III.6 Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons développés les concepts de l'intégration de système RoF dans le réseau WDM-PON, Nous nous somme basé sur le réseau passif optique PON et le système RoF étudiés dans lesdeux premiers chapitre pour concevoir un réseau d'accès defuture générationFi-Wi plus performant éliminant ainsi les limites due au réseau PON conventionnel. De nombreux aspects du RoF couplés avec le PONont été étudiés à savoir la technologie RoFchoisi pour une application au réseau WiMAX, les techniques de génération et de conversion du signal RF, et le choix de l'architecture pour effectuer l'implémentation du réseau RoF-WDM-PON.

---

# **CHAPITRE IV**

## **RESULTATS DE LA SIMULATION**

---

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter l'ensemble du travail de simulation de système d'intégration ROF dans un réseau optique passif WDM-PON proposé et présenté dans le chapitre précédent dont le but d'évaluer ces performances pour les deux liaisons downstream et upstream à l'aide de logiciel de simulation OptiSystem.

Dans un premier temps, nous présentons une brève description des différentes applications et caractéristiques du logiciel de simulation OptiSystem, ainsi nous allons définir les éléments qui serviront de critères de qualité pour évaluer la qualité de transmission des données des utilisateurs en sortie de la partie détection. Ensuite, nous allons présenter la liaison RoF-WDM-PON à simulé par le logiciel et définir chaque bloc, et enfin, on va décrire et discuter les résultats de simulation.

## IV.2 Présentation de logiciel [29]

### IV.2.1 Description

OptiSystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication. OptiSystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale. La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Construire le schéma bloc.
- Analyser le schéma.

La Figure IV.1 représente une description générale de logiciel OptiSystem.

**-Interface OptiSystem :** L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale repartit en plusieurs parties.

**-Bibliothèque :** une base de données de divers composants existants.

**-Editeur du layout:** permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.

**-Projet en cours :** visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.



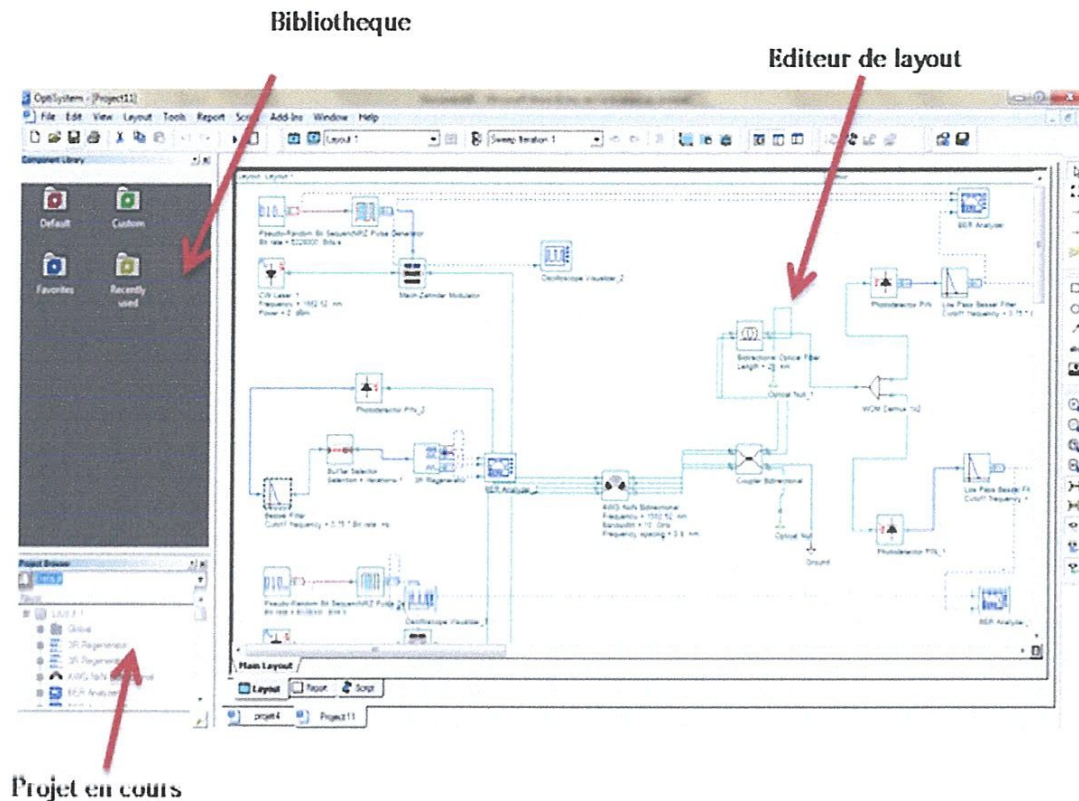


Figure IV.1: Description de logiciel OptiSystem

#### IV.2.2. Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque de composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, ces composants s'intègrent aux équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée produisent le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation des schémas et beaucoup plus.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiseurs sur le moniteur au même port.
- Plusieurs mises en page.

### **IV.2.3 Applications du logiciel OptiSystem**

Parmi les diverses applications d'OptiSystem nous allons citer les plus utilisées :

- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER) et le calcul du bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et de réseaux optiques passifs (PON).
- L'espace libre pour les systèmes optique (OSA).
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

### **IV.2.4 Avantages du logiciel**

- Fournir un aperçu de performances du système mondial de fibres optiques.
- Evaluer les sensibilités des paramètres aidant aux spécifications de tolérance de conception.
- Présenter visuellement les options de conception à des clients potentiels.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation approfondie du système.
- Fournir le balayage automatique des paramètres et d'optimisation.

## **IV.3 Critères d'évaluation d'une transmission**

Dans les systèmes de transmission, on utilise certains types de signaux de données bien spécifiques de manière à tester la qualité des éléments constituant ces systèmes suivant certaines configurations telles que le type de séquences binaires, le format de modulation, etc... C'est pour cela qu'il est primordial de fixer un cadre d'étude pour pouvoir comparer qualitativement et quantitativement les performances du système de transmission.

Pour déterminer la qualité d'une transmission optique, différents critères sont définis. Les trois critères principaux sont : le taux d'erreur binaires, le diagramme de l'œil et le facteur de qualité.

### **IV.3.1 Diagramme de l'œil**

Le diagramme de l'œil permet de visualiser la qualité d'un signal dans le domaine temporel en superposant un grand nombre de séquences en temps réel au moyen d'un oscilloscope rapide synchronisé sur le signal d'horloge du signal de données. Pour superposer tous les bits il suffit de faire glisser temporellement chaque séquence bit à bit. Ce diagramme permet de voir la dégradation de chaque symbole sur le même graphique.

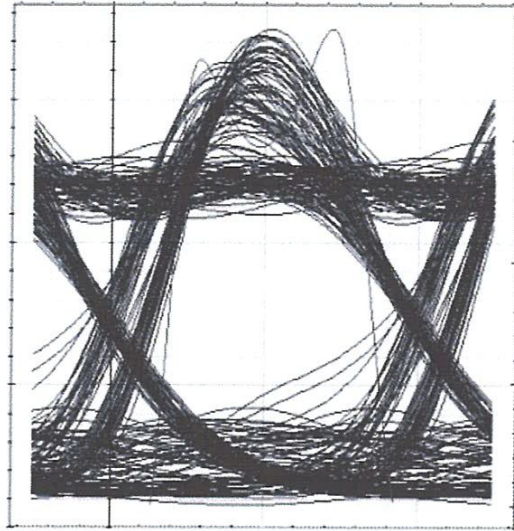


Figure IV.2: Diagramme de l'œil

L'ouverture de l'œil caractérise le bruit et les distorsions apportées par la chaîne de transmission. L'opération d'échantillonnage doit se produire à l'instant précis où l'œil est le plus ouvert. Un œil bien ouvert permettra au dispositif de démodulation de discerner aisément les symboles transmis. A l'opposé, un œil fermé se traduira inévitablement par de nombreuses erreurs de transmission. [4]

### IV.3.2 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité (Q), est un paramètre permettant de caractériser la qualité d'un signal.

