

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de Fin d'Etude**  
*pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique*  
Domaine : **Sciences et Techniques**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

---

---

**Etude d'un Réseau d'Accès OFDM-PON**

---

---

Présenté par :

**Tidiani Mathieu Diarra**

Sous la direction de :

**Pr. ABED DJAMEL**

juin 2022

## Remerciements

Mes remerciements reviennent en premier lieu à Allah, le Tout Puissant, le Clairvoyant, pour tous ses indénombrables bienfaits ; pour m'avoir accordé la force, le courage et la volonté à finir ce travail.

« Si vous êtes reconnaissants, très certainement, J'augmenterai [Mes bienfaits] pour vous. » {Sourate Ibrahim : verset 7}

Je tiens à remercier chacun des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner et d'évaluer mon travail.

Je souhaite également exprimer ma sincère reconnaissance à mon tuteur de thèse, Pr ABED DJAMEL, qui s'est montré à l'écoute et disponible pour m'orienter et me conseiller tout au long de mon projet.

Comment pouvoir être là à remercier toutes ces personnes si l'on ne pas enseigné et formé au cours de mon cursus universitaire. Merci à tous ces enseignants qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et m'ont permis d'être là aujourd'hui.

Ces remerciements seront inachevés si je ne parle pas de toutes ces personnes qui ont été présentes par des conseils, par des encouragements ou encore par des invocations pour me voir réussir un jour. A toute ma famille, à tous mes amis, merci.

« Celui qui ne remercie pas les gens n'a pas remercié Allah ». {Hadith rapporté par Abou Daoud dans ses Sunan n°4811}

# Dédicaces

A tous ceux qui ont un jour cru en moi.

A tous ceux qui m'ont encouragé.

Ceci n'aurait pas été possible sans vous.

*Diarra Tidiani Mathieu*

# Table des matières

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I :</b> .....	<b>3</b>
<i>État de l'Art sur les Réseaux d'Accès</i> .....	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2 Réseau xDSL</b> .....	<b>4</b>
I.2.1 Principe de l'ADSL.....	5
I.2.2 Spectre de fréquence de l'ADSL .....	6
<b>I.3 Réseau FTTH</b> .....	<b>7</b>
I.3.1. Réseaux PON .....	7
I.3.2 Avantages et inconvénients .....	9
I.3.3. Arbre optique passif (PON) .....	10
<b>I.4. Différentes Configurations :</b> .....	<b>11</b>
I.4.1. La configuration FTTH .....	11
I.4.2. La configuration FTTN .....	12
I.4.3. La configuration FTTB .....	14
<b>I.5. Avantages et inconvénients de ces différentes configurations</b> .....	<b>14</b>
I.5.1. La configuration FTTC.....	14
I.5.2. La configuration FTTN .....	15
I.5.3. La configuration FTTH .....	15
I.5.4. La configuration FTTB .....	15
<b>I.6. Les Topologies d'un Réseau d'Accès</b> .....	<b>15</b>
I.6.1. Architecture point à point .....	16
I.6.2. Architecture point à multipoint active.....	17
I.6.3. Architecture point-à-multipoint passif (PON) .....	18
<b>I.7 Conclusion</b> .....	<b>19</b>
<i>Chapitre II</i> .....	<b>20</b>
<i>La Modulation OFDM</i> .....	<b>20</b>

<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>21</b>
<b>II.2 Notion de Modulation Multi-Porteuses .....</b>	<b>21</b>
<b>II.3 Format de Modulation OFDM.....</b>	<b>22</b>
II.3.1 Notion d'Orthogonalité.....	22
II.3.2 Modulateur OFDM .....	23
II.3.3 Démodulateur OFDM .....	26
<b>II.4 Conclusion .....</b>	<b>27</b>
<i>Chapitre III .....</i>	<b>28</b>
<i>Résultats de simulation d'un OFDM-PON .....</i>	<b>28</b>
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>29</b>
<b>III.2 L'outil VPI .....</b>	<b>29</b>
III.2.1 Interface utilisateur graphique .....	29
III.2.2 Hiérarchies de simulation .....	30
<b>III.3 Schéma bloc du système OFDM-optique .....</b>	<b>32</b>
<b>III.4 Modélisation du système OFDM .....</b>	<b>32</b>
III.4.1 Codeur OFDM.....	32
III.4.2 Décodeur OFDM.....	33
<b>III.5 Modélisation du lien optique.....</b>	<b>34</b>
III.5.1 Modélisation du récepteur .....	34
III.5.1.1 Photodiode PIN .....	35
III.5.1.2 Photodiode a avalanche (APD).....	35
III.5.2 Le laser .....	36
III.5.3 La fibre optique.....	36
<b>III.6 Liaison sans fil 5G (onde millimétrique sur fibre) .....</b>	<b>38</b>
III.6.1 Comparaison des diagrammes de constellation pour différentes longueurs de la fibre.....	38
III.6.2 Effet de la modulation QAM sur le SER et le diagramme de constellation .....	40
III.6.3 Effet du nombre de porteuses sur le SER.....	41
<b>III.7 OFDM pour le réseau d'accès.....</b>	<b>42</b>
III.7.1 Comparaison entre les modulations mQAM et mPSK.....	43

<b>III.8 Comparaison entre un système radio sur fibre et un système OFDM pour les réseaux d'accès .....</b>	<b>46</b>
III.8.1 Comparaison par rapport à la longueur de la fibre optique.....	46
III.8.1.1 Pour la chaîne radio sur fibre .....	46
III.8.1.2 Pour une chaîne OFDM pour réseau d'accès.....	47
III.8.2 Comparaison par rapport au taux de symbole .....	47
III.8.2.1 Pour la chaîne radio sur fibre .....	47
III.8.2.2 Pour une chaîne OFDM pour réseau d'accès.....	48
<b>III.9 Conclusion.....</b>	<b>48</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>49</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>50</b>

## Listes des Figures

<b>Figure I.1:</b> Spectre de fréquence spécifique à la technologie ADSL.....	7
<b>Figure I.2 :</b> Les réseaux PON.....	8
<b>Figure I.3 :</b> les fenetre d'utilisation.....	8
<b>Figure I.4 :</b> Raccordement en fibre optique PON.....	10
<b>Figure I.5 :</b> Architecture FTTH.....	12
<b>Figure I.6:</b> Principe d'une architecture FTTN.....	13
<b>Figure I.7 :</b> Architecture FTTC.....	13
<b>Figure I.8:</b> Architecture FTTB.....	14
<b>Figure I.9 :</b> Architecture du réseau d'accès optique point à point.....	16
<b>Figure I.10:</b> Architecture du réseau d'accès optique point à multipoint actif.....	17
<b>Figure I.11:</b> Architecture du réseau d'accès optique point-à-multipoint passif (PON)..	18
<b>Figure II.1 :</b> Classification des Modulations Multi-Porteuses.....	21
<b>Figure II.2 :</b> Base Orthogonale en Temps.....	22
<b>Figure II.3 :</b> Base Orthogonale en Fréquence.....	23
<b>Figure II.4 :</b> Schéma Fonctionnel d'un Modulateur OFDM.....	24
<b>Figure II.5 :</b> Techniques d'Insertion de l'Intervalle de Garde (GI).....	25
<b>Figure II.6 :</b> Schéma Fonctionnel d'un Démodulateur OFDM.....	26
<b>Figure III.1</b> Interface utilisateur graphique.....	30
<b>Figure III.2</b> Hiérarchie VPI [manuel VPI].....	31
<b>Figure III.3</b> Schémas du système OFDM-optique.....	32
<b>Figure III.4</b> Module codeur OFDM [VPI].....	33
<b>Figure III.5</b> Codeur OFDM (et décodeur) Editeur de paramètres [VPI].....	33
<b>Figure III.6</b> Décodeur OFDM.....	34
<b>Figure III.7</b> module photodiode [vpi].....	34
<b>Figure III.8</b> photodiode éditeur de paramètre [vpi].....	35

Figure III.9 module laser [vpi].....	36
<b>Figure III.10</b> éditeur de paramètre du laser.....	36
<b>Figure III.11</b> module de la fibre optique [vpi].....	37
<b>Figure III.12</b> éditeur de paramètre de la fibre optique.....	37
<b>Figure III.13</b> chaine de transmission radio sur fibre d'une liaison 5G sans fil vpi.....	38
<b>Figure III.14 (a)</b> diagramme de constellation pour une fibre de longueur 50km.....	39
<b>Figure III.14 (b)</b> diagramme de constellation pour une fibre de longueur 100km.....	39
<b>Figure III.14 (c)</b> diagramme de constellation pour une fibre de longueur 150km.....	40
<b>Figure III.15 (a)</b> variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 4 QAM.....	40
<b>Figure III.15 (b)</b> variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 16 QAM.....	41
<b>Figure III.15 (c)</b> variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 64QAM.....	41
<b>Figure III.16 (a)</b> variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 16 porteuses.....	42
<b>Figure III.16 (b)</b> variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 32 porteuses.....	42
<b>Figure III.17</b> chaine de transmission OFDM pour le réseau d'accès.....	43
<b>Figure III.18 (a)</b> variation du SER par rapport à l'indice de sous porteuses pour 4PSK..	43
<b>Figure III.18 (b)</b> spectre optique 4PSK.....	44
<b>Figure III.18 (c)</b> diagramme de constellation 4PSK.....	44
<b>Figure III.19 (a)</b> variation du SER par rapport à l'indice de sous porteuses pour 4QAM.....	45
<b>Figure III.19 (b)</b> spectre optique pour 4QAM.....	45
<b>Figure III.19 (c)</b> diagramme de constellation pour 4QAM.....	46
<b>Figure III.20</b> variations du SER pour une chaine radio sur fibre.....	47
<b>Figure III.21</b> variations du SER pour une chaine OFDM pour réseau d'accès.....	47
<b>Figure III.22</b> diagramme de constellation pour une chaine radio sur fibre.....	48
<b>Figure III.23</b> diagramme de constellation pour une chaine OFDM pour le réseau d'accès.....	48

## Liste des Abréviations

<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise.
<b>AON</b>	Active Optical Network
<b>ADSL</b>	Asymmetric Digital Subscriber Line
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>CP</b>	Cyclic Prefix
<b>CO</b>	Central Office
<b>DC</b>	Direct Current
<b>DFT</b>	Discrete Fourier Transform
<b>DSP</b>	Digital Signal Processing
<b>DMT</b>	Discrete Multi-Tone Modulation
<b>FTTN</b>	Fiber To The Node
<b>FTTC</b>	Fiber To The Curb
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FTTH</b>	Fiber To The Home
<b>FTTx</b>	Fiber To The 'x'
<b>HSPA</b>	High Speed Packet Access
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>IDFT</b>	Inverse Discrete Fourier Transform
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IEP</b>	Interférence Entre Porteuses
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform
<b>IM</b>	Intensity Modulation
<b>IM/DD</b>	Intensity-Modulation/Direct-Detection
<b>ISI</b>	Inter-Symbol Interference

<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>NG-PON</b>	Next Generation-Passive Optical network
<b>NRZ</b>	No-Return To Zero
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OOK</b>	On-OFF Keying
<b>OLT</b>	Optical Link Terminal
<b>ONU</b>	Optical Network Unit
<b>ONT</b>	Optical Network Terminal
<b>PAPR</b>	Peak-To-Average Power Ratio
<b>P2MP</b>	Point To Multipoint
<b>P2P</b>	Point To Point
<b>PON</b>	Passive Optical Network
<b>POTS</b>	Plain Old Téléphone Service
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RDO</b>	Réseau De Distribution Optique
<b>SNR</b>	Signal Noise Ratio
<b>SER</b>	Symbol Error Rate
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>VPI</b>	Virtual Photonics Integrated
<b>WDM</b>	Wavelength Division Mutiplexing
<b>Wifi</b>	Wireless Fidelity
<b>xDSL</b>	Digital Subscriber Line

## Résumé :

Les réseaux d'accès optiques connaissent actuellement une évolution très rapide qui accompagne le développement de l'Internet et des services de télécommunication dans le monde entier. On dispose de différents types de technologies et d'architectures optiques FTTx, chacune de ces architectures présente les avantages et les limites, elles sont alors adoptées suivant les applications et les services, Parmi ses différentes implémentations on trouve le réseau optique passif PON (Passive Optical Network) qui est une référence en matière de réseaux d'accès très haut débit. Les solutions utilisant la fibre optique tendent à remplacer progressivement les liaisons câblées (cuivre ou coaxial) afin de garantir des capacités de transfert plus importantes. La fibre optique est un medium très attractif car son atténuation linéique est très faible et sa bande passante importante. Cependant la dispersion chromatique de la fibre associée au chirp des sources optiques limite la montée en débit dans les futurs réseaux d'accès optiques (débits au-delà de 10 Gb/s) NG-PON (Next Generation Passive Optical Network). Dans ce contexte, des formats de modulation à efficacité spectrale meilleure que le NRZ pourraient être retenus. L'OFDM est une solution pour accroître l'efficacité spectrale, tout en garantissant une meilleure performance et une grande robustesse face aux canaux sélectifs en fréquence comme la fibre optique.

Dans ce mémoire, nous étudions l'effet du nombre de porteuses, la longueur de la fibre, l'ordre de la modulation (QAM et PSK) sur les performances en termes du taux d'erreur de symbole et d diagramme de constellation d'un système OFDM optique. Nous avons implémenté la technique OFDM à détection directe en utilisant la fibre comme support de transmission. A travers les simulations effectuées avec le logiciel vpi, nous montrons que les performances de la technique OFDM optique dépendent fortement de la longueur de la fibre, du nombre de porteuses et de l'ordre de modulation.

Mots clés : OFDM, PON, liaison optique, FTTx.

## Introduction générale :

Récemment, le développement des moyens de télécommunication est devenu un souci majeur pour l'homme. En effet, depuis la mise au point du télégraphe par Samuel Morse et l'invention de téléphone par Alexander Graham Bell, le monde des télécommunications a connu d'importantes évolutions. Le transport de l'information par la lumière qui se propageant très vite dans une fibre optique a conduit à l'émergence des systèmes de transmission par fibre optique. La fibre optique présente des avantages parmi lesquels nous pouvons citer : une très faible atténuation du signal transmis, une insensibilité aux interférences extérieures ainsi qu'une absence d'échauffement. De plus, le débit de transmission au sein de la fibre est très élevé. Ce qui justifie l'important développement des réseaux optiques notamment la connexion des particuliers via la technologie FTTH (Fibre To The Home). Au cours des 15 à 20 années à venir, les réseaux d'accès en cuivre à travers le monde seront donc en grande partie remplacés par un réseau d'accès optique. Cependant, bien que les réseaux à fibre optique permettent d'atteindre des débits de plusieurs Gbits/s pour des pertes minimales, on se heurte en pratique à divers problèmes tels que les traitements électroniques avant modulation et après détection. Pour surmonter ces limitations et optimiser la transmission, différentes techniques de multiplexage et de codage sont envisagées. De même, le besoin croissant en termes de débit conduit à une augmentation du coût des composants optoélectroniques. Ainsi, la réduction du coût des composants émetteurs/récepteurs des futurs réseaux optiques (essentiellement dans l'accès), est l'un des défis majeurs des opérateurs dans leur course au déploiement. Il est alors nécessaire de trouver des moyens d'augmenter le débit permettant la réutilisation des infrastructures déjà existantes pour une rentabilité bas coût possible. La plupart des architectures de réseaux d'accès optiques sont basées sur l'utilisation de la modulation NRZ-OOK (Non-Return to Zero On-Off Keying) compte-tenu de ses émetteurs-récepteurs à faible complexité. Ce format de modulation n'émet qu'un seul bit d'informations par symbole. Cependant à cause du produit (débit×portée) limité par la dispersion chromatique de la fibre et des caractéristiques de l'émetteur, déployer du NRZ-OOK représente une limitation pour les futures générations de réseaux d'accès optiques. En clair, de nouvelles technologies doivent être considérées pour répondre aux besoins futurs tout en maintenant les plus bas coûts possibles en termes de fonctionnement et de déploiement (composants et réseaux). L'utilisation de techniques de modulations avancées présentant non seulement une efficacité spectrale (rapport entre débit et bande passante utile) meilleure que le NRZ mais aussi dotées d'une très grande robustesse contre les IES (Interférences entre Symboles) induites par la dispersion chromatique de la fibre, permettrait d'améliorer les

performances systèmes. Les modulations multi-porteuses dont l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) présentent ces avantages. Le traitement par les DSP (Digital Signal Processing) est aussi un moyen d'améliorer les performances des communications optiques par l'utilisation de codes correcteurs d'erreurs (FEC : Forward Error Correction). Les formats de modulations avancées plus spécifiquement les techniques OFDM ont été largement utilisées dans les radiocommunications tout comme en transmissions sur cuivre (techniques xDSL) où elles portent le nom de techniques DMT (Digital Multi Tone). Ainsi, de par sa maturité et l'existence sur le marché de composants optiques, l'introduction de la technologie OFDM dans les communications sur fibre optique se justifie par la nécessité non seulement d'augmenter le débit de transmission (donc d'accroître la capacité de transport), mais aussi d'utiliser des composants optiques semblables à ceux déjà maîtrisés en optique sans fil. La détection directe de l'OFDM est un bon choix pour les applications dans le PON à cause du revenu bas coût de l'architecture de leurs récepteurs en comparaison avec la détection cohérente.

Le manuscrit est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre décrit un état de l'art des réseaux d'accès, dans cette partie nous avons donné un aperçu avec une étude détaillée des réseaux filaires et les réseaux sans fils qui constituent principalement les réseaux d'accès.

Le chapitre 2 décrit un état de l'art de la couche physique OFDM, dans cette partie nous avons donné un aperçu avec une étude détaillée des différentes techniques de modulation OFDM.

En fin pour achever, nous terminons avec le chapitre 3 qui est l'élément essentiel de cette recherche basé sur la simulation dont l'étude consiste à évaluer les performances d'un système OFDM sur fibre dans le cas des réseaux d'accès en interprétant les résultats obtenues.

Par suite une conclusion générale et des perspectives concluent ce manuscrit.