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\delta_1 - \delta_2} \quad (\text{eq : IV.1})$$

Où  $I_1$  et  $I_0$  sont les valeurs moyennes des photo-courants du symbole 1 et 0,  $\delta_1$  et  $\delta_2$  les racines carrées des variances des densités de probabilité des symboles 1 et 0.

La mesure expérimentale du facteur Q d'un signal est difficile c'est-à-dire  $I_1$ ,  $I_0$ ,  $\delta_1$  et  $\delta_2$ , ne sont souvent pas directement mesurables.

Afin de résoudre ce problème, on peut utiliser la relation du TEB (Taux D'erreur Binaire) optimal en fonction du facteur Q à condition des distributions gaussiennes de probabilités des niveaux du signal :

$$TEB = \frac{1}{2} \left[ \text{erf} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (\text{eq :IV.2})$$



### IV.3.3 Taux d'erreurs binaires

Le taux d'erreurs binaires (BER : *Bit Error Rate*) permet d'évaluer la qualité d'une transmission optique. Il peut être déterminé en comparant la séquence de données binaires émise et celle reçue car il est défini par le rapport du nombre de bits erronés sur le nombre total de bits transmis :

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bits transmis}} \quad (\text{eq : IV.3})$$

Un système est généralement considéré de bonne qualité en télécom optique si ce BER est inférieur à une valeur de  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$  ou  $10^{-15}$  suivant les systèmes. [10]

### IV.4 Présentation de l'architecture à simuler de RoF-WDM-PON

La transmission de signal optique, fait par deux (02) types .

- L'une transmette les données directement de l'OLT vers l'ONU dans le sens descendant, et de l'ONU vers l'OLT dans sens montant pour les utilisateurs optiques.
- l'autre à l'aide d'une RAU (antenna remote unit), de l'OLT vers RAU puis de RAU vers l'ONU dans le sens descendant, et de l'ONU vers RAU puis de RAU vers l'OLT dans sens montant pour les utilisateurs radios sans fil.

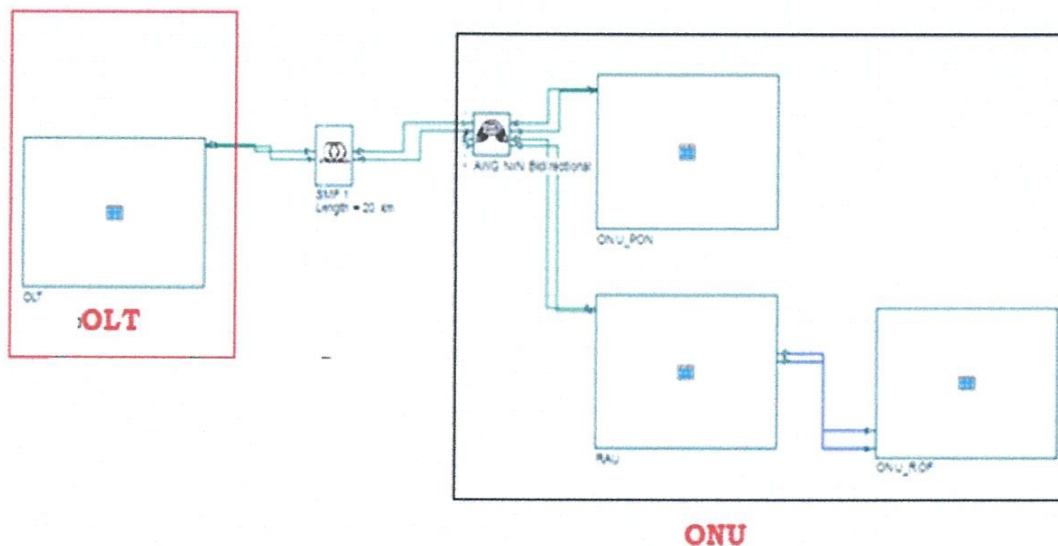


Figure IV.3 : Schéma simplifié du RoF-WDM-PON simulé

Le système que nous avons simulé est illustré à la Figure IV.3. La création de sous-systèmes aide à rendre la simulation modulaire et plus facile à organiser. Notre système se compose de plusieurs parties, chaque partie est constituée de composants, ces parties sont détaillées dans ce qui suit.

#### IV.4.1 Partie d'émission et de réception dans l'OLT

La configuration de l'OLT du réseau simulé est illustrée par la Figure IV.4. À l'OLT, l'émetteur optique est composé d'un ensemble de canaux numériques, et le signal RF d'un émetteur sans fil (8 canaux dans le système à simulé espacées de 0.8 nm ou 100 GHz). Tous les signaux sont transmis via une liaison par fibre optique commune. Le regroupement des signaux est assuré par un MUX-WDM 8:1. Suite à cela, un amplificateur de puissance est utilisé pour simuler une seconde étape de division. La distribution du signal est réalisée par un répartiteur de puissance 1:8. Les circulateurs et le multiplexeur AWG bidirectionnel utilisés dans la liaison pour faciliter l'architecture, MUW/DEMUX à la fois pour les sens descendant et montant. Le récepteur optique est composé d'un ensemble de photodiodes PIN basé sur la détection directe.

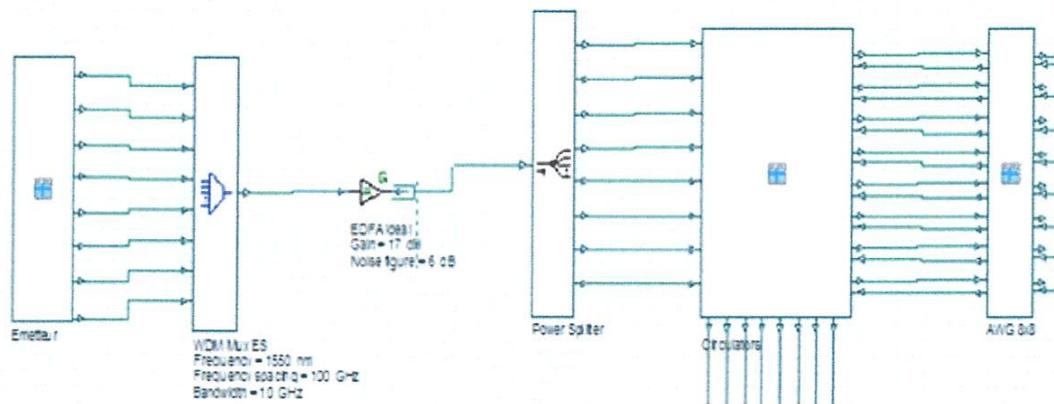


Figure IV.4 : Bloc globale d'émission au sein de l'OLT

##### IV.4.1.1 Partie d'émission RF et optique dans l'OLT

Le schéma du module d'émission NRZ est présenté sur la Figure IV.5. Ce bloc est composé d'un générateur binaire, modulateur Mach Zehnder et source laser. Le signal en bande de base de chaque émetteur généré par un générateur de séquence binaire pseudo-aléatoire est codé par un code non-retour à zéro (NRZ), cette séquence est modulée optiquement par une source optique laser à l'aide d'un modulateur de Mach Zehnder, les

puissances des utilisateurs va regrouper à la sortie de MZM. On regroupe les huit (08) longueurs d'onde par un Multiplexeur WDM espacées de 0.8 nm (100 GHz).

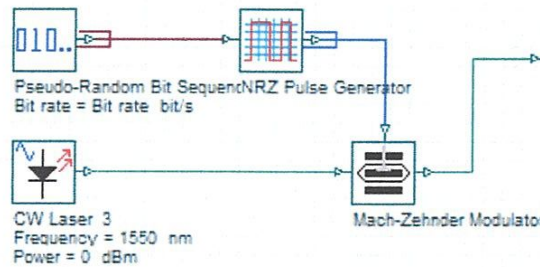


Figure IV.5 : bloc d'émission pour chaque utilisateur

#### IV.4.1.1 Partie de réception RF et optique dans l'OLT

Pour la réception de signal descendant (au niveau de 7 ONU PON) et la réception de signal montant au niveau de l'OLT on utilise la même technique de détection directe.

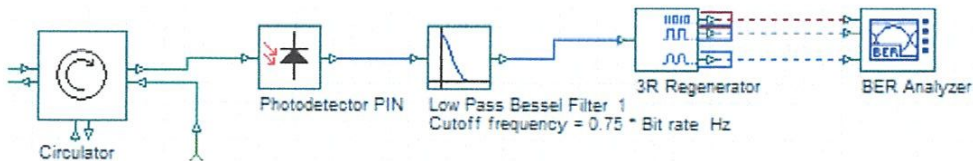


Figure IV.6: bloc de réception

La réception comporte deux blocs :

➤ **Photodétecteur** : Un dispositif (détecteur) qui transforme la lumière qu'il absorbe en une grandeur mesurable généralement un courant électrique ou une tension électrique. Le type de photodétecteur utilisé est une photodiode PIN dont ces caractéristiques sont représentées dans le tableau IV.1.

Sensibilité	0.7 A/w
Courant d'obscurité	10 Na
Longueur d'onde centrale	1550.75nm
Bruit signal ASE	Oui
Bruit thermique	$80 \cdot 10^{-24} \text{ w/Hz}$

Tableau IV.1 : caractéristiques de photodétecteur



➤ **Filtre passe bas :** Le filtre passe-bas est utilisé pour rejeter le bruit et les interférences composantes qui se situent en dehors des informations du spectre du signal dont la bande passante est de  $4 \times$  le débit binaire ou la fréquence de répétition, et sa fréquence de coupure est de  $0,75 \times$  le débit binaire.

#### IV.4.2 Partie d'émission et de réception dans les ONUs

L'émetteur et le récepteur pour l'ONU optique comporte les mêmes composants que l'OLT, donc, on présentera que les partie d'émission et de réception de l'ONU RoF.

##### IV.4.2.1 Partie d'émission de l'ONU ROF

La configuration de partie d'émission de l'ONU RoF du réseau simulé est illustrée par la Figure IV.7. Le signal NRZ électrique de l'utilisateur RF de fréquence  $f_N = 2.5$  GHz (débit binaire 2.5 Gb/s), est transporté au modulateur d'amplitude qui permet de coder les signaux numériques en signaux analogiques avec une fréquence Radio  $f_{RF} = 6.25$  GHz, afin de le transmettre à travers l'antenne au RAU sur une fréquence supérieur ( $f_N + f_{RF} = 8.75$  GHz). Au niveau de RAU, le signal RF analogique est converti en signal électrique numérique, en utilisant le mélange entre le signal RF reçu à la fréquence 8.75 GHz, et le signal de l'oscillateur local de fréquence 6.25 GHz. le filtre passe-bas permet de sélectionner une bande de fréquence contenant l'information de la fréquence 2.5 GHz, ensuite modulé optiquement par un modulateur Mach-Zehnder. Le signal de sortie est un signal NRZ optique modulé en intensité au débit de données 2.5 Gb/s.

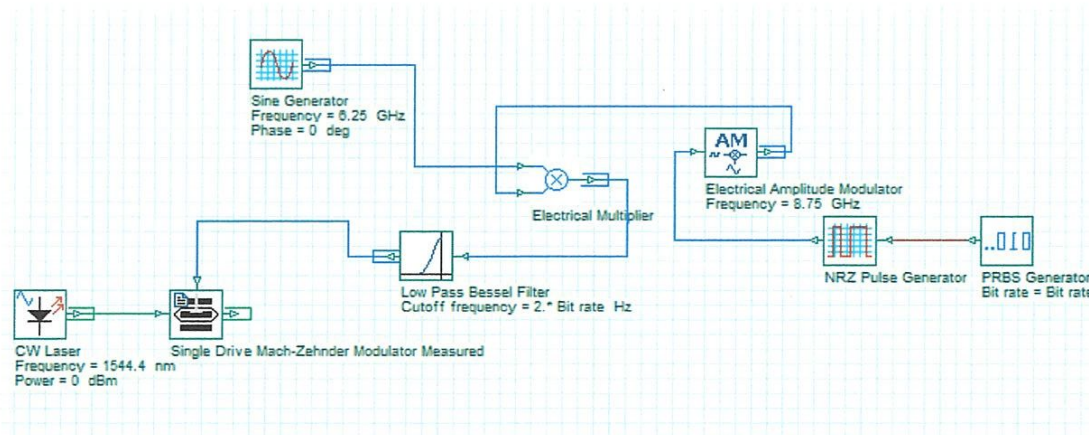


Figure IV.7 : Schéma de bloc d'un émetteur ONU RoF

##### IV.4.2.2 Partie de réception de l'ONU RoF

La configuration de l'ONU RoF du réseau simulé est illustrée par la Figure IV.8. Le signal optique reçu à chaque unité de réseau optique (ONU RoF) est convertie en signal RF au niveau de RAU en utilisant une détection auto-hétérodyne optique entre deux porteuses

optiques simultanément; une porteuse optique est modulée avec les données d'utilisateur, tandis que la seconde est une porteuse non modulée. Chaque porteuse optique transmet un signal de sous-porteuse DPSK (Differential Phase-Shift Keying) par le modulateur électro-optique (EOM). Le signal analogique optique est converti en signal RF électrique à l'aide d'une photodiode PIN afin de le transmettre à travers l'antenne. Le générateur analogique utilisé est un dispositif qui génère un signal sinusoïdal analogique à la fréquence  $f_{RF} = 6.25$  GHz, les filtres passe-bande permettent de sélectionner une bande de fréquence contenant l'information que l'on souhaite détecter généralement de la fréquence inférieure ( $f_0 - f_{RF}$ ). Un démodulateur d'amplitude est utilisé au niveau de l'utilisateur pour reconvertir le signal RF analogique en signal électrique numérique.

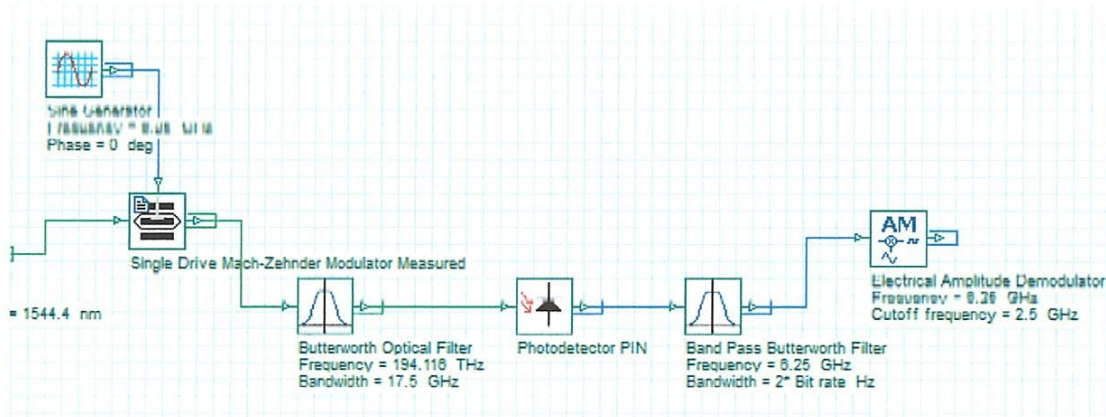


Figure IV.8 : Schéma de bloc du récepteur ONU RoF

#### IV.4.3 Partie de transmission

La partie de transmission représentant une fibre optique bidirectionnel SMF d'une longueur  $L = 20$  km spécifié par la norme G.652 de l'UIT, comme représenter dans le tableau IV.2.