# Chapitre I :

## État de l'Art sur les Réseaux d'Accès

## I.1 Introduction

Les réseaux d'accès connaissent un développement très rapide que ce soit au niveau de l'accès fixe, radio ou mobiles. En ce qui concerne les réseaux d'accès fixes, les débits fournis aux utilisateurs ont été en constante progression, tout d'abord, grâce à l'émergence de la technologie xDSL (quelques dizaines de mégabits par seconde) puis de la technologie fibre qui offre des débits pouvant en théorie atteindre plusieurs gigabits par seconde. Les réseaux d'accès radio et mobiles sont ceux préférés des clients et aussi des opérateurs (facilité de déploiement, coût moindre), car ils possèdent des propriétés de flexibilité et de mobilité. Cependant, ils présentent également quelques inconvénients tels qu'une bande passante limitée et des zones d'ombres radio. De nouvelles normes sont en cours d'élaboration telles que le HSPA (High Speed Packet Access) et LTE (Long Term Evolution) pour les réseaux mobiles. Actuellement est le WiFi (Wireless Fidelity) le système le plus employé Pour les réseaux domestiques. Il permet à l'utilisateur d'avoir accès sans contrainte (câbles, prise téléphonique ou réseau...) au réseau. Pour répondre à la demande de bande passante des utilisateurs, due à la croissance des services, les opérateurs de télécommunications ont commencé dans le monde entier à déployer la fibre optique dans le réseau d'accès. En effet, l'optique peut apporter un débit bien plus élevé par rapport à la paire de cuivre. Cette technologie d'accès optique est connue sous le nom FTTX (Fiber-To-The-X ou X indique l'endroit pour lequel la fibre s'arrête). La plupart des systèmes d'accès optique déployés aujourd'hui sont basés sur les technologies Gigabit PON (Passive Optical Network). Ce sont des réseaux optiques passifs à base d'une architecture point à multipoints fonctionnant au débit de 1,25 ou 2,5 Gb/s.

## I.2 Réseau xDSL

Cette technologie permet de numériser la partie terminale de la ligne de l'abonné et de faire supporter simultanément sur une paire de fils de cuivre le service téléphonique de base et des flux de données numériques à très haut débit. Elle nécessite l'installation d'un filtre et d'un modem spécifique à chaque extrémité du réseau (central téléphonique, équipement abonné). La technique de transmission asymétrique offre deux canaux destinés aux données, avec un débit maximal (de 8Mbit/s dans le sens réseau/abonné et

de 640 kbit/s dans le sens inverse) variable selon le code en ligne utilisé et la distance de raccordement. ADSL libère en outre un peu de bande passante pour conserver le canal téléphonique de 4 kHz. Cette technologie se trouve être adaptée au multimédia par Internet, le flux descendant (ou canal de diffusion) étant beaucoup plus important que le flux montant (ou canal d'interactivité) [I.1].

### **I.2.1 Principe de l'ADSL**

L'idée d'utiliser l'infrastructure déjà en place des paires téléphoniques reliant pratiquement chaque foyer à un central de son opérateur national était fort intéressante d'un point de vue économique, mais il s'est trouvé qu'il y avait aussi encore beaucoup à faire avec une simple paire de cuivre torsadée, dont l'utilisation qui en était faite avec le téléphone laissait énormément de marge qui jusque-là était encore totalement inexploitée. En effet, le service de téléphonie analogique traditionnel que nous connaissons (POTS : Plain Old Telephone Service) opère dans une bande de fréquence relativement restreinte s'étalant entre 300Hz et 3400Hz. Cela laisse une très large bande de fréquence au-dessus de la limite des 3400Hz de la voix complètement inexploitée, et c'est dans cette plage de fréquences que s'est immiscé ADSL, en laissant par la même occasion le service POTS totalement intact et non perturbé. Dès lors, ADSL s'est ouvert l'accès à des débits largement supérieurs à ceux qui étaient alors offerts à travers la ligne téléphonique avec un modem 56 kbits/s ou même ISDN et ses 64 kbits/s, et c'est sans installer le moindre câble supplémentaire entre le domicile de l'abonné et les installations centrales. Il suffit simplement de filtrer les deux types de communications aux deux extrémités de la ligne d'abonné : à domicile au niveau de la prise téléphonique, et à quelques kilomètres de là au niveau du répartiteur du central d'abonné auquel la ligne est raccordée. Pour exploiter au mieux toute la bande passante disponible sur une paire téléphonique, dont le spectre de fréquence est compris entre 0 et 1,104 MHz, ADSL pratique la division de la largeur de bande totale en 256 sous-canaux distincts espacés de 4,3125 kHz. Les canaux inférieurs sont généralement réservés au POTS, ainsi les canaux 1 à 6 (jusqu'à 25,875 kHz) sont en principe laissés pour la téléphonie analogique, et dans le cas d'une ligne numérique ISDN, ce sont les canaux 1 à 28 (jusqu'à 125 kHz) qui sont laissés intacts pour la transmission de la voix. Les canaux restants sont donc entièrement dédiés à l'ADSL, qui les sépare en deux groupes distincts dédiés au flux montant d'une part, et au flux descendant de l'autre.

La division de la largeur de bande totale en sous-canaux distincts et égaux est obtenue grâce à une technique de modulation propre à ADSL, il s'agit de la modulation dite DMT (pour Discrete Multi Tone).

En général, on utilise les canaux inférieurs pour le débit upstream car les équipements des utilisateurs ont une puissance d'émission plus faible que l'équipement installé au central donc en émettant dans les fréquences inférieures, le signal subira une plus faible atténuation et on utilise les canaux supérieurs pour le débit downstream car les équipements situés au central sont fortement perturbés par les appareils de transmission en fréquences élevées donc il apparaît plus efficace d'émettre dans les canaux supérieurs afin de bénéficier d'un meilleur rapport signal/bruit.

En contrepartie, la technologie ADSL profite d'une nouvelle génération de processeurs DSP (Digital Signal Processor) plus puissants et aptes à exécuter une transmission simultanée et des corrections indispensables aux débits fournis, de manière à réduire les effets du bruit sur la ligne, qui s'y trouve de plus en plus vulnérable, plus les signaux qui l'empruntent montent en fréquence.

Cela permet une meilleure utilisation de la paire téléphonique et des performances accrues, mais il n'en reste pas moins qu'ADSL possède aussi ses limites [I.2] [I.3].

### **I.2.2 Spectre de fréquence de l'ADSL**

Le spectre de fréquences ADSL héberge trois canaux : un canal de diffusion haut débit dans le sens réseau-abonné pour recevoir des données (débit de plusieurs Mbit/s), un autre canal de diffusion dans le sens abonné-réseau pour émettre, qui ne demande pas un débit important : par exemple 640 kbit/s pour interagir sur cette diffusion et transmettre des données de la part de l'utilisateur, et un canal réservé à une communication téléphonique classique.

La base du système est constituée d'un multiplexeur d'accès ADSL qui multiplexe les flux voix provenant des réseaux de commutation de circuit et le flux vidéo en provenance du réseau haut débit. Chez l'utilisateur, une terminaison numérique ADSL achemine le flux voix vers le poste téléphonique et le flux vidéo vers le récepteur de télévision. Les modems effectuent un traitement spécifique du signal pour réduire l'influence du bruit et supprimer les échos parasites. Ces techniques permettant d'atteindre un débit de plusieurs Mbits/s sur une distance de quelques kilomètres.

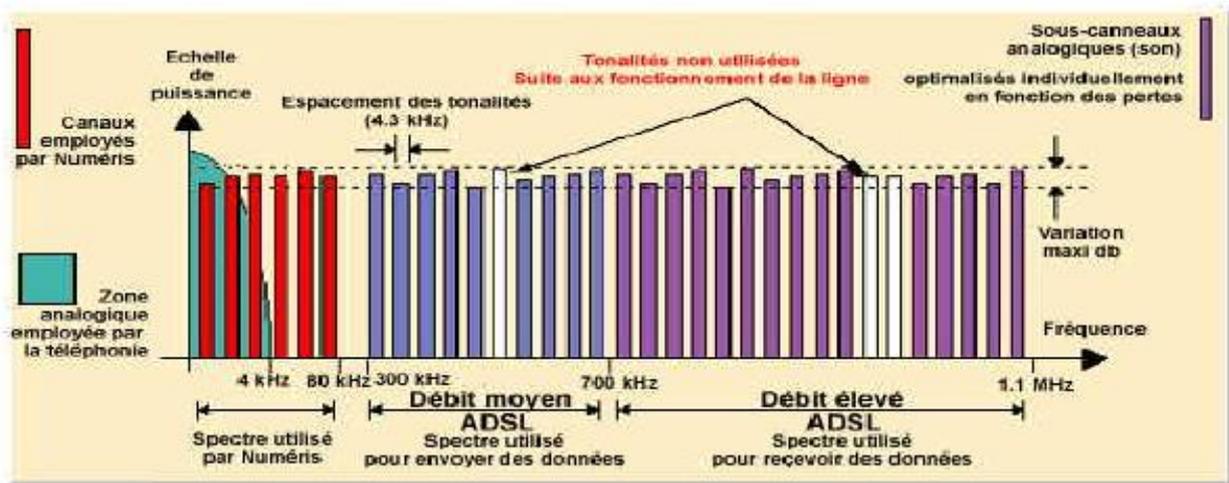


Figure I.1: Spectre de fréquence spécifique à la technologie ADSL

### I.3 Réseau FTTH

Après les techniques xDSL, on a estimé que la fibre optique pouvait se rapprocher du domicile de l'utilisateur et de l'entreprise. On assiste aujourd'hui à l'émergence des nouveaux réseaux d'accès larges bandes nommé PON (Passif Optical Network). Grâce à l'arrivée de ces réseaux optiques passifs, avec une bande passante approchant les 30 THz, des nouvelles technologies ont été développées pour gérer des communications à très haut débit (de l'ordre du Gbit/s) [I.4].

#### I.3.1. Réseaux PON

Un PON est un réseau d'accès optique dans lequel une fibre simple est étirée du central téléphonique et est détournée vers divers clients et utilisateurs à l'aide des diviseurs passifs. C'est un Système de transmission FTTx (Fiber To The x) très haut débit conçu pour livrer à faible coût des services à haute largeur de bande aux domiciles des particuliers.

PON est une infrastructure qui peut porter des services multiples tels que les voix (voix sur IP, de service ou de voix téléphonique), les données, la vidéo, et/ou la télémétrie. La transmission se fait sur une seule fibre optique en utilisant du multiplexage de longueur d'onde (WDM).

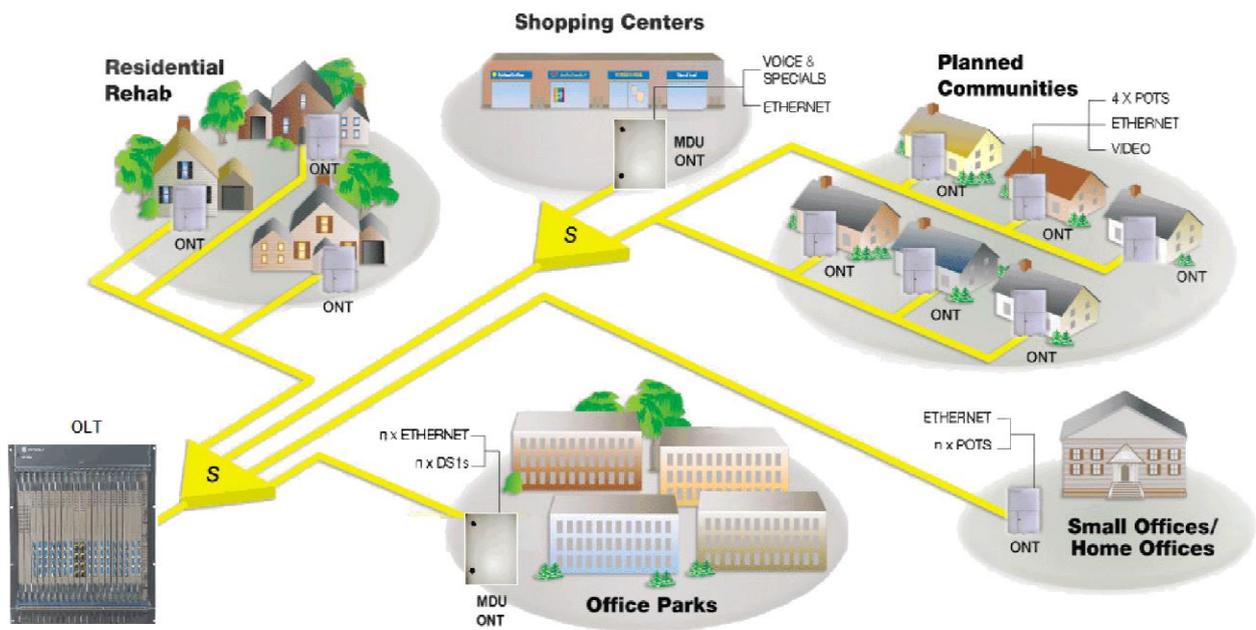


Figure I.2 : Les réseaux PON

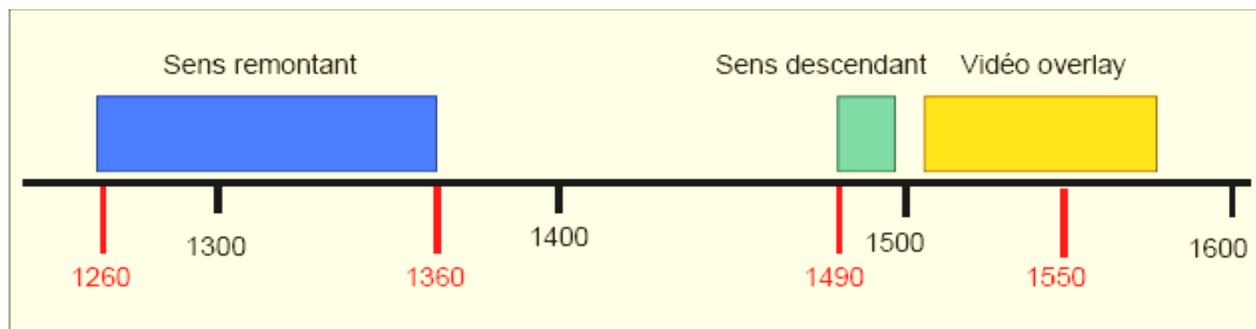


Figure I.3 : les fenetre d'utilisation

Le PON dépend du partage des ressources d'usines de fibres et de bureaux centraux qui utilisent typiquement des protocoles soit Ethernet soit SONET. Ci-dessous, un simple diagramme illustrant les caractéristiques clés d'un PON.

- Un réseau optique passif est constitué principalement par les trois équipements de réseau suivants :
  - Le terminal de ligne optique (TLO ou OLT).
  - Le réseau de distribution optique (RDO).
  - Les terminaisons de réseau optique (TRO ou ONT).

Le réseau PON comporte un seul laser haute puissance situé au bureau central (Central Office/CO) qui envoie ses couleurs de lumière vers les utilisateurs finaux et les domiciles privés. Près de ces domiciles, cette lumière passe à travers un splitter et le signal est simultanément partagé ou émis vers tous les utilisateurs. Lorsque la lumière se partage entre de multiples chemins, elle perd beaucoup de son intensité. Ceci signifie que les récepteurs dans les maisons doivent être très sensibles pour pouvoir recevoir avec précision le signal de lumière laser venant du bureau central.

La même fibre qui livre des signaux de lumière vers chacune des maisons est également utilisée pour envoyer la lumière en retour des maisons. Ceci demande notamment des lasers relativement brillants et des récepteurs sensibles. Chaque maison possède son transmetteur propre, et les signaux en sortie sur le chemin de sortie, ou « reverse path », doivent être coordonnés pour qu'un seul transmetteur envoie à n'importe quel moment donné. Les foyers sont planifiés pour envoyer leurs signaux de sorte qu'ils puissent partager une seule fibre optique [I.5].

### **I.3.2 Avantages et inconvénients**

- ✓ Equipements passifs
  - ✓ Coûts d'installation réduits par rapport à un architecture active
  - ✓ Coûts de maintenance plus faibles
  - ✓ Pas d'équipements actifs à maintenir dans les rues
  - ✓ Portée jusqu'à 20 km
  - ✓ Différentes boîtes d'abonnés : Au pied de l'immeuble
  - ✓ Transport de flux Hertziens en DWDM, possibilité de TV analogique chez l'abonné.
- ❖ **Absorption/atténuation**
    - ✓ Au niveau du fibre (1310 nanomètres)
    - ✓ Au niveau de splitter/coupleur
  - ❖ **Dispersion (1490/1550nm)**
    - ✓ Laser
    - ✓ Chromatique, seulement à 2.5 Gbit/s
  - ❖ **Effet de non linéarité**
    - ✓ À 1550 nm pour une puissance importante.

### I.3.3. Arbre optique passif (PON)

Plusieurs types de raccordement en fibre optique (FITL, Fiber in the Loop) sont disponibles aujourd'hui. L'augmentation de la capacité de la fibre, de sa portée, et l'emploi de la technique du multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing) ont conduit les exploitants à rechercher des composants et des montages susceptibles d'offrir les coûts les plus faibles pour une distribution de débit la plus élevée. Le marché visé est en premier lieu celui des entreprises disposant de puissance de calcul informatique en rapport avec ces performances de communication numérique. Les entreprises sont placées devant une gamme de solutions de raccordement en fibre optique qui associent leur réseau local d'entreprise Ethernet au réseau métropolitain ou au réseau à grande distance. Par rapport aux autres procédés impliquant le recours à des protocoles de type ATM ou IP, ces types de raccordement combinent la simplicité, la réduction du temps de transit et une plus grande fiabilité. Ils doivent permettre de disposer d'un débit élevé sur la terminaison optique d'abonné (ONU). L'arbre optique passif (ou Passive Optical Network) permet de distribuer des débits importants. Une terminaison de ligne optique (OLT) est reliée en fibre optique à un équipement passif de répartition (POS, Passive Optical Splitter) ou diviseur, qui distribue les signaux télévisuels par l'intermédiaire de fibres optiques d'abonnés (voir Figure). Comme pour les autres systèmes de raccordement précédents, la distribution et l'interactivité vers les fournisseurs d'information doivent être assurées [I.6].

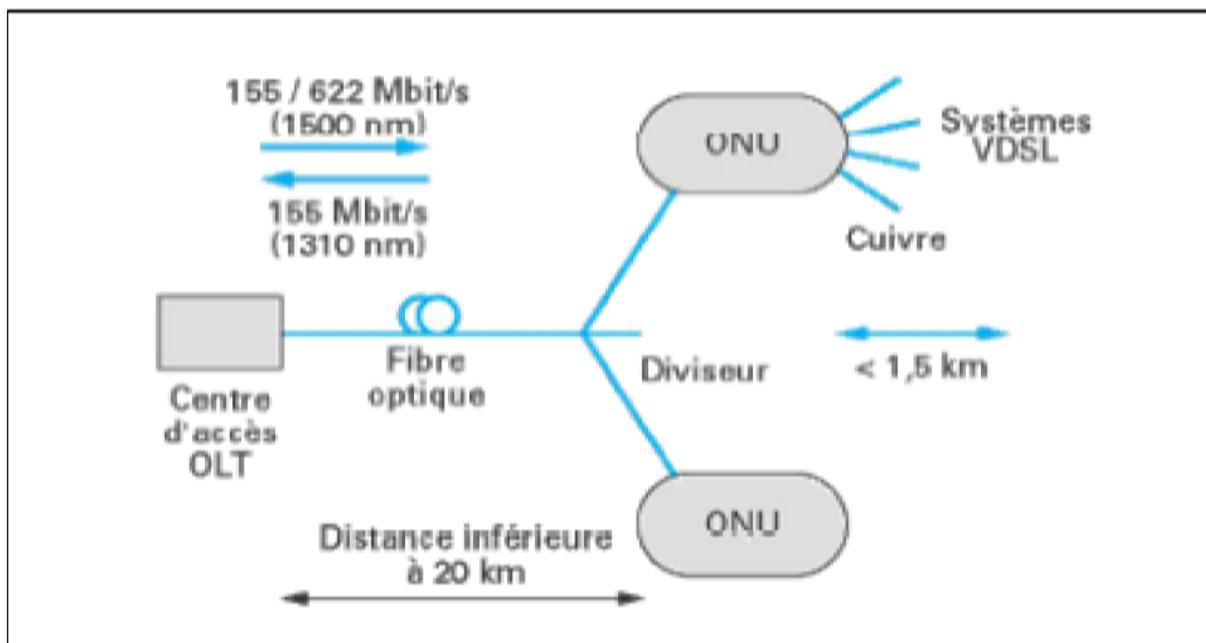


Figure I.4 : Raccordement en fibre optique PON

## I.4. Différentes Configurations :

Le réseau de distribution optique est toujours constitué par une partie en fibre optique entre le nœud d'accès (NADO) et la terminaison de réseau optique (TRO) suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. Selon la localisation de la terminaison de réseau optique, différentes configurations sont envisageables. Elles sont désignées par des sigles anglo-américains composés de quatre lettres dont les trois premières FTT signifient "Fiber To The" et la quatrième précise la destination :

- ✚ N comme Node (nœud),
- ✚ C comme Curb (trottoir),
- ✚ B comme Building (immeuble),
- ✚ H comme Home (maison),
- ✚ O comme Office (bureau).

### I.4.1. La configuration FTTH

Un réseau **FTTH**, pour **Fiber To The Home** (ce qui signifie « fibre jusqu'au foyer », ou « fibre optique à domicile ») est un réseau de télécommunications dont la partie terminale (arrivant à l'abonné) est constitué de fibres optiques. Ce réseau succède au réseau basé sur la boucle locale sur lequel s'appuient les modems ADSL, constitué de câbles de téléphonie. Les débits en FTTH peuvent atteindre 2 Gbit/s dans chaque sens, soit des débits 100 fois supérieurs à ceux accessibles via la boucle locale. Comparable au câble dans son installation, puisqu'il nécessite la pose de fibres optiques jusque chez l'abonné, le FTTH est principalement utilisé dans les zones urbanisées en raison de son coût élevé de déploiement. Il est toutefois bien adapté aux zones rurales car la fibre optique offre l'avantage de pouvoir transporter le signal sans dégradation sur de longues distances, contrairement à la paire de cuivre de la boucle locale.

Dans les configurations **FTTH** et **FTTO**, la terminaison de réseau optique qui est propre à un abonné donné est implantée dans ses locaux. La fibre optique va donc jusqu'à son domicile ou son bureau et la partie terminale en cuivre est très courte.

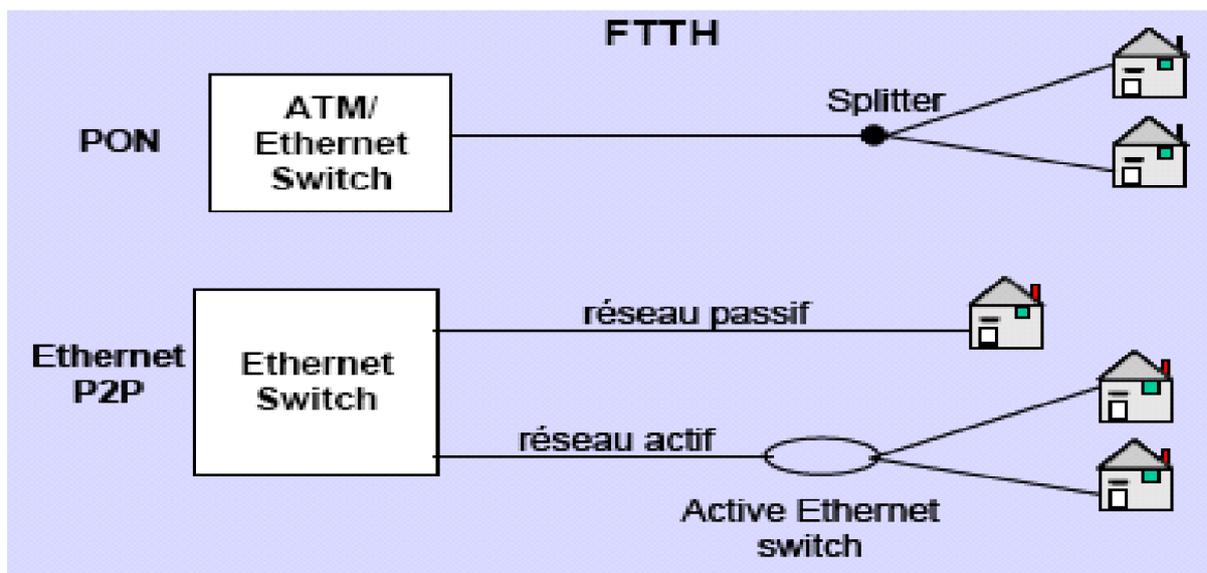


Figure I.5 : Architecture FTTH

Comme l'indique la Figure I.5 ci-dessus, plusieurs solutions de desserte jusqu'à l'abonné peuvent être mises en œuvre. On distingue en premier lieu les solutions point à multipoint (P2MP) et point à point (P2P). Dans le premier cas, un réseau est optimisé pour desservir plusieurs utilisateurs, les fibres optiques ne leur étant pas dédiées directement. Dans le deuxième cas, chaque utilisateur se voit attribuer une fibre optique dédiée de bout en bout. Ensuite, une autre distinction majeure réside dans l'architecture elle-même qui peut être passive ou active. Certains réseaux FTTH en point à point sont des réseaux dits actifs car ils nécessitent la mise en place de Switch Ethernet intermédiaires.

On parle alors d'AON (Active Optical Network) ou d'Active Ethernet. Les solutions passives quant à elles, également baptisées PON (Passive Optical Network), sont plus récentes : les équipements intermédiaires entre le central office et l'utilisateur sont des équipements optiques ne nécessitant pas d'alimentation électrique et sont donc considérés comme passifs, à la différence des composants (actifs) mis en œuvre dans le cadre d'un déploiement FTTN par exemple.

#### I.4.2. La configuration FTTN

Le FTTN (Fiber To The Node), correspond à une installation dans laquelle le câble arrive à un point de distribution (pouvant être le sous-répartiteur) desservant un ensemble de

bâtiments ; la terminaison s'appuie ensuite sur le réseau cuivre par exemple ou est effectuée par liaison radio.

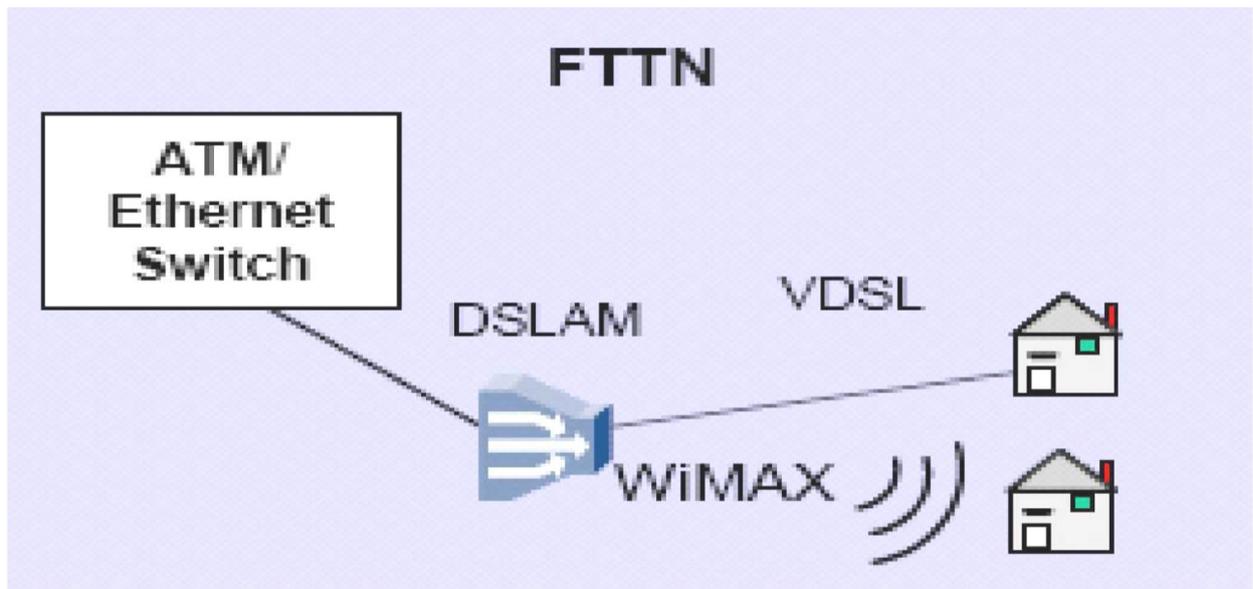


Figure I.6: Principe d'une architecture FTTN

Dans la configuration FTTC, la terminaison de réseau optique est localisée soit dans une chambre souterraine, soit dans une armoire sur la voie publique, soit dans un centre de télécommunications, soit sur un poteau. Selon le cas, il est envisagé de réutiliser le réseau terminal en cuivre existant (sur câble à paires symétriques ou coaxial) ou de mettre en œuvre une distribution terminale par voie radioélectrique.

Le FTTC (Fiber To The Curb) a la même signification technique que FTTN, cependant, sans que la définition soit formalisée, la zone desservie en FTTN est généralement considérée comme plus large que celle desservie en FTTC [I.7].

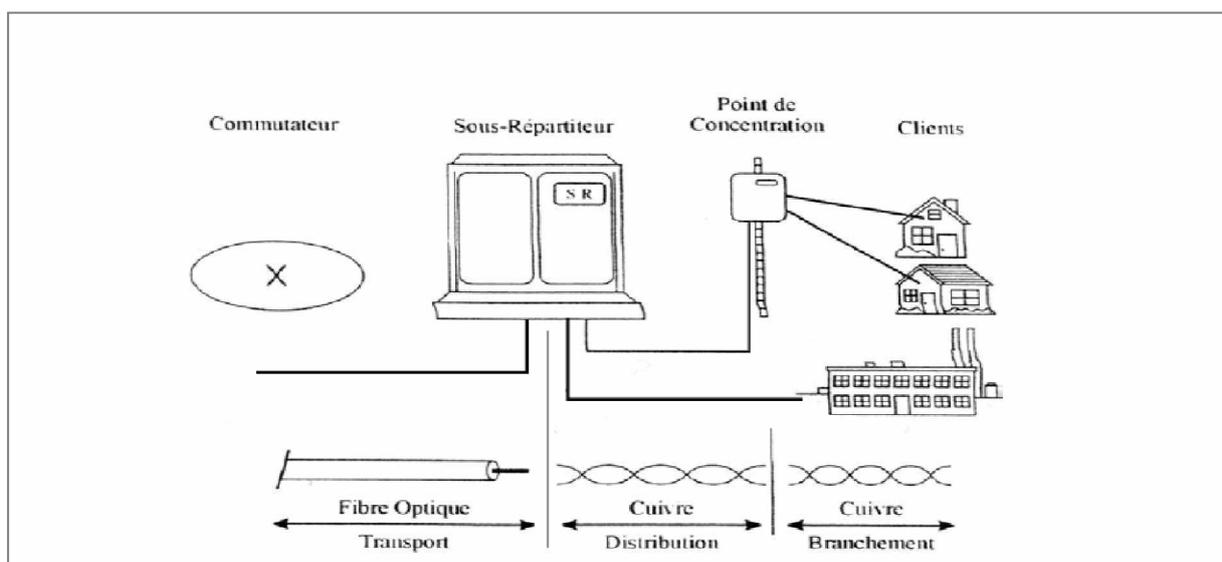


Figure I.7 : Architecture FTTC

### I.4.3. La configuration FTTB

Dans la configuration FTTB, la terminaison de réseau optique passif est localisée soit au pied de l'immeuble, soit dans un local technique généralement situé en sous-sol, soit dans une armoire ou un conduit sur le palier. Elle est généralement partagée entre plusieurs abonnés qui lui sont raccordés par des liaisons en fil de cuivre.

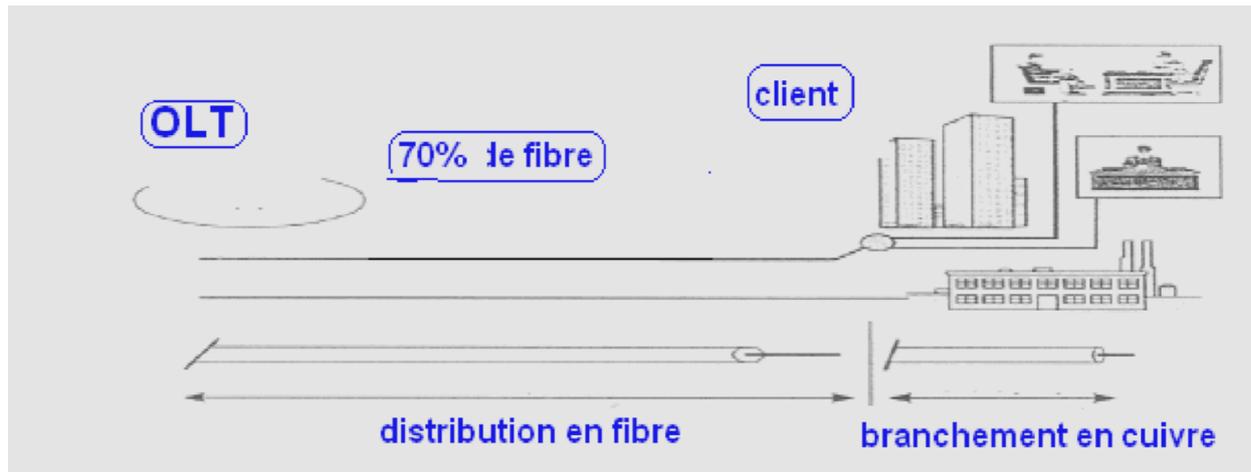


Figure I.8: Architecture FTTB

## I.5. Avantages et inconvénients de ces différentes configurations

### I.5.1. La configuration FTTC

Présente l'avantage théorique de permettre la réutilisation de la chevelure terminale en cuivre et partager le système de transmission optique entre plusieurs abonnés ce qui le rend économiquement compétitif pour la desserte de clients résidentiels ou petits professionnels. Cette configuration a cependant l'inconvénient de nécessiter l'implantation de bornes (sous répartiteur), ce qui pose des problèmes d'environnement climatique et électromagnétique, de sécurisation (possibilité d'effraction, de chocs), d'esthétique, et exige l'obtention d'une autorisation municipale. Il faut également alimenter ces bornes à partir d'une source d'énergie locale, ou par télé alimentation à partir du réseau ou de l'installation de l'utilisateur. La réutilisation de la chevelure terminale en cuivre présente, par ailleurs, l'inconvénient de limiter les évolutions ultérieures en termes de débit des services fournis à l'utilisateur.

### **I.5.2. La configuration FTTN**

La fibre est amenée jusqu'à l'entrée d'une zone de sous répartition, voire de répartition nécessite de disposer d'un bâtiment pour abriter la terminaison de réseau optique. Elle permet un partage intéressant du point de vue économique des équipements NADO et TRO, et la réutilisation du réseau terminal en cuivre. Elle nécessite cependant pour les services à haut débit la mise en place de systèmes de raccordements actifs entre la TRO et les usagers.

### **I.5.3. La configuration FTTH**

Présente l'avantage de ne pas nécessiter l'introduction d'équipements actifs dans le réseau et évite en cela les inconvénients des solutions FTTC et FTTN. Le fait d'amener la fibre optique jusque chez l'abonné permet par ailleurs de disposer de bout en bout d'un support de transmission dont les caractéristiques autorisent une large évolution en termes de débit et de service. C'est donc la solution idéale du point de vue technique, mais elle a l'inconvénient d'être chère aujourd'hui, en particulier si la fibre optique n'est pas partagée entre plusieurs usagers. Il faut également multiplier et disperser les alimentations sécurisées.