Longueur d'onde de référence	1550 nm
Longueur	20 km
Atténuation	0.2 dB /km
Dispersion chromatique	16.75 ps/nm/km

Tableau IV.2 : caractéristique de la fibre optique

On note que pour séparer ou combiner les huit longueurs d'onde transmis vers les abonnés ONU ou vers l'OLT, un MUX/DEMUX de type AWG est utilisé comme un nœud de distribution.



#### **IV.5 Résultats de la simulation**

Dans le sens descendant, le signal en bande de base de chaque émetteur généré par un générateur de séquence binaire pseudo-aléatoire est codé par un code non-retour à zéro (NRZ), la puissance de chaque utilisateur est de 0 dBm, cette séquence est modulée optiquement par une source optique laser de l'utilisateur à l'aide d'un modulateur de Mach Zehnder, les puissances des utilisateurs à la sortie de MZM vont regrouper les huit (08) longueurs d'onde par un Multiplexeur WDM espacées de 0.8 nm (100 GHz). Par la suite, les signaux sont amplifiés et séparé à l'aide d'un coupleur optique (diviseur 1 : 8) pour regrouper de chaque abonné le front montant et le front descendant par un circulateur optique. Après cela, on utilise AWG bidirectionnel qui joue le rôle de multiplexeur pour le sens downstream et démultiplexeur pour le sens upstream. Et un retard car on utilise la même longueur d'onde pour l'upstream et le downstream de chaque abonné.

Une fibre monomode bidirectionnelle (SMF) est utilisée comme un canal de transmission (transmission de l'upstream et le downstream). La puissance optique à la sortie du canal de transmission est divisée en huit (08) à l'aide d'un coupleur optique de type diviseur optique, splitter (1 : 8).

Les signaux de sept (07) utilisateurs ONU PON sont détectées par une détection directe en utilisant la photodiode PIN, puis chaque signal est filtré par un filtre passe bas pour éliminer le bruit associé au niveau de la photodiode.

Le signal numérique optique détecté au niveau de RAU est modulé en phase par un modulateur MZM (single Drive MZM modulator), et ensuite filtré à l'aide d'un filtre passe bande de fréquence du signal porteur qui permet de sélectionner la fréquence radio et d'éliminer le bruit du signal, la photodiode PIN convertit le signal optique en photocourant, puis le transmette à travers de l'antenne. Après la transmission en espace libre, le ONU RoF reçoit le signal électrique analogique et le filtré par un filtre passe bande de fréquence du signal pour supprimer la porteuse et récupère que l'information, puis l'amplifié par un amplificateur électrique, enfin le signal analogique converti en signal numérique à l'aide un démodulateur d'amplitude électrique AM.

Dans le sens montant, le signal de chaque ONU PON en bande de base converti en signal optique par MZM puis multiplexer par AWG et transmis sur la même fibre. On récupère le signal au niveau de l'OLT par une photodiode PIN.

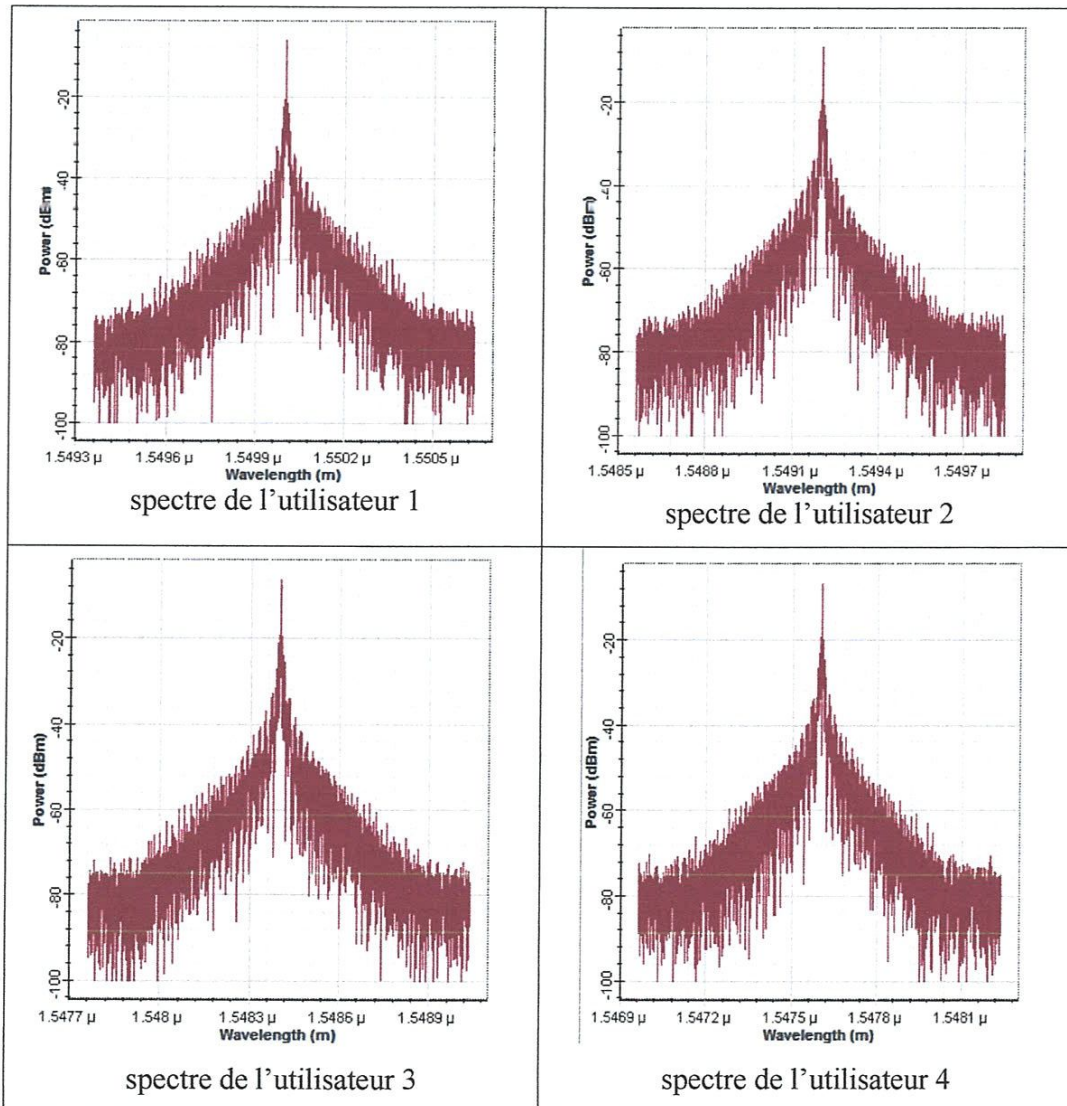
Le signal d'émission ONU RoF en bande de base converti en analogique et modulé en phase puis détecté par la photodiode PIN, le signal électrique analogique est transmette