Pour toutes ces raisons, ce sont les configurations FTTB ou FTTC qui ont généralement été retenues dans les expériences d'introduction de fibres optiques en distribution menées aujourd'hui dans divers pays. Mais la configuration FTTH suscite des recherches actives sur les composants et dispositifs à bas coût, par exemple les émetteurs-récepteurs intégrés, les connecteurs... afin de la rendre éventuellement compétitive dans l'avenir.

### **I.5.4. La configuration FTTB**

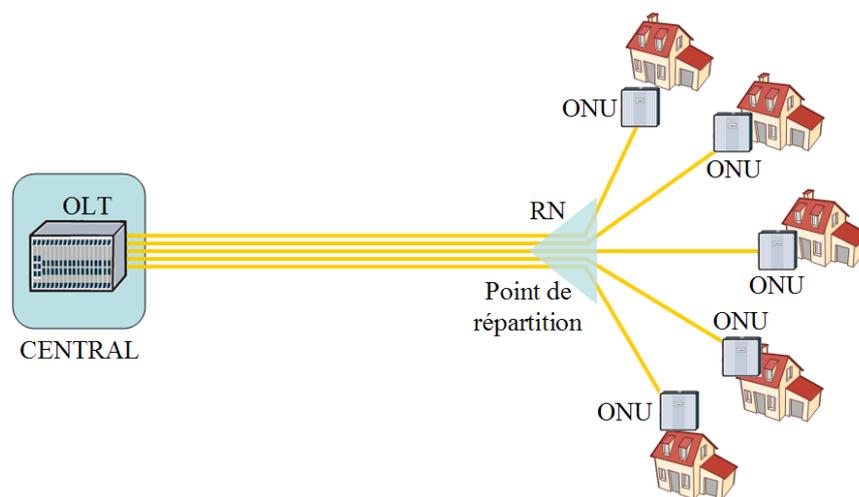
Se situe en termes d'avantages et d'inconvénients entre les configurations FTTH et FTTC selon que la TRO est localisée au pied de l'immeuble ou dans un local technique [I.8].

## **I.6. Les Topologies d'un Réseau d'Accès**

Dans ce paragraphe, nous décrivons trois principales catégories d'architecture du réseau d'accès optique : point à point, point à multipoint passif et point à multipoint actif. Aussi, nous discutons brièvement des avantages et des inconvénients de chaque type d'architecture.

### I.6.1. Architecture point à point

Cette architecture est schématisée dans la Figure I.9. Dans le réseau d'accès optique utilisant l'architecture point à point, chaque abonné est dédié à une fibre optique provenant du central. Nous appelons aussi l'architecture de type "Home Run" N fibre optique relie l'OLT au central avec ONU situées chez les abonnés. Le point de répartition RN est simplement un point de raccordement fibre-à-fibre entre le tronçon de transport et les tronçons de distribution. Le premier avantage de l'architecture point à point est la possibilité de monter le débit par utilisateur car il n'y a pas de partage de ressource matérielle en termes de la fibre optique et de l'émetteur-récepteur optique à l'OLT.



**Figure I.9 :** Architecture du réseau d'accès optique point à point

Comme il n'y a pas de partage de ressource matérielle, elle peut éviter la complexité liée aux techniques de multiplexage (en temps ou longueur d'onde). La portée peut être augmentée grâce à l'absence de composants optiques atténuants dans le réseau. Aussi, la sécurité des données d'utilisateur est bien garantie parce que la communication entre chaque abonné avec l'OLT est indépendante d'un utilisateur à un autre. En plus, le fait que chaque abonné est connecté sur une interface optique à l'OLT permet de bien optimiser le remplissage des équipements et de faciliter la gestion du réseau.

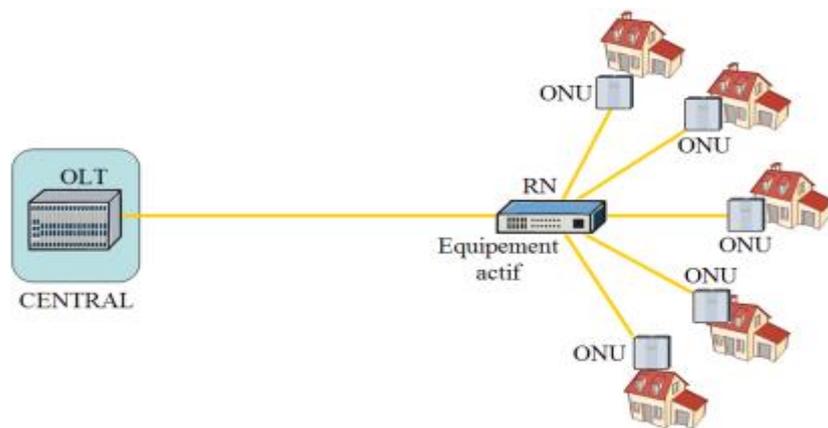
En revanche, le fait que la ressource matérielle n'est pas partagée impose des inconvénients : cette architecture demande un très grand nombre de fibres optiques et aussi un très grand nombre d'émetteurs-récepteurs optiques à l'OLT car cela doit être

égale au nombre d'abonnés. Donc, le coût des équipements (infrastructure à fibre optique, émetteurs-récepteurs optiques à l'OLT) est très important. Le grand nombre de câbles à fibre optique à déployer augmente le coût de génie-civile. Aussi, le nombre important des interfaces émetteur-récepteur optiques à l'OLT impose aussi le problème d'encombrement et de consommation d'électrique.

En termes de performances (débit, porté), l'architecture point à point est considérée comme la meilleure solution. Mais le coût très élevé est un problème majeur pour cette architecture. Donc, elle pourrait être utilisée comme une solution pour délivrer un débit de l'ordre des Gigabits (ou beaucoup plus) par abonnée quand le coût des équipements sont optimisés.

### I.6.2. Architecture point à multipoint active

Dans cette architecture, la fibre optique entre le point de répartition RN et l'OLT est mutualisée entre plusieurs abonnés. Comme nous pouvons voir dans la Figure I.10, l'agrégation des trafics provenant de plusieurs abonnés est réalisée à l'aide d'un équipement Ethernet actif situé au RN. C'est pour cette raison que nous appelons l'architecture point à multipoint active.



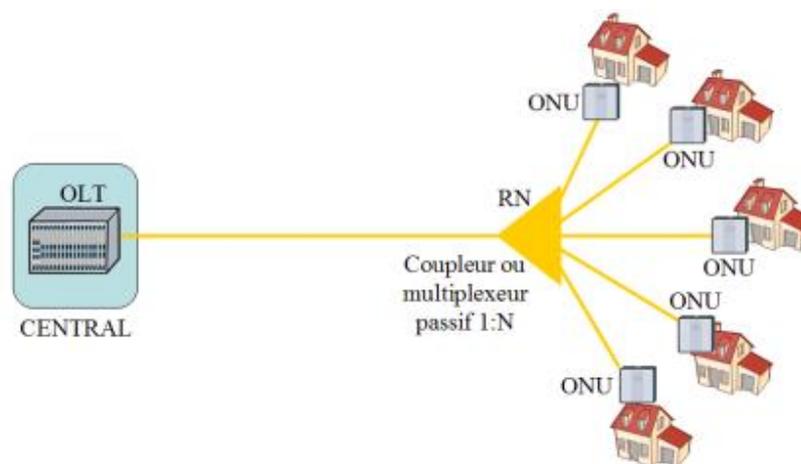
**Figure I.10:** Architecture du réseau d'accès optique point à multipoint actif

L'avantage principal de cette architecture est la grande maturité de la technologie Ethernet. Les interfaces Ethernet sont déjà standardisées, donc il y a un grand choix des équipements. L'interopérabilité entre différents constructeurs est aussi assurée. Comme la transmission est basée sur les liens point-à-point, la bande-passante disponible et la

portée peuvent être augmentées. Comme c'est une architecture active, l'inconvénient majeur est la grande complexité d'opération (alimentation électrique, protection, installation, maintenance, configuration,) et le coût important des équipements actifs dans le réseau. Pour monter en débit, l'utilisation des interfaces Ethernet à haute vitesse (Giga Ethernet, 10 Giga Ethernet,) est onéreuse. Contrairement au réseau d'accès ayant une infrastructure de fibre optique toute passive, l'amélioration du débit de ce type de réseau passe par le remplacement des équipements Ethernet actifs utilisés au RN. Pour toutes ces raisons, l'utilisation de l'Ethernet actif dans le réseau d'accès optique est considérée aujourd'hui comme une solution moins attractive comparativement à des solutions basées sur une infrastructure de fibre optique entièrement passive.

### I.6.3. Architecture point-à-multipoint passif (PON)

Cette architecture est montrée dans la Figure I.11. La fibre optique entre l'OLT et le point de répartition RN est mutualisée entre plusieurs abonnés. Le partage de la ressource matérielle est effectué grâce à des techniques de multiplexage en temps, en longueur d'onde, ou en code, ... Le point de répartition RN est simplement un équipement optique passif, qui est un coupleur ou un multiplexeur optique de 1 vers N (1 : N) suivant la technique de multiplexage utilisée. Il peut avoir plusieurs niveaux de répartition dépendant de chaque réseau PON spécifique (caractère géographique, taux de partage, ...). Nous avons donc une infrastructure de fibre optique entièrement passive de l'OLT aux ONU. Pour cette raison, nous l'appelons architecture point à multipoint passive ou le PON (Passive Optical Network), qui signifie littéralement le réseau optique passif.



**Figure I.11:** Architecture du réseau d'accès optique point-à-multipoint passif (PON)

Cette architecture possède plusieurs avantages. La mutualisation des ressources matérielles entre plusieurs abonnés (fibre optique, émetteur-récepteur optique à l'OLT) réduit le coût global des équipements. Comparée à une architecture active, cette architecture passive est moins coûteuse du point de vue matériel. L'inconvénient de l'architecture PON est principalement lié à la complexité des techniques de multiplexage en temps, longueurs d'onde, ... Aussi, l'utilisation du composant optique passif, qui atténue le signal au point de répartition RN, augmente la perte globale du système optique, donc limite la portée du réseau [I.9] [I.10].

## **I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les réseaux d'accès en faisant une étude détaillée sur l'architecture le principe, les différentes topologies existantes, notamment sur les réseaux filière, en partant de la technologie la plus utilisée. Nous avons détaillé les différents types de réseaux filières en précisant les câbles utilisés dans chaque cas ; à savoir : le câble Ethernet utilisé dans l'ADSL et la fibre optique dans celui de nouveaux réseaux d'accès larges bandes nommé PON qui est une technologie en pleine expansion dans le monde des télécommunications.

---

# Chapitre II

## La Modulation OFDM

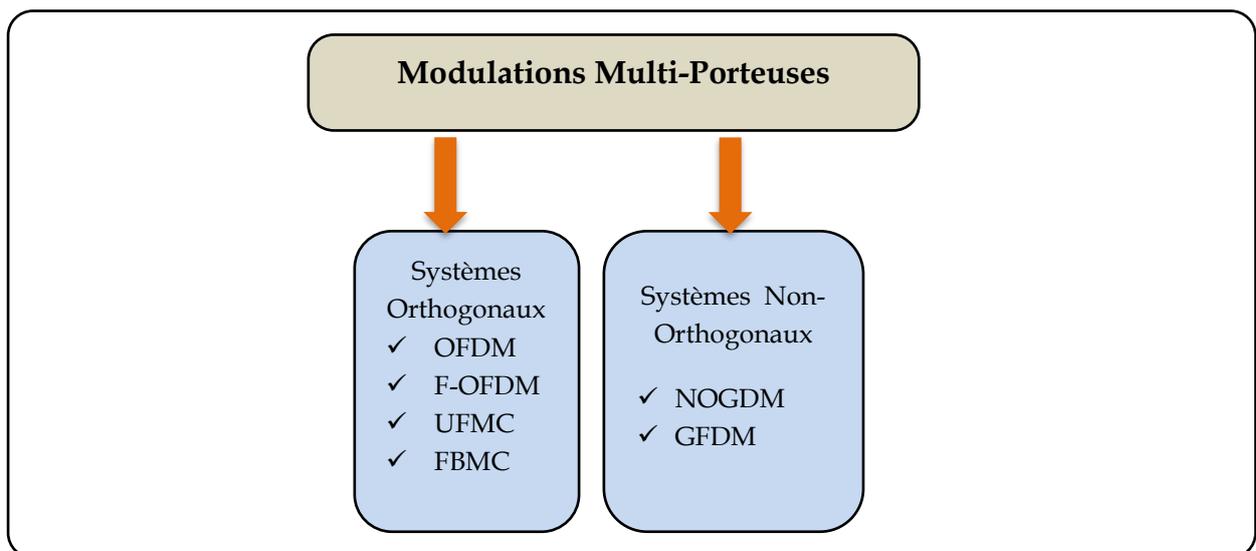
## II.1 Introduction

Le transfert des données est généralement basé sur une transmission successive dans le temps des symboles dans le temps. Dans ce cas chaque symbole occupe la totalité de la bande disponible. La deuxième technique de transmettre les symboles simultanément dans le temps, occupant des bandes parallèles. La durée temporelle ainsi que la largeur de bande peuvent être allouées uniformément ou non-uniformément à chaque symbole. L'objectif de ce chapitre est la présentation de Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) utilisée dans le contexte de réseaux d'accès.

## II.2 Notion de Modulation Multi-Porteuses

Dans le contexte de la transmission des données, les modulations multi porteuses se réfèrent à une structure dans laquelle plusieurs symboles sont envoyés en même temps en occupant des sous-bandes différentes. La décomposition de la bande peut être uniforme ce qui conduit à des modulations basées sur les systèmes de Gabor, ou non-uniforme ce qui génère des systèmes de modulation en ondelettes ou en paquets d'ondelettes [II.1] [II.2].

La Figure ci-dessous (Figure II.1) montre la classification des modulation multi-porteuses selon la décomposition de la bande uniforme ou non-uniforme.



**Figure II.1 :** Classification des Modulations Multi-Porteuses

## II.3 Format de Modulation OFDM

Le concept de modulation multi porteuses à multiplexage orthogonales fut repris avec beaucoup d'intérêt lorsque le problème des échos dus aux trajets multiples devenait incontournable. Ce procédé de modulation permet de diviser un flux d'information sériel haut débit en  $N$ -flux bas débit modulant respectivement et simultanément  $N$ -sous-porteuses à bande étroite et orthogonales entre elles pour réduire la bande du signal modulé [II.3]. Dans la suite, nous définirons le concept de base orthogonale en temps et en fréquence et nous présenterons le modulateur /Démodulateur OFDM.

### II.3.1 Notion d'Orthogonalité

Dans la Figure II.2 illustre des fonctions de forme rectangulaire espacées avec un intervalle de garde  $\Delta$  sur un intervalle de temps  $t$  entre  $a$  et  $b$ . Ces fonctions sont linéairement indépendantes.

Il est évident que :

$$\int_a^b f(t)g(t)dt = 0 \quad (II.1)$$

Et que

$$\int_a^b g(t)h(t)dt = 0 \quad (II.2)$$

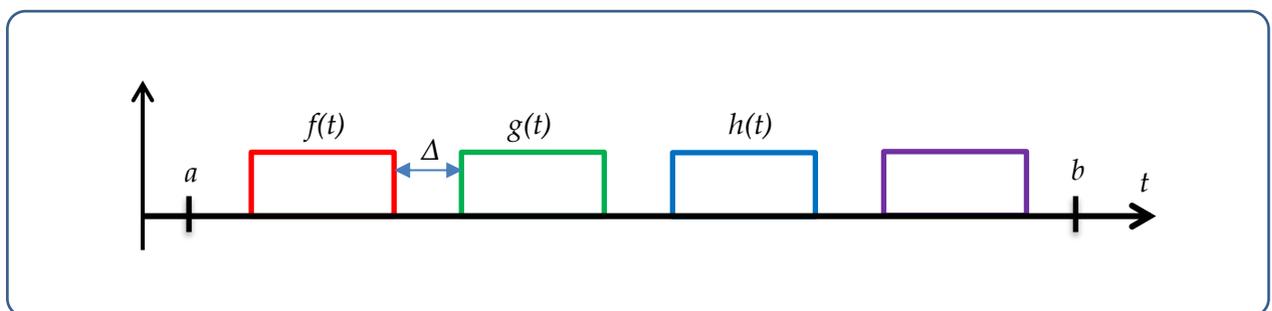


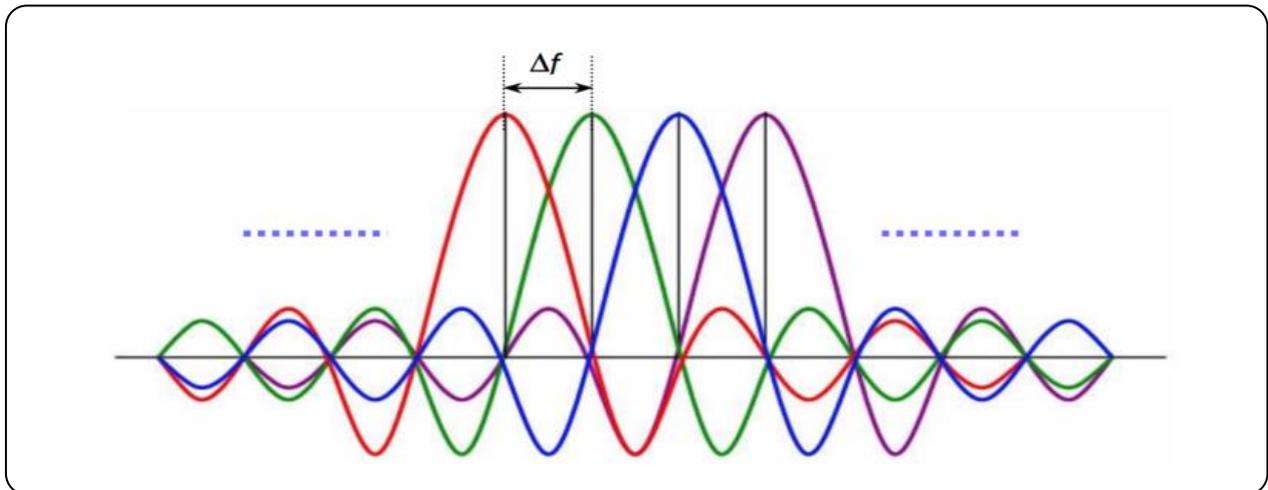
Figure II.2 : Base Orthogonale en Temps

Donc, ces fonctions forment une « base orthogonale » à  $N$ -dimension (autant que de fonctions sur le segment temporel  $\{a,b\}$ ) dans un espace fonctionnel à  $N$ -dimensions, paramétré en temps sur un support  $\{a,b\}$ .

La transformée de Fourier (TF) de la fonction rectangulaire ou porte  $\Pi_{T_U}(t)$  d'amplitude  $A$  et de largeur  $T_U$  est un sinus cardinal donné par l'équation suivante :

$$TF\{A\Pi_{T_U}(t)\} = A \frac{\sin(\pi f T_U)}{\pi f} = AT_U \text{Sinc}(f T_U) \quad (II.3)$$

Il est donc possible d'associer à une base orthogonale temporelle de fonctions porte  $\Pi_{T_U}(t)$ , une base orthogonale fréquentielle de sinus cardinaux par transformation de Fourier de chaque porte. La Figure II.3 représente un exemple de base orthogonale en fréquence dérivée de la base orthogonale en temps décrite précédemment.



**Figure II.3 :** Base Orthogonale en Fréquence

L'espace en fréquence entre les  $N$ -sinus cardinaux (sous-porteuses) de la base orthogonale fréquentielle est défini par :

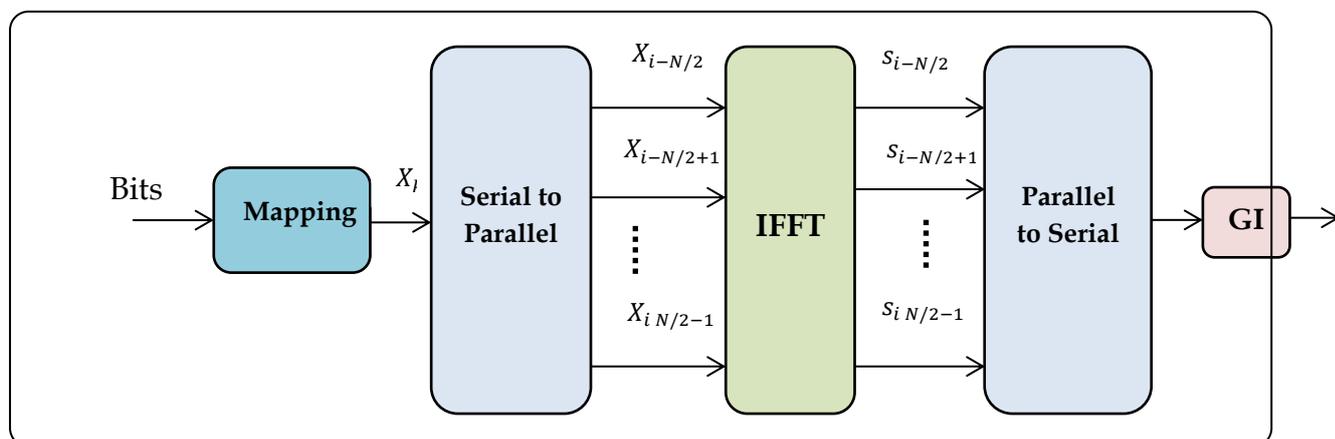
$$\Delta F = \frac{1}{T_U} \quad (II.4)$$

### II.3.2 Modulateur OFDM

A l'opposé des systèmes conventionnels qui transmettent les symboles en série, chaque symbole occupant toute la bande passante disponible, un modulateur OFDM consiste à répartir les symboles sur un grand nombre de sous-porteuses à bas débit. Pour répartir les données à transmettre sur les  $N$ -sous-porteuses, les bits de l'information binaire se transforment aux symboles grâce à des constellations souvent de type QPSK, QAM, 16-QAM, 64-QAM,...etc. Cette opération est appelée « Mapping » et les symboles obtenus sont des nombres complexes de la forme :

$$X_K = a_k + jb_k \quad (II.5)$$

Les symboles  $X_K$  sont groupés en paquets de longueur  $N$ . Chaque séquence de  $N$ -symboles  $X_0, X_1, X_2, \dots, X_{N-1}$  constitue un symbole OFDM. La Figure II.4 montre un schéma synoptique qui explique le principe de fonctionnement d'un Modulateur OFDM



**Figure II.4 :** Schéma Fonctionnel d'un Modulateur OFDM

La réalisation d'un modulateur analogique pour les paquets des symboles est très complexe car il faut utiliser un banc de modulateurs/démodulateurs synchronisés et un banc de filtres de mise en forme adaptés avec un grand nombre de voies.

Ce problème s'est simplifié grâce au traitement numérique du signal (bien précisément les transformées de Fourier directe et inverse DFT et IDFT), conduisant à l'implémentation de la technique OFDM [II.4]. Après l'opération de la IDFT basée sur l'algorithme

de calcul rapide de la transformée de Fourier inverse (IFFT), le  $i^{\text{ème}}$  OFDM symbole obtenu pour le  $i^{\text{ème}}$  paquet de longueur  $N$  est donné par :

$$s_i(k) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} e^{j2\pi \frac{nt}{T}}, \quad k = -N/2 \dots N/2 - 1 \quad (II.6)$$

Où  $T$  est la durée du symbole OFDM (*fenêtre rectangulaire temporelle de durée  $T$* ) et  $N$  est le nombre de sous-porteuses orthogonales de fréquences :

$$f_n = \frac{n}{T} \quad (II.7)$$

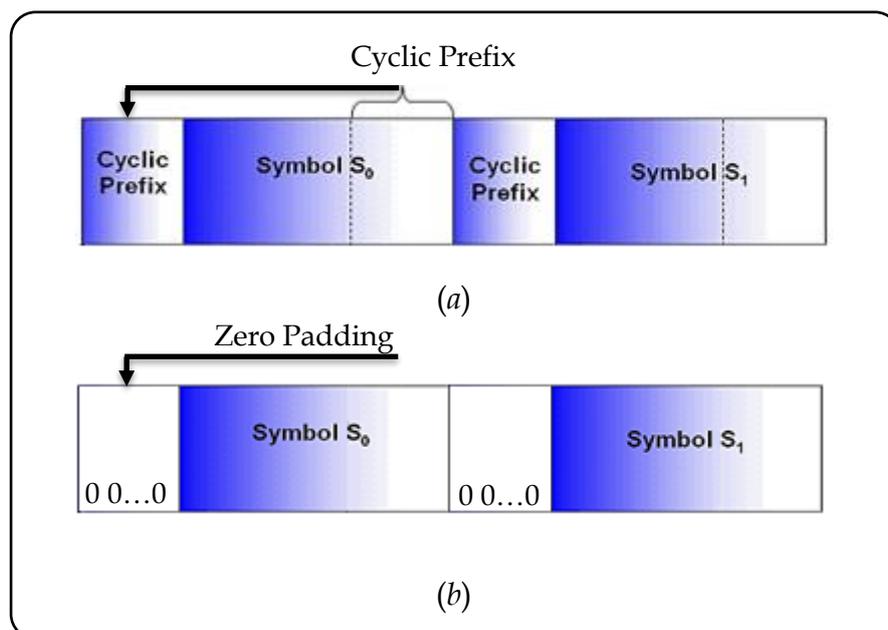
Les fréquences de sous-porteuses sont dites orthogonales si l'espace entre deux fréquences adjacentes est  $1/T$  (c.-à-d.) :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (II.8)$$

Où  $f_0$  représente la première fréquence de la bande du signal. Ainsi, lorsque l'échantillonnage est effectué précisément à la fréquence  $f_k$  d'une sous-porteuse, il n'y a aucune interférence avec les autres sous-porteuses.

Afin de réduire les interférences entre symboles OFDM (ISI), un intervalle de garde (GI) est introduit entre chaque deux symboles OFDM. La durée de cet intervalle de garde doit être supérieure au retard maximal de propagation dû aux multi trajets. Cependant, l'ajout d'un intervalle de garde entraîne une perte de débit [II.1]. Deux techniques d'insertion de l'intervalle de garde ont été largement utilisées :

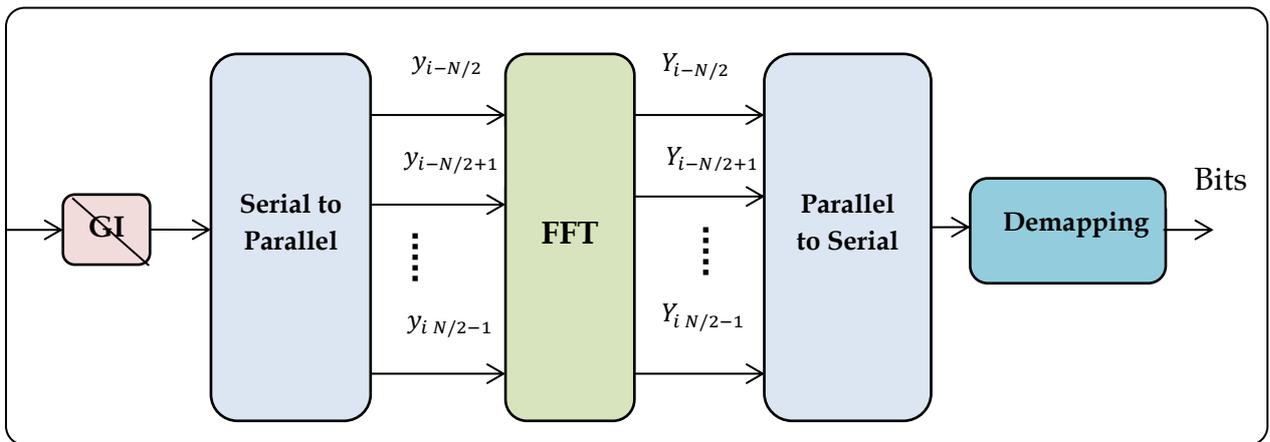
- **Le CP (Cyclic-Prefix) :** On reproduit, au début de chaque symbole OFDM, une copie de ses derniers échantillons. C'est ce qu'on appelle un préfixe cyclique (CP). Le signal qu'on met dans l'intervalle de garde est alors une partie qu'on copie de la fin du bloc de symbole, et on la rajoute à son début.
- **Le ZP (Zero-Padded) :** Pour chaque bloc d'une transmission ZP-OFDM, des zéros sont ajoutés aux symboles après l'IFFT. Contrairement au CP-OFDM, dans le ZP-OFDM, aucun signal n'est transmis, et donc l'intervalle de garde n'engendre pas de perte en puissance. Mais à la réception, au lieu d'utiliser une seule FFT comme pour le cas du CP-OFDM, un filtrage FIR ou zéro forcing est utilisé, ce qui augmente la complexité du récepteur.



**Figure II.5 :** Techniques d'Insertion de l'Intervalle de Garde (GI)  
 (a) La technique CP (a) La technique ZP

### II.3.3 Démodulateur OFDM

A la réception, les opérations inverses sont appliquées. La démodulation OFDM consiste à éliminer l'intervalle de garde, effectuer une transformée de Fourier discrète directe des symboles reçus à l'aide de l'algorithme de la FFT. La Figure II.6 décrit le schéma fonctionnel d'un démodulateur OFDM.



**Figure II.6 :** Schéma Fonctionnel d'un Démodulateur OFDM

Notons que dans les communications à haut débit, les débits sont limités par des contraintes physiques : le bruit dû aux imperfections des systèmes et la nature physique des composants affectent la transmission du signal émis. Dans ce cas il est important d'ajouter codeur/décodeur de correction d'erreurs au modulateur/démodulateur. En pratique, les schémas OFDM codés connus sous le nom de COFDM (Coded OFDM) [II.4].

Dans le cas de transmission sur un canal multi-trajets, la connaissance de la réponse impulsionnelle du canal qui caractérise le canal est très importante pour l'égalisation du canal au niveau de démodulateur. Le processus visant à découvrir les paramètres du canal (Atténuations et retards) est appelé estimation du canal. L'opération d'égalisation du canal s'effectue en domaine temporel ou en domaine fréquentiel. L'objectif de cette opération est la minimisation des effets du canal multi-trajets comme l'Interférence entre trajets et les interférences entre symboles.

## II.4 Conclusion

Durant ce chapitre nous avons présenté les techniques de modulation multi porteuses en faisant une étude détaillée sur la modulation OFDM. L'atout majeur de l'OFDM est son pouvoir de diviser la bande de transmission en  $N$  sous-canaux orthogonaux, technique qui nécessite l'ajout d'un intervalle de garde au début du symbole, intervalle qui est identique au segment de même longueur à la fin du symbole. En plus de cela, elle présente une grande simplicité dans la modulation et la démodulation ; n'ayant besoin que d'un seul modulateur et d'un seul démodulateur.

---

## **Chapitre III**

### **Résultats de simulation d'un OFDM-PON**

## III.1 Introduction

Ce chapitre traite des simulations personnalisées réalisées dans VPI. Il a pour but d'étudier les performances des techniques OFDM abordées précédemment pour le cas d'une transmission PON et d'une transmission radio sur fibre. Avant de décrire les simulations, les modules personnalisés construits dans VPI et ses paramètres associés sont décrits, afin que les différentes opérations du système puissent être comprises en examinant les scénarios de simulation. Dans un premier temps, nous allons présenter le modèle des composants constituant le canal de transmission simulé dans cette étude pour ensuite intégrer l'implémentation des différentes techniques OFDM abordées dans le chapitre 2. Ainsi, les résultats obtenus avec l'OFDM seront analysés et comparés en fonction du taux d'erreur de symbole (ou symbol error ratio : SER), du diagramme de constellation de la puissance RF, de la puissance optique reçue/budget optique réalisé et de la distance de transmission.

## III.2 L'outil VPI

Virtual Photonics Integrated (VPI) est un outil puissant qui permet de simuler une large gamme de conceptions de transmission optique, donnant la possibilité de créer plusieurs configurations pour un scénario de transmission donné. Plus précisément, les simulations décrites dans ce chapitre vont être effectuées au moyen de l'application VPI Transmission Maker, bien qu'elle soit simplement appelée VPI au cours de ce travail.

### III.2.1 Interface utilisateur graphique

Lors du démarrage de VPI, la disposition de l'écran de base est similaire à d'autres programmes de simulation basés sur l'interconnexion de modules pour créer, concevoir et simuler les caractéristiques opérationnelles de systèmes déterminés. La figure III.1 montre l'interface utilisateur graphique (GUI) de VPI.

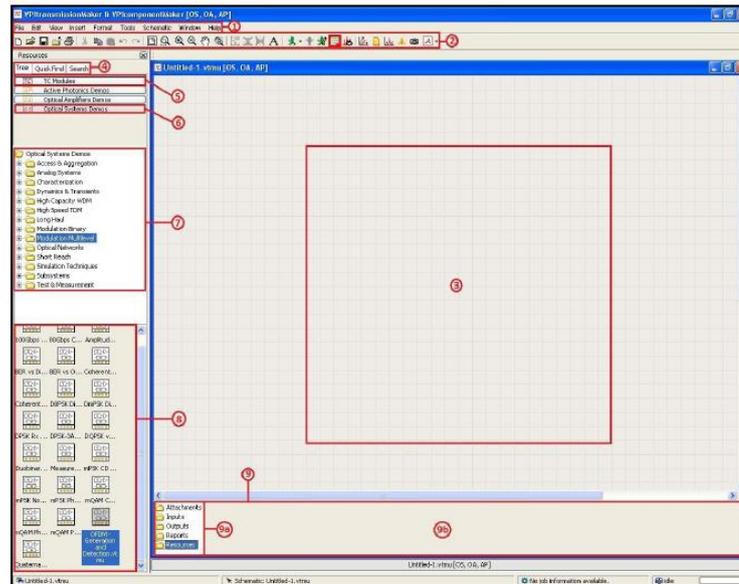


Figure III.1 Interface utilisateur graphique

### III.2.2 Hiérarchies de simulation

VPI est organisé hiérarchiquement. Cela permet une gestion plus aisée des modules participant à une simulation, car ils peuvent être traités indépendamment ou en groupe si nécessaire. La figure III.2 montre les trois niveaux dans lesquels les modules peuvent être classés : ce sont l'univers, la galaxie et l'étoile. Comme on peut le déduire par leurs noms, l'étoile représente le niveau le plus bas de l'interface de simulation, la galaxie appartient au deuxième niveau et l'univers est le troisième et le plus haut niveau.