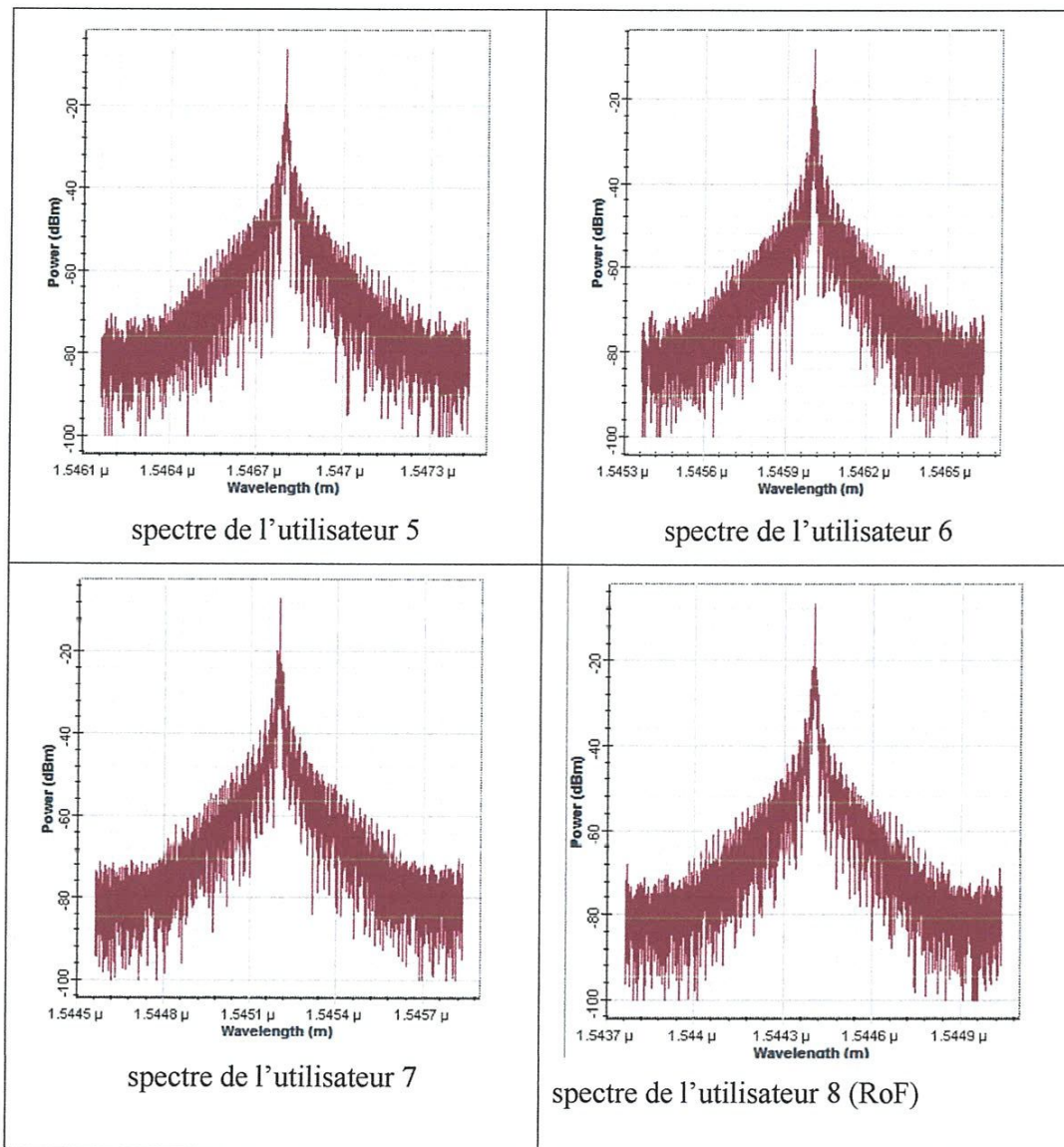


par une antenne vers le RAU, ensuite le signal rend de sa forme originale (signal électrique numérique) par un démodulateur d'amplitude AM et modulé optiquement à l'aide de MZM et une source laser. Enfin, les sept (07) signaux ONU PON et le signal ONU RoF sont multiplexé par un AWG et le transmettre à travers la fibre. Au niveau de réception OLT tous les signaux détecté par une détection simple à l'aide d'une photodiode PIN.

En simulant le système RoF-WDM-PON, avec un débit de 2.5 Gbit/s par utilisateur. Le but de la liaison est d'atteindre une bonne transmission dans les deux sens, tout en conservant le signal émis à la réception.

Dans ce qui suit on va présenter les modifications apportées sur les spectres de différents signaux à différents bloc, d'ou l'existant du signal peut être facilement suivi en regardant leurs spectres. La figure IV.9 montre les spectres optiques au niveau de l'OLT de chaque utilisateur

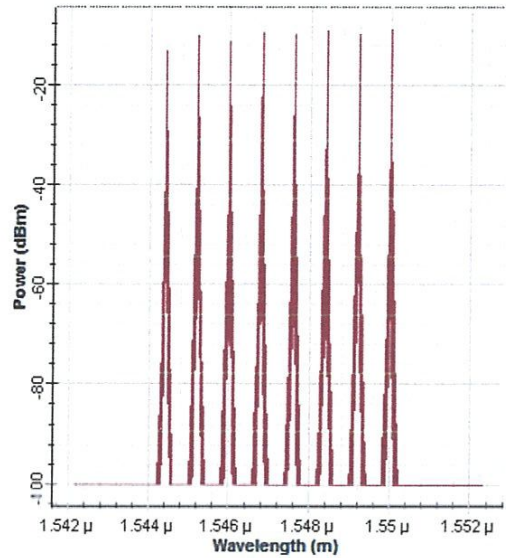




La figure IV.9 : spectres des utilisateurs au niveau de l'OLT

Comme mentionné précédemment, les signaux optiques seront regroupés par un MUX. La figure IV.10 ci-dessous montre que tous les signaux ou canaux optiques sont attribués à proximité les uns à l'autres et qu'il n'y a pas d'interférence ou de distorsion se produisant.

Les signaux optiques composites qui ont été générés par les émetteurs optiques ont été amplifiés par un amplificateur. Les signaux amplifiés sont représentés par la figure IV.11. Les signaux ont été amplifiés, et la puissance de signal a été augmentée de -10 dBm jusqu'à 5 dBm ainsi que le bruit existant dans le système est également amplifié.



La figure IV.10: spectre du huit canaux après le passage de MUX

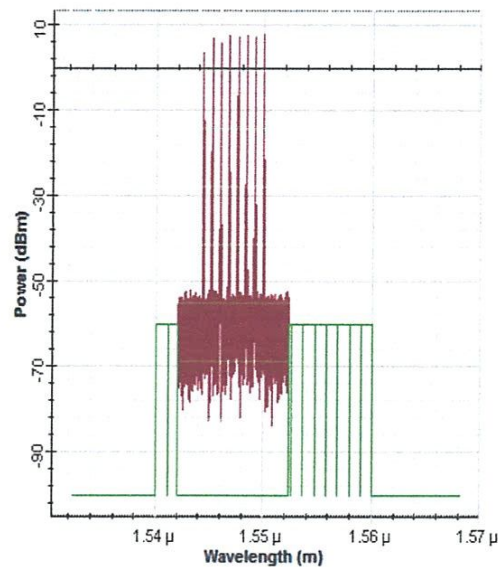


Figure IV.11: Spectre du multiplex a la sortie de l'amplificateur

La figure IV.12 montre les spectres après la détection au niveau de l'OLT et l'ONU. En remarque que les spectres des signaux reçus par l'OLT optique et les signaux reçus ONU PON sont moins bruités car on utilise une détection directe et un filtre passe bas qui élimine le bruit de photodétection. Cependant, le spectre reçu par l'OLT RoF, et l'ONU RoF sont bruité à cause de la conversion numérique analogique et le passage a travers l'espace libre.