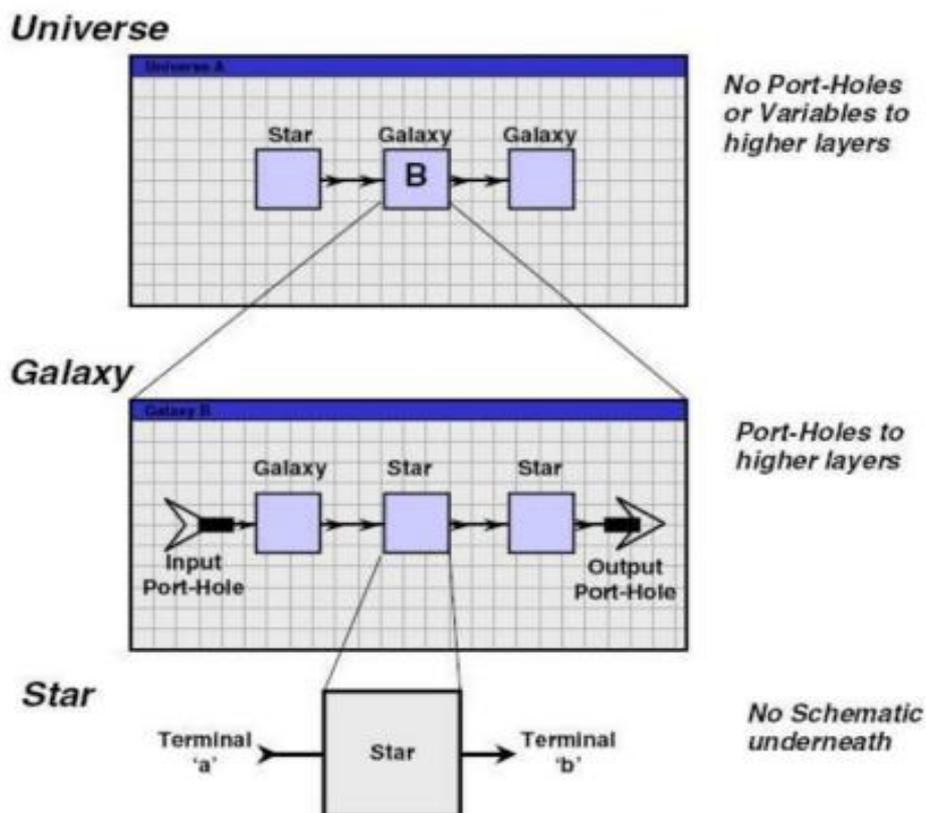


Figure III.2 : Hiérarchie VPI [manuel VP 1

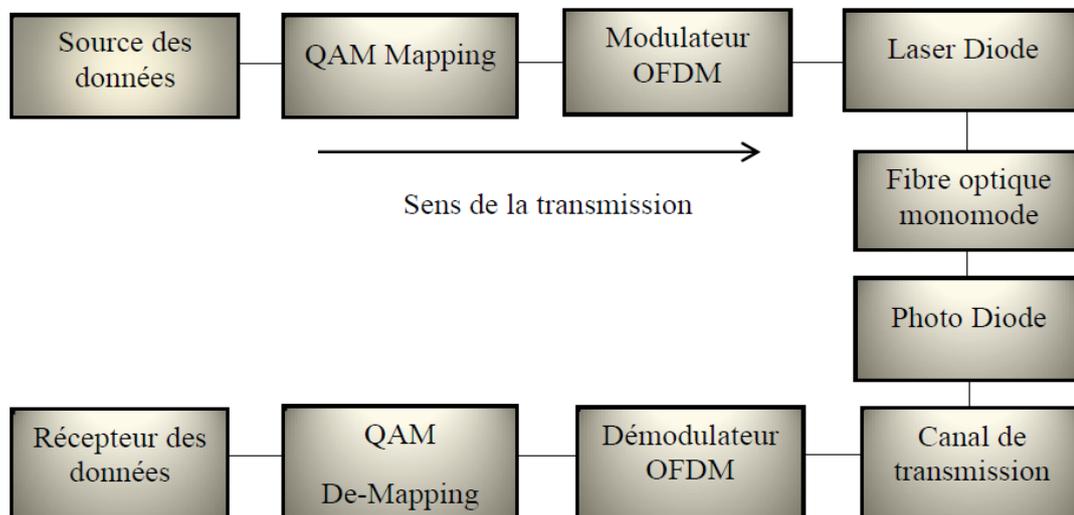
**Figure III.2** Hiérarchie VPI [manuel VPI]

Une étoile représente un module unique avec une fonction spécifique qui ne peut être subdivisée en d'autres modules. Ainsi, une galaxie peut être décrite comme un module de second niveau formé par un ensemble d'étoiles interconnectées (voire d'autres galaxies). Pour être implémentée sur un univers, une galaxie doit contenir au moins un port d'entrée ou de sortie (voir Figure III.2).

L'univers est le seul module exécutable par l'utilisateur. Il représente l'ensemble du scénario de simulation et peut consister en une combinaison d'étoiles et de galaxies interconnectées. Du point de vue de l'univers, une galaxie agit comme un autre module unique et les étoiles à l'intérieur de cette galaxie ne peuvent pas être vues à partir du schéma principal. Cependant, le schéma de la galaxie peut être affiché en cliquant dessus avec le bouton droit de la souris depuis le schéma de l'univers et en sélectionnant l'option Regarder à l'intérieur [III.1].

### III.3 Schéma bloc du système OFDM-optique

La représentation schématique du modèle du système OFDM-optique est représentée par la figure III.3. Les principales parties du modèle crée sont le transmetteur, le lien optique, le canal de transmission et le récepteur.



**Figure III.3** Schémas du système OFDM-optique.

La diode laser convertit le signal électrique en un signal optique, le signal optique modulé en intensité ainsi obtenue est transmis dans une fibre optique monomode, à l'autre bout de la fibre optique, un photo-détecteur est placé pour détecter le signal.

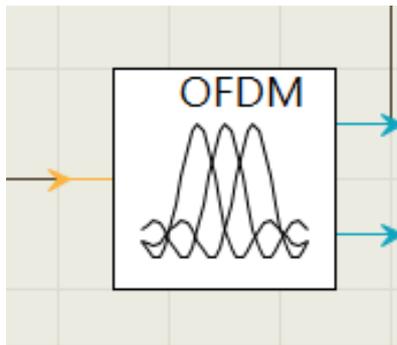
Le signal optique est converti en signal électrique par une détection directe effectué par un photo-détecteur (PIN ou APD). La technique de transmission utilisée est donc une technique de modulation d'intensité avec une détection directe (IM-DD) [III.2].

### III.4 Modélisation du système OFDM

#### III.4.1 Codeur OFDM

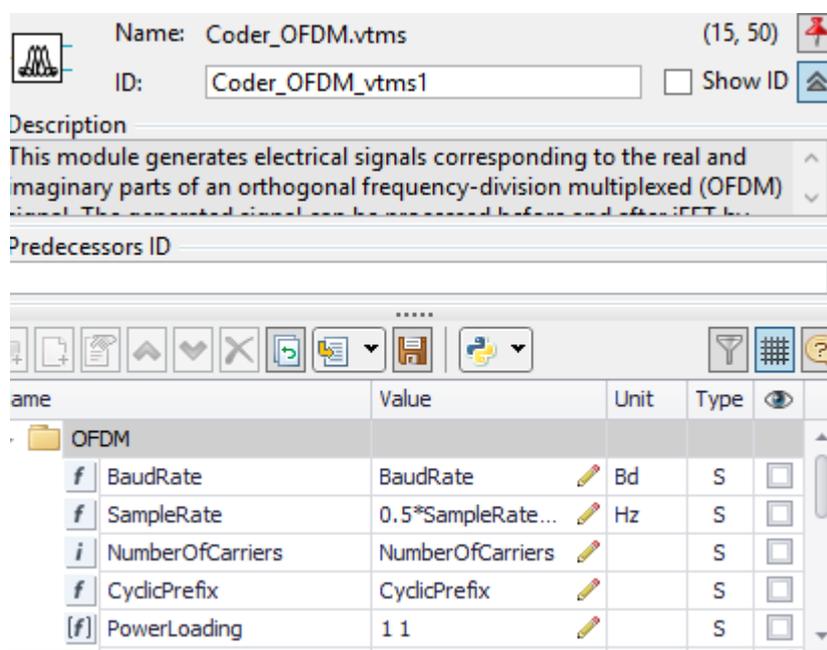
Ce module génère des signaux électriques correspondant aux parties réelle et imaginaire d'un signal multiplexé par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM). Le signal généré peut être traité avant et après IFFT par des procédures DSP personnalisées avec une interface prédéfinie. Le multitone discret (DMT) et d'autres modulations peuvent être mis en œuvre via la procédure DSP. Divers schémas de chargement de bits et de puissance sont pris en charge.

Un préfixe cyclique peut être ajouté via le paramétrage, comme illustré à la Figure III.4



**Figure III.4** Module codeur OFDM [VPI]

La Figure III.5 montre l'éditeur de paramètres résultant pour la galaxie du codeur OFDM, qui sera le même pour la galaxie du décodeur OFDM.

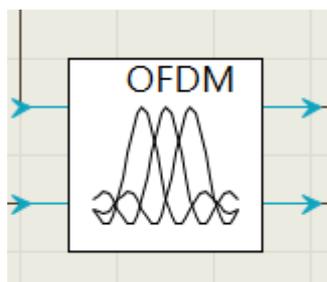


**Figure III.5** Codeur OFDM (et décodeur) Editeur de paramètres [VPI]

Ces paramètres peuvent être modifier à partir du schéma de l'univers.

### III.4.2 Décodeur OFDM

Ce module décode un signal OFDM (tel que celui généré par le module Coder\_OFDM). Il effectue la démodulation, la suppression des préfixes cycliques et le traitement DSP pré et post-FFT. Le flux d'échantillons renvoyé est rempli de zéros pour compenser toute différence entre les débits de données effectifs et transmis. la figure III.6 illustre le module decodeur OFDM avec vpi.



**Figure III.6** Décodeur OFDM

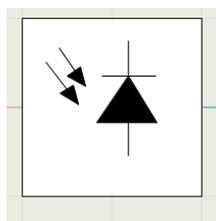
Les paramètres à créer dans ce module sont les mêmes que ceux du codeur, représentés à la Figure III.4

## III.5 Modélisation du lien optique

Dans un système OFDM optique sur Fibre bas cout, les composants fondamentaux qui forment le lien sont : la diode laser, la fibre optique et la photodiode.

### III.5.1 Modélisation du récepteur

La détection du signal optique est effectuée par un photodétecteur, c'est donc une détection directe. Le module peut gérer à la fois les signaux optiques monomodes et multimodes. C'est un modèle de photodiodes PIN et APD. Celles-ci peuvent être simulées sur la base d'une sensibilité prédéfinie, de la multiplication des avalanches, du courant d'obscurité et du bruit. En variante, la dépendance de la tension et de la température est prise en compte en utilisant un circuit RC équivalent. La réponse en fréquence électrique n'est pas incluse et peut être modélisée par un filtre externe. Le module peut également être utilisé pour la simulation de systèmes CWDM, auquel cas le paramètre JoinSignalBands doit être défini sur Non pour éviter une consommation excessive de mémoire. la figure III.7 illustre le module photodiode utilisé lors de cette simulation.



**Figure III.7** module photodiode [vpi]

La figure III.8 montre l'éditeur de paramètres résultant pour la galaxie photodiode.

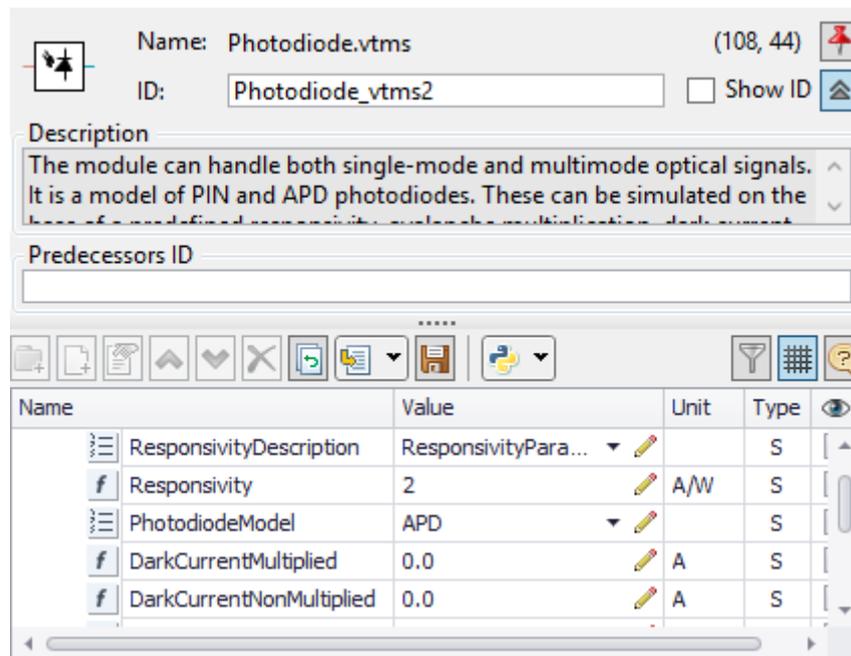


Figure III.8 photodiode éditeur de paramètre [vpi]

### III.5.1.1 Photodiode PIN

Pour effectuer la photo détection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone dépeuplée. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large. D'où l'intérêt de la photodiode PIN. La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque (I), où règne le champ électrique pratiquement uniforme, qui sépare les porteurs. Une des zones traversées par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau .

### III.5.1.2 Photodiode a avalanche (APD)

Afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, L'idée d'utiliser le phénomène de multiplication interne pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photo-electron mais plusieurs a été soulevée, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à une puissance incidente donnée. En faisant croître le champ électrique dans la jonction PIN, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaine se produisent alors et les porteurs se multiplient. Ce à gain interne est appelé photodiode à avalanche (APD). Le gain de multiplication par ionisation par impact appelé aussi facteur de multiplication  $M$ , est le rapport entre le nombre moyen de porteurs secondaires créés par ionisation et le nombre de porteurs primaires provenant de la photodétection. Le gain augmente avec la différence de potentiel appliquée, mais est limité à une valeur maximale. Si le champ devient trop fort, il y'a risque de claquage. Cette valeur limite de

tension dépend du matériau et de la structure utilisés [III.3].

### III.5.2 Le laser

Il s'agit d'un "modèle de fiche technique" d'un laser CW. Ses paramètres sont ceux que l'on trouve couramment sur la fiche technique d'un fabricant. Par implication, ce sont aussi des paramètres faciles à mesurer. Le laser a un mode latéral, un bruit d'intensité, une dérive de longueur d'onde avec la température et la largeur de raie.

La figure III.9 et III.10 illustre respectivement le module laser vpi utilisé et son éditeur de paramètre

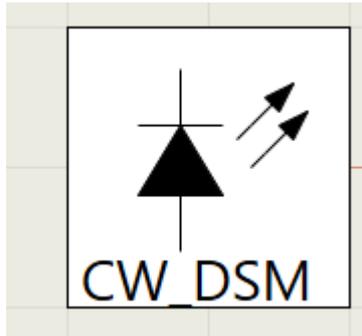


Figure III.9 module laser [vpi]

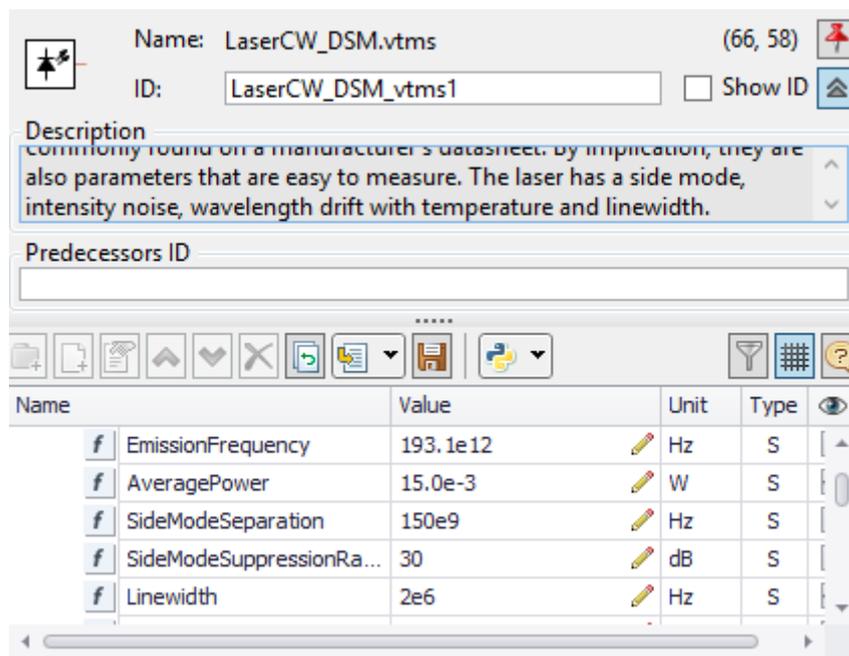


Figure III.10 éditeur de paramètre du laser

### III.5.3 La fibre optique

Lorsqu'il est utilisé avec des signaux en mode échantillonné, ce module résout l'équation de Schroedinger non linéaire (NLS) décrivant la propagation des ondes optiques polarisées linéairement dans les fibres à l'aide de la méthode de Fourier à étapes fractionnées. Selon la représentation du signal, différents effets sont représentés : si les signaux sont dans une seule bande de fréquence (SFB), ou JoinSampledBands = ON, le modèle prend en compte la diffusion Raman stimulée (SRS), le mélange à quatre ondes

(FWM), le self -modulation de phase (SPM), modulation de phase croisée (XPM), dispersion de vitesse de groupe de premier ordre (GVD), GVD de second ordre et atténuation de la fibre. Si les signaux sont dans une bande de fréquences multiples (MFB), les effets ci-dessus sont calculés dans chaque bande. Utilisez le module UniversalFiber (ou UniversalFiberFwd) pour inclure les interactions entre les MFB et également entre les MFB et les signaux paramétrés. Pour les signaux paramétrés (représentation CW), un système d'équation différentielle ordinaire comprenant la diffusion Raman stimulée (SRS) et l'atténuation dépendant de la fréquence est appliqué. Pour que cela fonctionne, ConvertToParameterized doit être défini sur ON.

La figure III.11 et la figure III.12 illustre respectivement son module vpi et l'éditeur de paramètre.

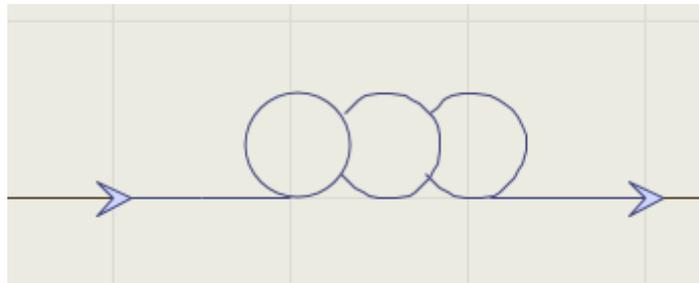


Figure III.11 module de la fibre optique [vpi]

Name: FiberNLS.vtms (99, 44)

ID:   Show ID

Description  
 differential equation system including simulated Raman scattering (SRS) and frequency-dependent attenuation is applied. For this to operate, ConvertToParameterized must be set to ON.

Predecessors ID

Name	Value	Unit	Type
f ReferenceFrequency	193.1e12	Hz	S
f Length	10e3	m	S
f GroupRefractiveIndex	1.47		S
f Attenuation	0.2e-3	dB/m	S
AttFileName	...		S

Figure III.12 éditeur de paramètre de la fibre optique.