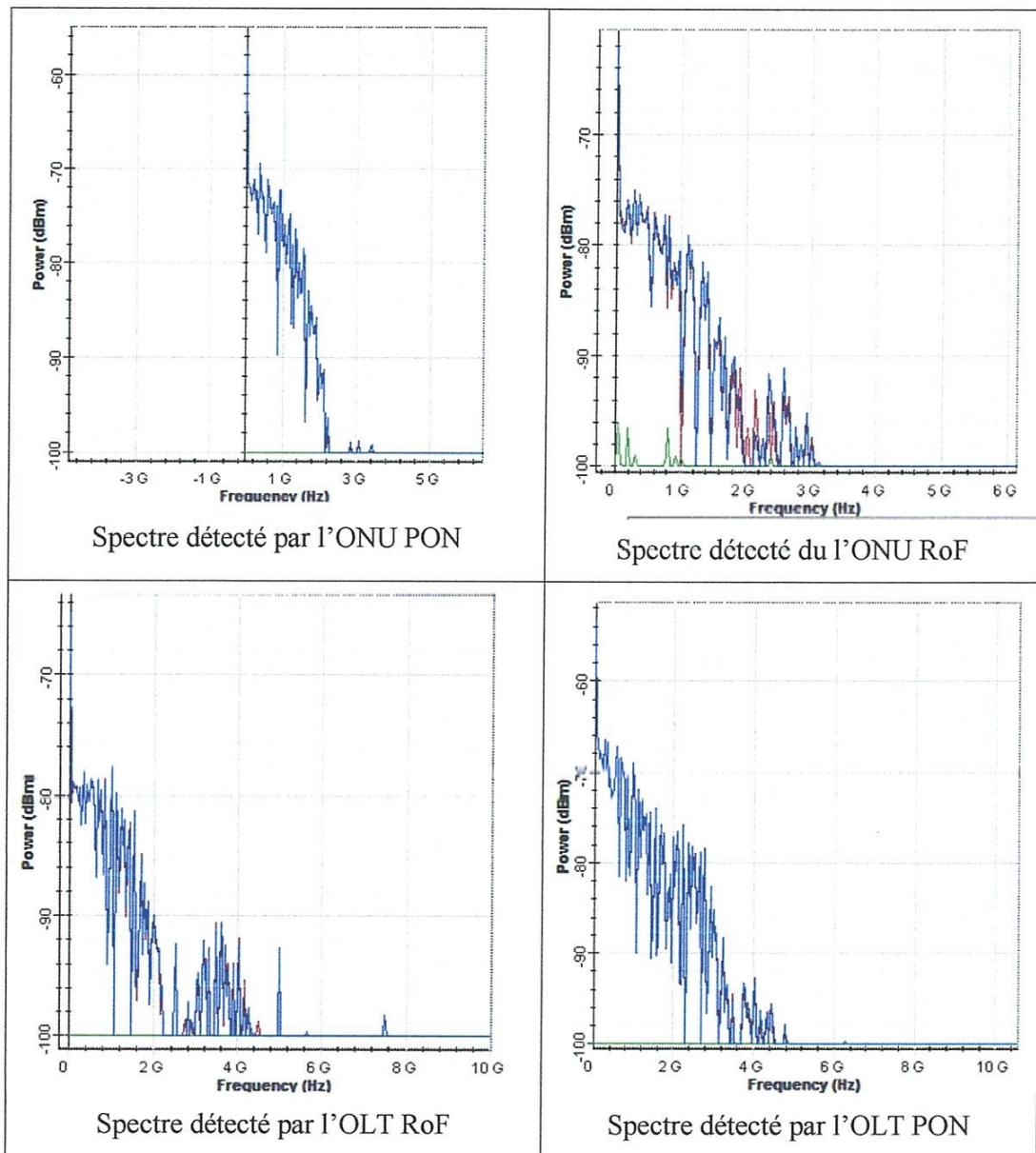


Figure IV.12 : les spectres de chaque détection par le récepteur

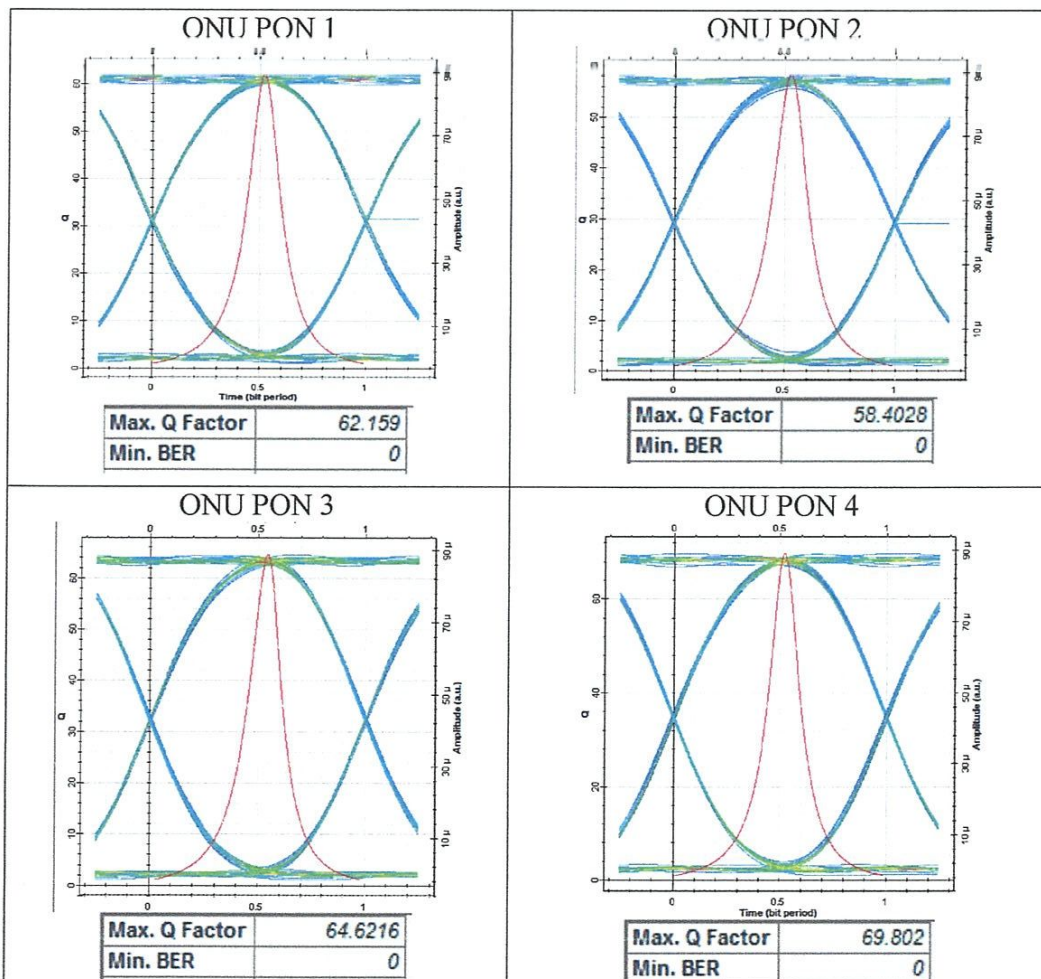
Les diagrammes de l'œil et les taux d'erreurs binaire après une distance de transmission de 20 Km sont illustrés par la figure IV.13 et la figure IV.14 dans le sens descendant, et montant respectivement.

On remarque que les diagrammes de l'œil des signaux reçus par l'ONUs PON <sup>est</sup> est plus clair que le diagramme de ONU RoF avec une meilleure ouverture. Ces résultats sont dépend de la qualité des spectres vus dans la section précédente, ainsi au nombre des utilisateurs contribuées dans le PON optique.

## Chapitre IV: Résultats de la simulation

Le réseau PON peut avoir un nombre des utilisateurs jusqu'à 64, et on a prés seulement 8. Si on augmente le nombre, le facteur de qualité va diminuer. En plus, le facteur de qualité au niveau de l'ONU PON reste plus grand que celui à l'ONU RoF puisque la liaison RoF est limité par la porté, si on diminuer la portée utilisé dans les réseaux RoF à 10 km, le facteur de qualité augmente à 8.08.