### III.6 Liaison sans fil 5G (onde millimétrique sur fibre)

La figure III.13 illustre une fibre radio sur 10 km (RoF) convergée de manière transparente et un système à ondes millimétriques à 90 GHz pour la transmission de signaux sans fil à haut débit. Il montre une transmission et une démodulation réussies des signaux de réseau d'accès local sans fil (WLAN) 64 QAM standard basés sur le multiplexage par répartition en fréquence orthogonale à 16 porteuses sur le RoF convergé.

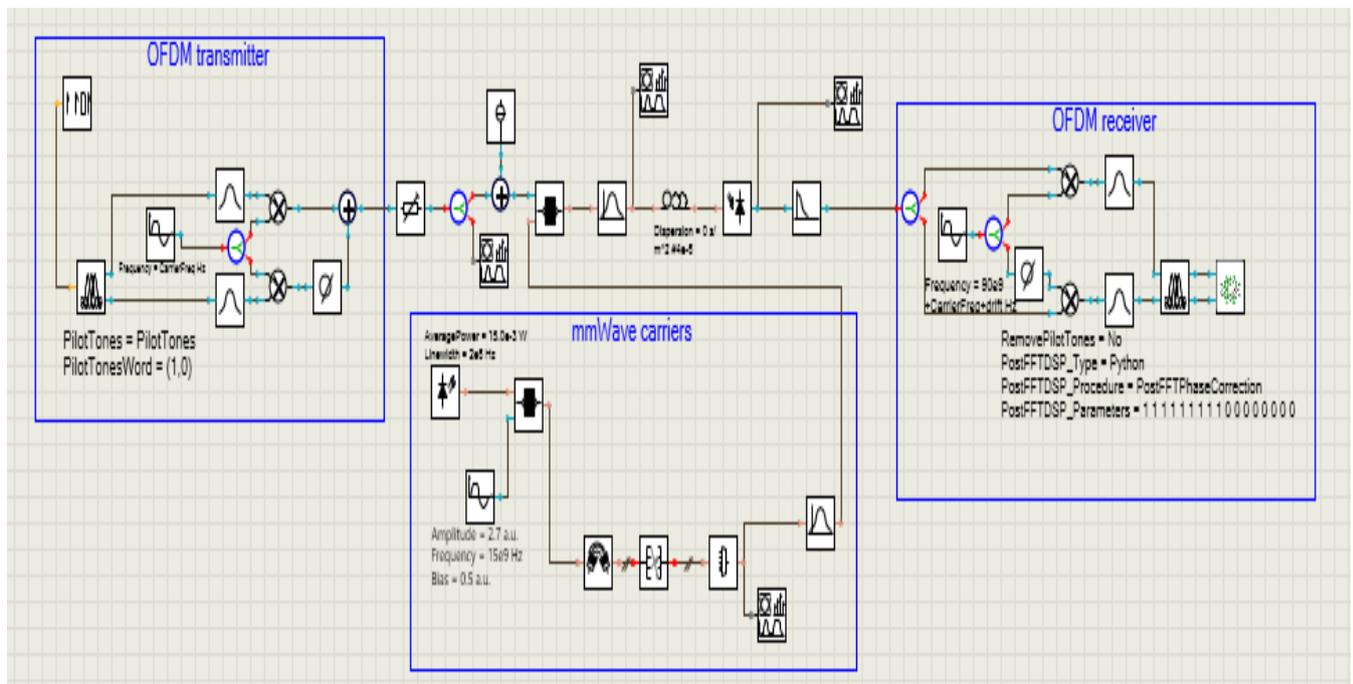


Figure III.13 chaîne de transmission radio sur fibre d'une liaison 5G sans fil vpi

#### III.6.1 Comparaison des diagrammes de constellation pour différentes longueurs de la fibre

Le diagramme de constellation présente les images instantanées des symboles résultant de la modulation 16 QAM. Le nombre total de points est égal au produit du nombre de symbole OFDM dans la simulation et du nombre de sous porteuses. En absence de la fibre optique, le diagramme de constellation présente des symboles bien définis ( $L = 0$  km). Cependant, en augmentant la longueur le diagramme de constellation devient moins net et présente alors un ensemble de nuage de points dont les symboles se dispersent, donnant des formes variées au diagramme. Dans ce cas, le démodulateur effectue plus d'erreurs au niveau des symboles restitués.

La figure III.14 montre les constellations pour différentes longueurs avec le nombre de porteuses fixé à 16 pour une modulation 16 QAM.

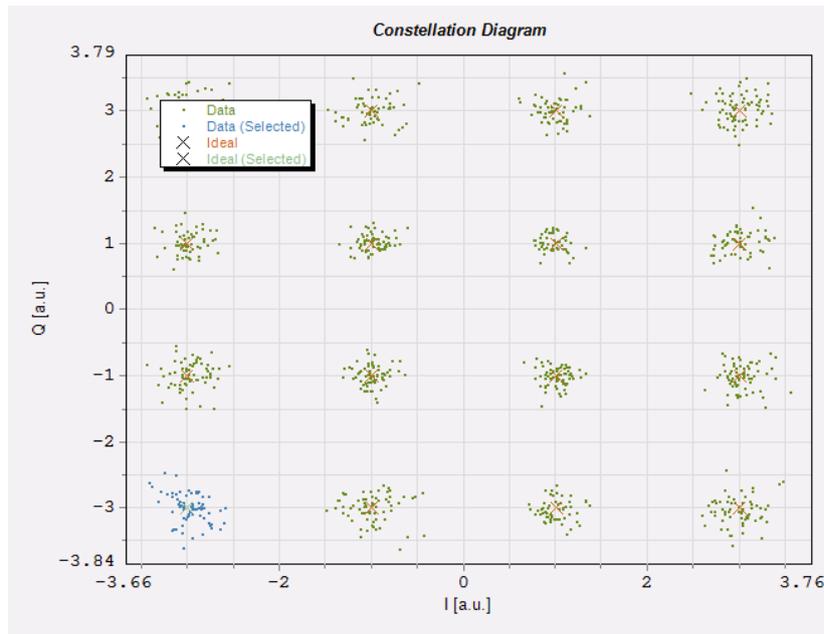


Figure III.14 (a) diagramme de constellation pour une fibre de longueur 50km

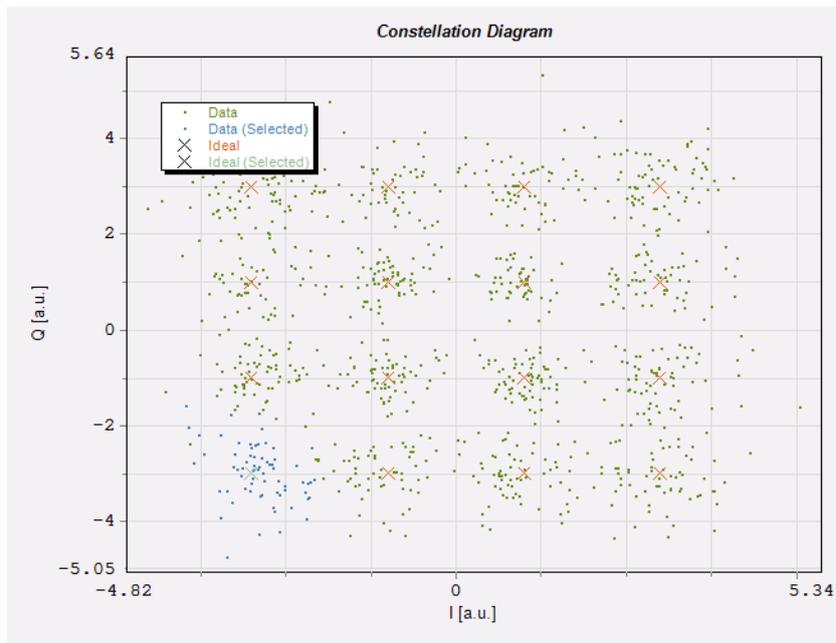


Figure III.14 (b) diagramme de constellation pour une fibre de longueur 100km

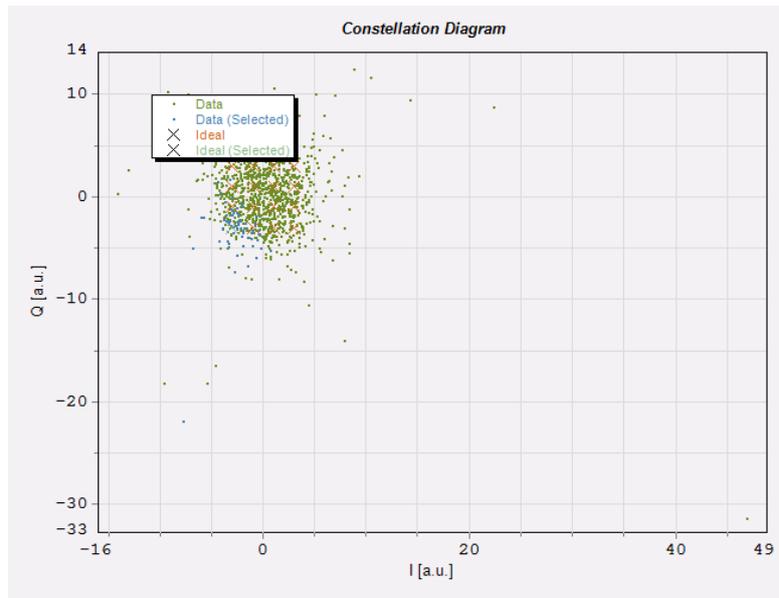


Figure III.14 (c) diagramme de constellation pour une fibre de longueur 150km

### III.6.2 Effet de la modulation QAM sur le SER et le diagramme de constellation

Pour une fibre de longueur 100km et de nombre de porteuses fixé à 16, les figures III.15 (a) (b) (c) montrent que la modulation influe sur les valeurs du SER. En passant de 4 QAM, 16 QAM jusqu'à 64 QAM, le SER augmente et la distance entre les points devient de plus en plus courte. Ainsi le récepteur a plus de probabilité pour faire de fausses décisions, et par la suite les performances se dégradent.

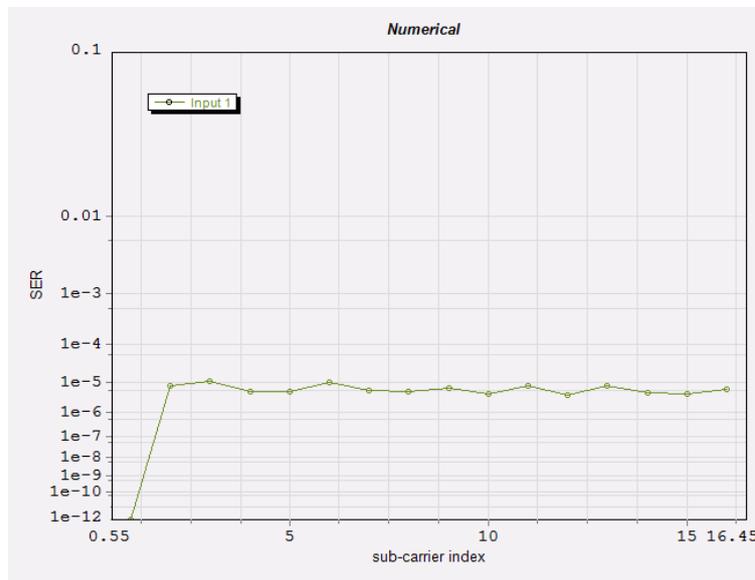
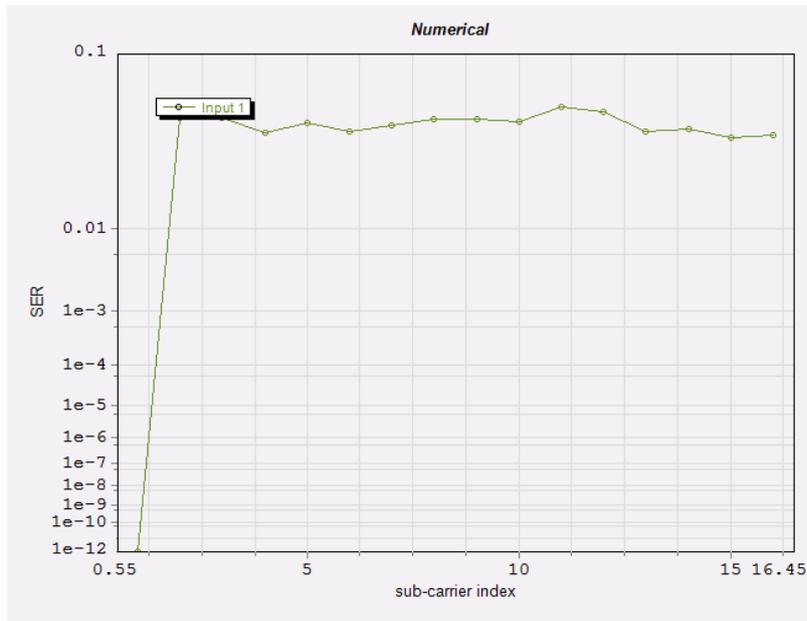
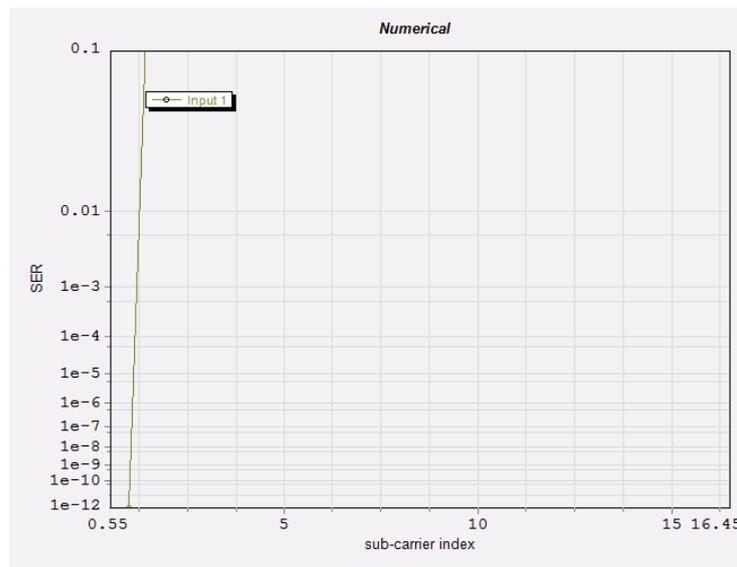


Figure III.15 (a) variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 4 QAM



**Figure III.15 (b)** variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 16 QAM



**Figure III.15 (c)** variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 64QAM

### III.6.3 Effet du nombre de porteuses sur le SER

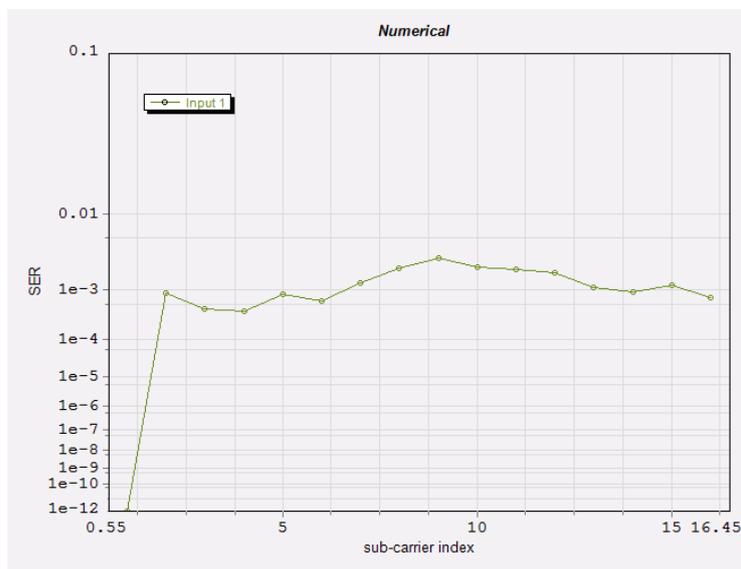
D'après les figures III.16 (a) et (b), Le SER décroît en faisant diminuer le nombre de porteuses. En augmentant le nombre de porteuses, le rapport entre la puissance maximale du signal OFDM et sa puissance moyenne, appelée PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) devient plus élevé.

Le PAPR est donné par l'expression suivante :

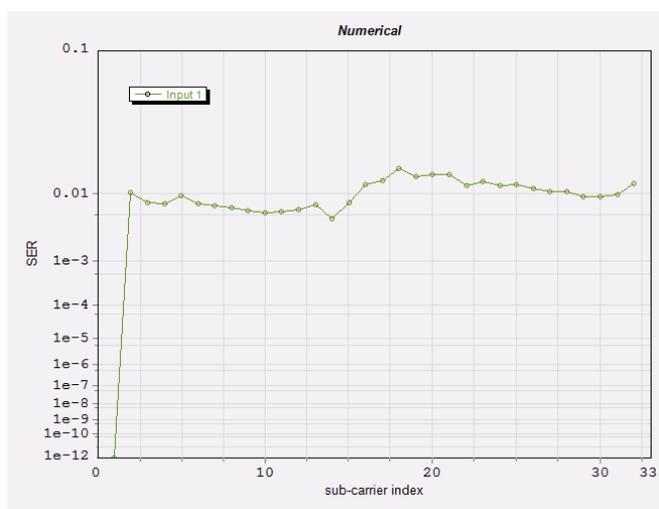
$$\text{PAPR} = \frac{\max |x(t)|^2}{E[|x(t)|^2]}$$

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k * e^{j2\pi fkt}$$

En effet, lorsque la valeur du PAPR augmente, le signal  $x(t)$ , résultant de la modulation des  $N$  porteuses par les symboles OFDM, présente alors de grands pics d'amplitude, ce qui entraîne sa distorsion car il sera très sensible aux effets non linéaires de la fibre optique. Ainsi, les performances du système se dégradent à la réception, entraînant des valeurs élevées de SER.