Dans le sens montant, les utilisateurs de l'OLT optique présentent des bons facteurs de qualité, cependant, le facteur de qualité Q est diminué dans le sens montant que dans le sens descendant due aux atténuations des signaux au cours de passage par les différentes composant optiques tels que le modulateur, le MUX/DEMUX, le circulateur, et les filtres. Tous ces composants sont de nature dissipatifs ce qui rend la puissance reçue faible devant le bruit. On note qu'au niveau de l'OLT un amplificateur booster est utilisé. En plus, le facteur de qualité au niveau de l'OLT RoF resté faible dû aux limitations des composant optique discuté dans le paragraphe précédent, et à la limitation de radiofréquence, tels que la conversion analogique numérique.





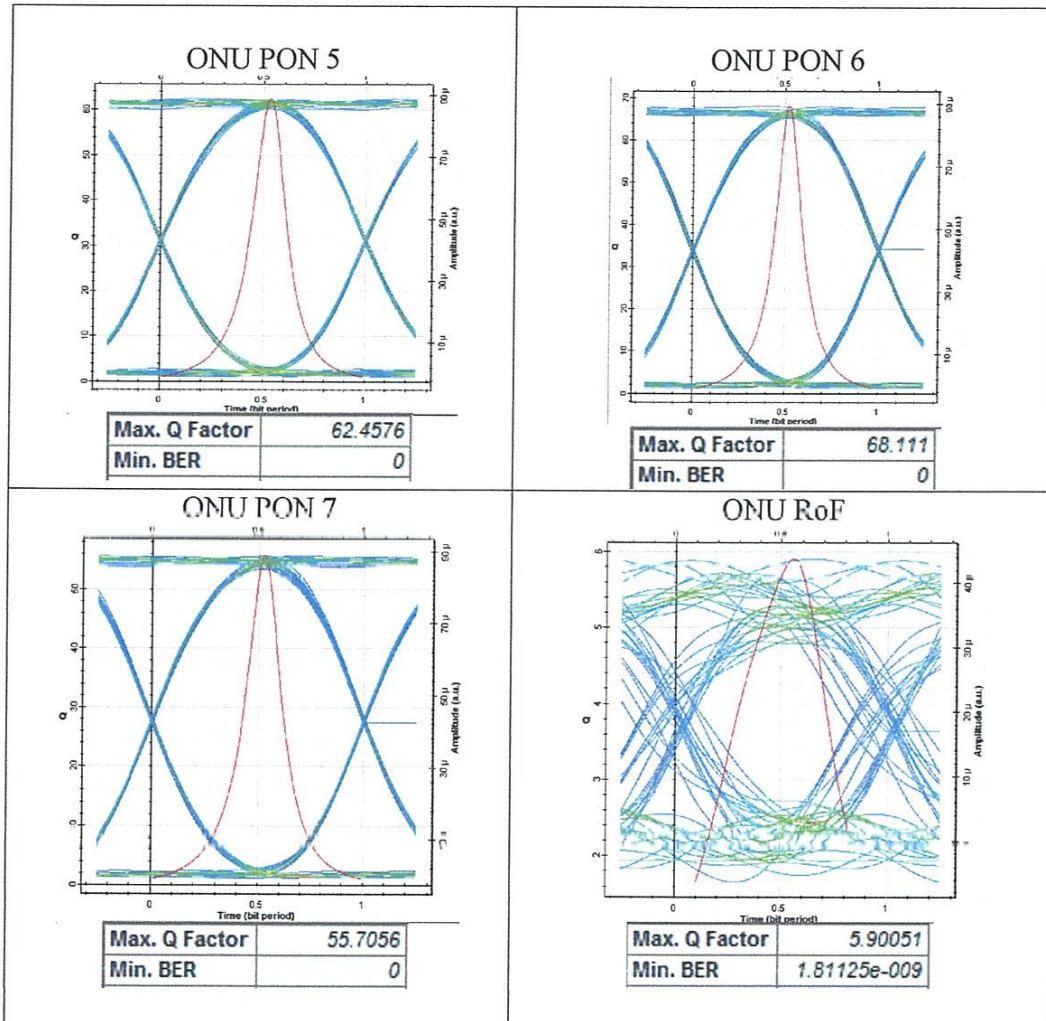
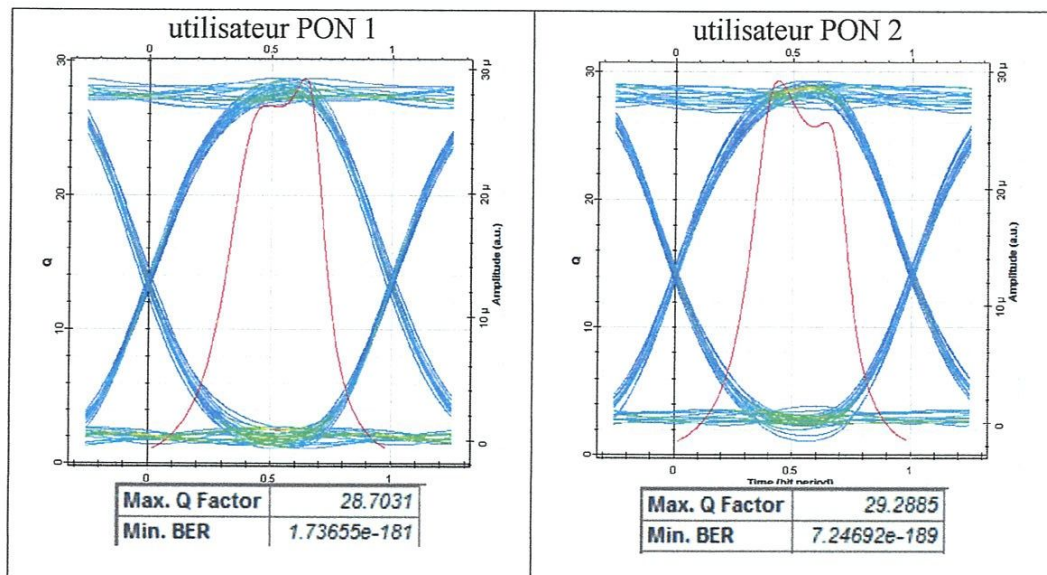


Figure IV.13 : Diagramme de l'œil au niveau de l'ONU





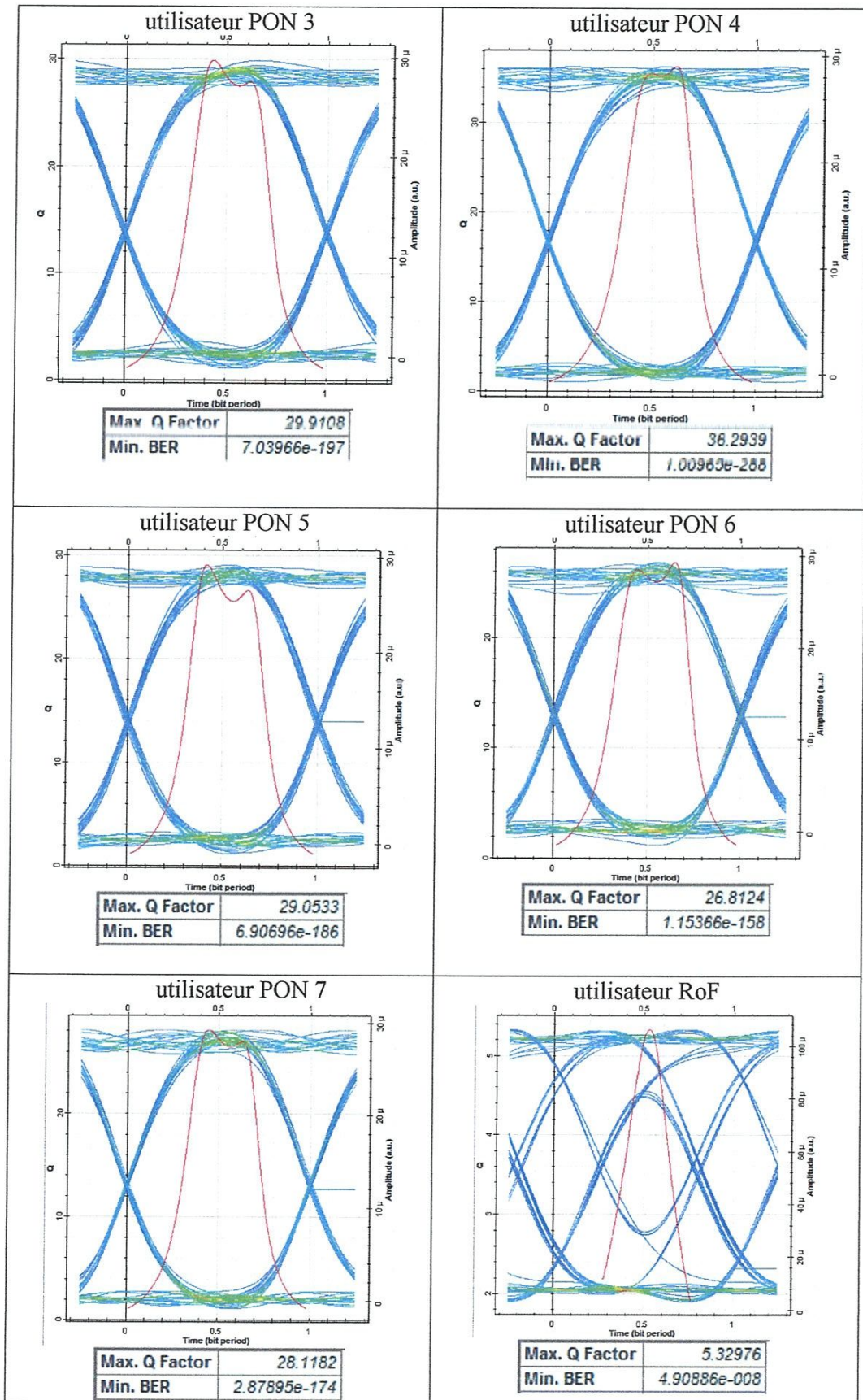


Figure IV.14: Diagramme de l'œil au niveau de l'OLT

#### **IV.6 Conclusion**

Ce dernier chapitre est consacré à la simulation du système d'intégration de RoF dans un réseau d'accès optique WDM-PON. Dans un premier temps, on a présenté toutes les parties et les composants composant ce système, on a étudié les deux sens montant et descendant, puis nous avons simulé le système par logiciel OptiSystem tout en respectant le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire en télécoms optiques et nous avons identifié les paramètres les plus adaptés du RoF-WDM-PON au niveau du réseau d'accès.

---

## CONCLUSION GENERALE

---



### **Conclusion générale**

Les réseaux Fi-Wi constituent une solution prometteuse pour les futurs réseaux d'accès haut débit. Leur combinaison de bande passante plus large dans le réseau d'accès optique et de mobilité et de flexibilité de la technologie sans fil a été activement étudiée.

Le contexte de ce mémoire s'est articulé autour de l'intégration de la technologie Radio sur Fibre (RoF) comme un réseau sans fil dans les réseaux optiques passifs exploitant le multiplexage en longueur d'onde (WDM-PON). L'objectif majeur était de mettre en place de nouvelles approches performantes permettant d'offrir une flexibilité favorable aux opérateurs confrontés à des contraintes de déploiement, liées notamment aux difficultés d'acquisition des sites ou à des limitations physiques de câblage sur différents sites, et une gestion efficace des ressources tout en minimisant les coûts résultants.

C'est pourquoi il nous a paru intéressant de commencer ce mémoire par une étude du réseau optique passif PON et son évolution suit par une description des éléments constitutifs présents dans le PON tels que l'ONTU, l'OLT, compléments, ainsi que l'intégration de multiplexage de longueur d'onde WDM dans un PON, et les contraintes limitant le déploiement de ce réseau dans des zones difficile qui nécessitent des liaisons radio sans fil.

Une étude théorique dans le deuxième chapitre d'un système radio sur fibre avec les différentes technique de transport nous a permet de déterminer quels sont les paramètres optiques et radio qui limitent la propagation des différents signaux radio. Au cours de troisième chapitre on a présenté le système RoF-WDM-PON et les types d'implantation RoF dans un PON. On a sélectionné la technique en bande de base, la modulation de phase et la détection auto-hétérodyne pour générer les signaux radio pour une application de la technologie RoF comme un réseau d'accès sans fil de type WiMax.

Le quatrième chapitre est divisé sur deux partie, nous avons présenté dans la première partie, le logiciel de simulation OptiSystem et les critères de qualité pour évaluer la performance du réseau RoF-WDM-PON, dans la deuxième partie, on a décrit et simulé les deux liaisons montante et descendante du réseau RoF-WDM-PON, les résultats obtenus sont également discutés et interprétés.

Cette étude est une ouverture pour étudier des systèmes plus complexes avec la modulation OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) pour augmenter le nombre des utilisateurs et offre un service RF pour les clients par la transmission de plusieurs porteuses radio sur une même longueur d'onde.

**GLOSSAIRE**

<b>ADSL</b>	Asymmetric Digital Subscriber Line
<b>APON</b>	ATM Passive Optical Network
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode
<b>BPON</b>	Broadband Passive Optical Network
<b>BS</b>	Base Station
<b>CS</b>	Central Station
<b>CWDM</b>	Coarse Wavelength Division Multiplexing
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>DBR</b>	Distributed Bragg Reflector Laser
<b>DFB</b>	Distributed Feedback laser
<b>EAM</b>	Electro Absorbation Modulator
<b>EML</b>	Externally Modulated Laser
<b>EPON</b>	Passive Optical Network
<b>Fi-Wi</b>	Fiber- Wireless
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FTTx</b>	Fiber To The X
<b>FTTC</b>	Fiber To The Curb
<b>FTTB</b>	Fiber To The Building
<b>FTTH</b>	Fiber To The Home
<b>FP</b>	FabryPérot laser
<b>FSAN</b>	Full Service Access Network
<b>GE-PON</b>	Gigabit-Ethernet Passive Optical Network
<b>GPON</b>	Gigabit Passive Optical Network
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IF</b>	Intermediate Frequency
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform
<b>LOS</b>	Line Of Sight
<b>MIA</b>	Modulation d'Impulsionen Amplitude
<b>MMF</b>	Multi-Mode Fiber

## *GLOSSAIRE*

---

<b>MS</b>	Mobile Station
<b>MZM</b>	Mach-Zehnder Modulator
<b>NF</b>	Noise Factor
<b>NLOS</b>	Non Line Of Sight
<b>NGPON</b>	Passive Optical Network
<b>NRZ</b>	Non-Retour à Zéro
<b>ODF</b>	Optical Distribution Frame
<b>ODN</b>	Optical Distribution Network
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
<b>OLT</b>	Optical Line Terminal
<b>ONT</b>	Optical Network
<b>ONU</b>	Optical Network Unit
<b>P2MP</b>	Point To Multipoint
<b>P2P</b>	Point To Point
<b>PIN</b>	Positive Intrinsic Negative
<b>PON</b>	Passive Optical Network
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QoS</b>	Quality of services
<b>QPSK</b>	Quaternary Phase Shift Keying
<b>RAU</b>	Remote Antenna Units
<b>RIN</b>	Relative Intensity Noise
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RoF</b>	Radio Over Fiber
<b>SMF</b>	Single Mode Fiber
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>UIT-T</b>	Union International Telecommunication
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access