**Figure III.16 (a)** variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 16 porteuses



**Figure III.16 (b)** variation de SER en fonction de l'indice de sous porteuses pour 32 porteuses

### III.7 OFDM pour le réseau d'accès

Cette démo illustre comment les signaux électriques OFDM sont générés et détectés à l'aide des modules Coder\_OFDM et Decoder\_OFDM. La figure III.17 montre la chaîne de transmission OFDM pour le réseau d'accès.



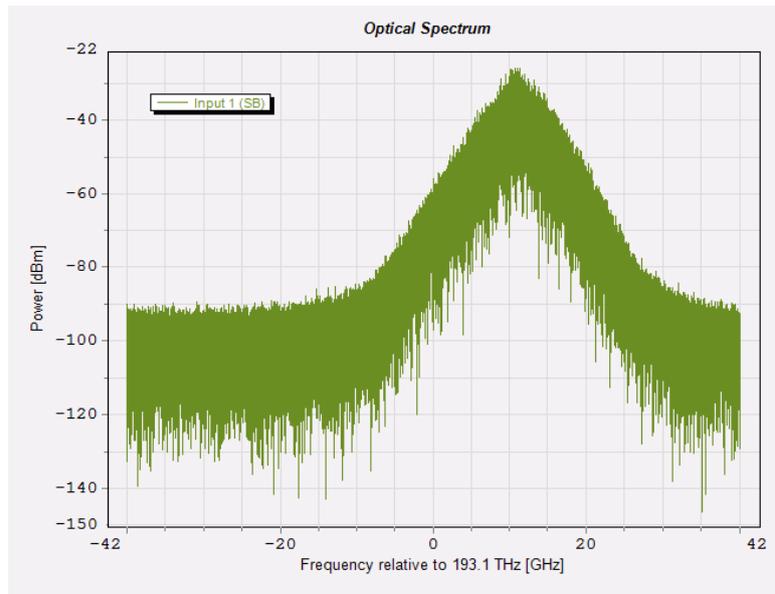


Figure III.18 (b) spectre optique 4PSK

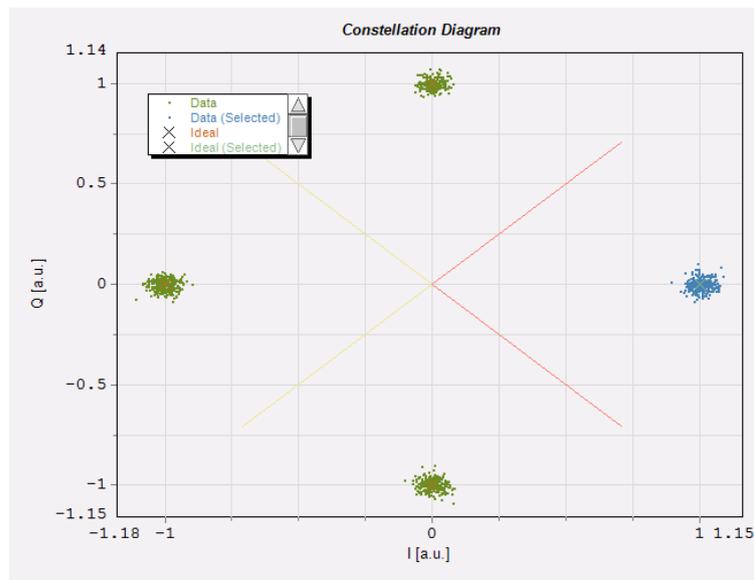


Figure III.18 (c) diagramme de constellation 4PSK

Pour les mêmes paramètres mais cette fois avec une modulation 4QAM nous trouvons les figures suivantes :

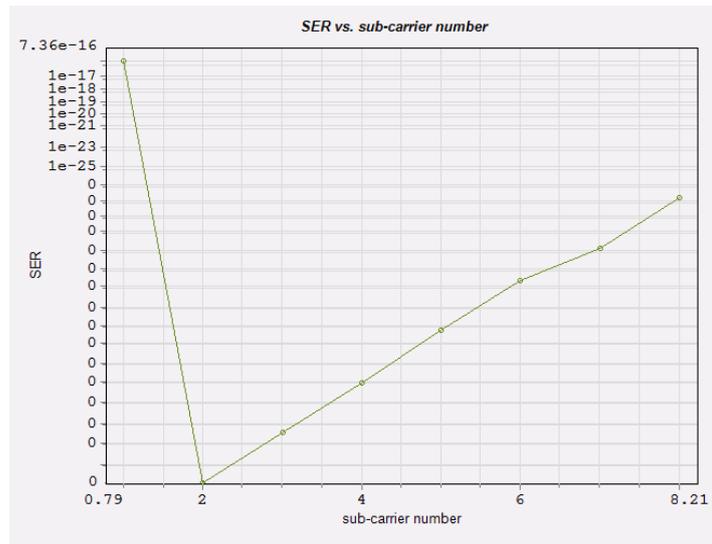


Figure III.19 (a) variation du SER par rapport à l'indice de sous porteuses pour 4QAM

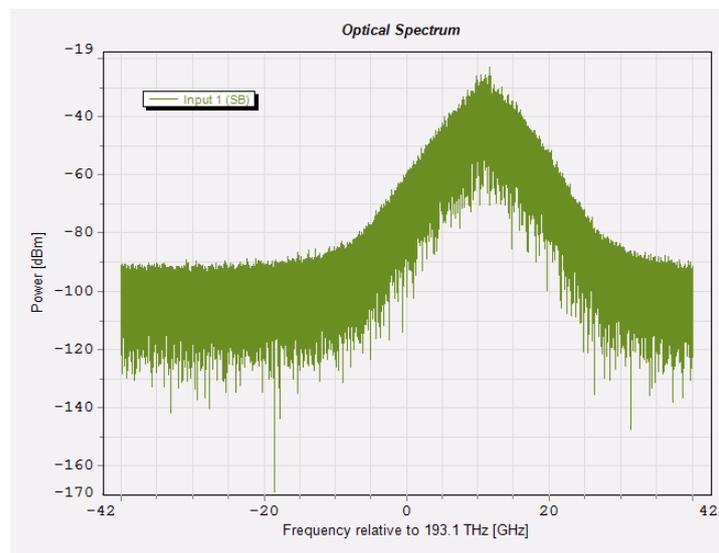
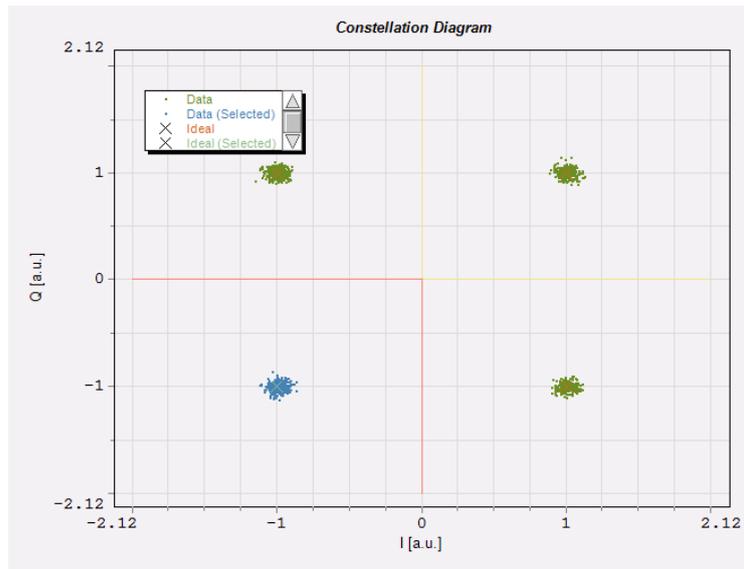


Figure III.19 (b) spectre optique pour 4QAM



**Figure III.19 (c)** diagramme de constellation pour 4QAM

D'après les figures la modulation mPSK a une meilleure performance par rapport à la modulation mQAM que ça soit du point de vue du SER ou du spectre optique.

Du point de vue du SER celui de la modulation mQAM est très élevé par rapport à celui de la modulation mPSK.

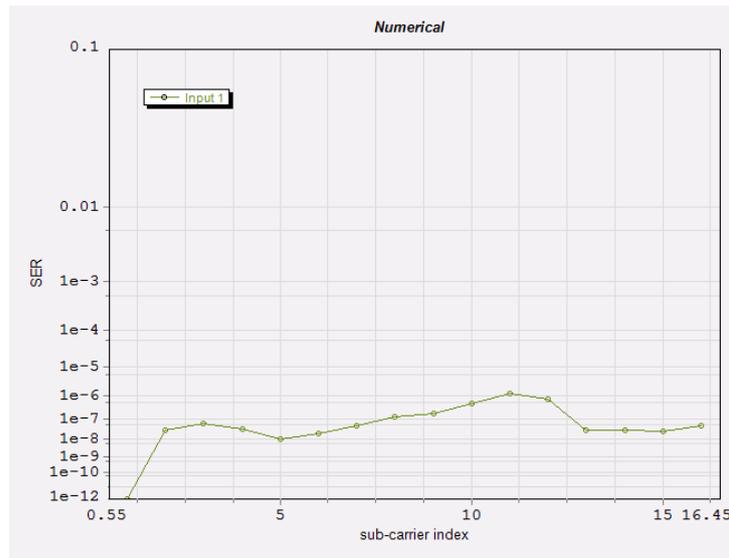
Du point de vue du spectre optique la puissance de la modulation mPSK est élevé par rapport à celui de la modulation mQAM.

## III.8 Comparaison entre un système radio sur fibre et un système OFDM pour les réseaux d'accès

### III.8.1 Comparaison par rapport à la longueur de la fibre optique

#### III.8.1.1 Pour la chaine radio sur fibre

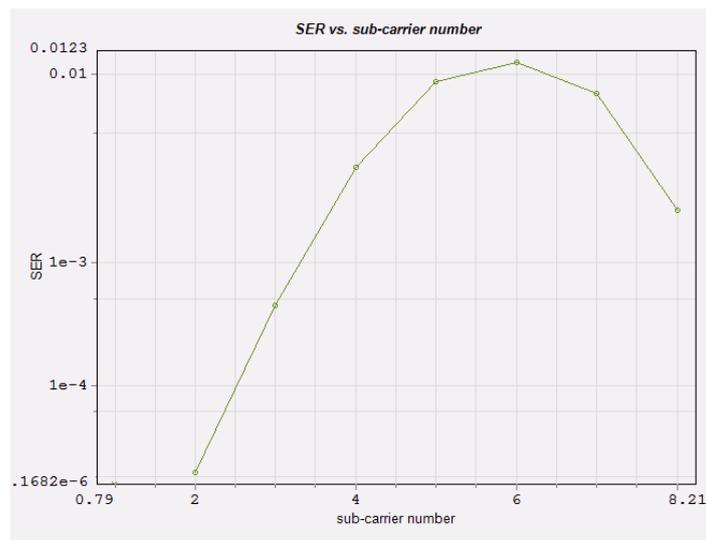
Pour une fibre de 40 km de long, une modulation 16QAM avec 16 porteuses, la figure III.20 montre la variation du SER.



**Figure III.20** variations du SER pour une chaine radio sur fibre

### III.8.1.2 Pour une chaine OFDM pour réseau d'accès

En donnant les mêmes paramètres que la chaine radio sur fibre, la figure III.21 montre la variation du SER.



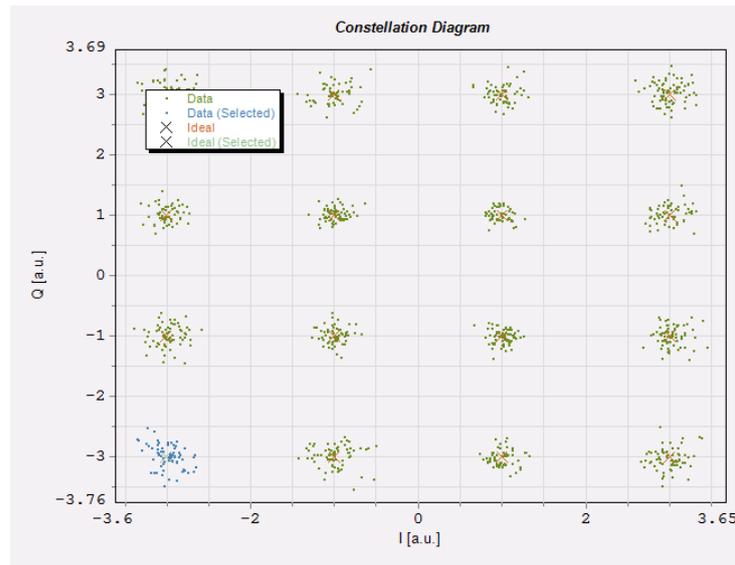
**Figure III.21** variations du SER pour une chaine OFDM pour réseau d'accès

En observant les SER des deux chaines, la chaine radio sur fibre a un SER bas par rapport a la chaine OFDM pour le réseau d'accès ce qui signifie que la chaine radio sur fibre peut transmettre à une plus grande distance que la chaine OFDM pour le réseau d'accès. Cela est dus à l'amplificateur que possède un système radio sur fibre.

## III.8.2 Comparaison par rapport au taux de symbole

### III.8.2.1 Pour la chaine radio sur fibre

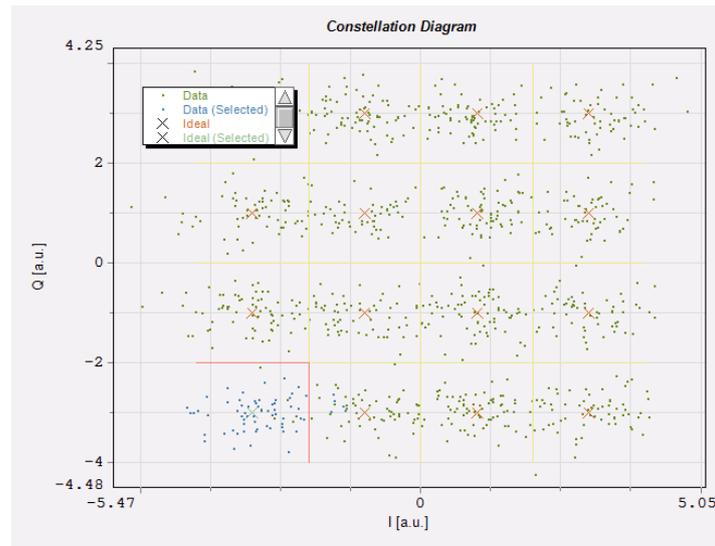
Pour une fibre de 40 km de long et un taux de symbole de 20 bauds, une modulation 16QAM avec 16 porteuses la figure III.22 montre le diagramme de constellation.



**Figure III.22** diagramme de constellation pour une chaine radio sur fibre

### III.8.2.2 Pour une chaine OFDM pour réseau d'accès

En donnant les mêmes paramètres que la chaine radio sur fibre, la figure III.23 montre le diagramme de constellation.



**Figure III.23** diagramme de constellation pour une chaine OFDM pour le réseau d'accès

Après visualisation des constellations la liaison radio sur fibre a une meilleure performance que celle de l'OFDM pour le réseau d'accès.

## III.9 Conclusion

Nous avons implémenté les différents blocs de la technique OFDM optique à détection directe. A travers les simulations, on montre que les performances du système OFDM optique se dégradent en augmentant la longueur de la fibre, le nombre de porteuses et l'ordre de la modulation.

## Conclusion Générale

Le travail que nous avons établi dans ce projet de fin d'étude, est accomplie dans le cadre de l'étude d'un réseau d'accès OFDM-PON.

La technologie OFDM est porteuse de nombreuses promesses pour satisfaire en partie les besoins des réseaux d'accès, car autorisant des débits élevés, et les architectures d'émission et réception utilisables pour cette technologie rendent possibles des équipements à faible complexité et faible coût, et dont la consommation énergétique est réduite.

Le développement très important des réseaux FTTx en Europe et dans le monde offre un cadre idéal pour la radio sur fibre. En effet cette technologie permet de partager les infrastructures optiques existantes entre les systèmes hauts débits optiques et les systèmes radio. La multiplication de différents services sur le même support physique permet d'avoir une convergence fixe/mobile qui simplifie la maintenance du réseau.

Nous avons perçu l'importance de la fibre optique qui s'est imposé comme meilleur des supports développés jusqu'ici, avec une grande bande passante et une faible atténuation.

Nous avons également constaté sur la combinaison dans un réseau, les atouts de la fibre optique. Le haut débit, la faible atténuation et celui des systèmes sans fils.

La simulation portant sur le système OFDM-PON a montré que ce domaine prometteur permet aux usagers d'avoir un haut débit avec une grande flexibilité.

Ce sujet n'est qu'une ouverture pour accéder à d'autres études, des améliorations feront l'objet de travaux à venir sur les performances du système complet et sur des nouvelles applications (intégration de nouveaux réseaux radio).

# Références Bibliographiques

## Chapitre I :

- [I.1] Francois DUTHILLEUL, réseau optique passif, disponible sur <http://www.learnerstv.com/course.php?cat=Engineering>
- [I.2] N.PHAM, M.LAOUIREM, P.COUSINEAU, Rapport sur les technologies XDSL ; Etude bibliographique ; cours réseaux, ENSEIRB E3, 1999
- [I.3] Mlle Mohamed Ali Fatoumata ; Etude de la transmission dans le réseau optique passif ; université Oran , mémoire de fin d'étude 2006
- [I.4] Livre blanc, le réseau PON, Element d'appréciation techniques économique et réglementaires, 18 Decembre 2006
- [I.5] Dr R.Hamdi, Extrait du cours de Master 1 en réseau optique 2012
- [I.6] Irene et M. Joindot, "Les télécommunications par fibres optiques," collection technique et scientifique des télécommunications, 1996
- [I.7] Pierre Lecoy, Telecom sur fibres optiques, disponible à l'université 08 Mai 1945 de Guelma
- [I.8] Quoc Thai NGUYEN, emetteurs achromatiques pour le réseau d'accès optique haut débit multiplexé en longueurs d'onde, préparée au laboratoire Foton CNRS UMR 6082
- [I.9] Ecole Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et de Technologies, Thèse soutenue à Lannion le 21 Janvier 2011

## Chapitre II :

- [II.1] H. Bogucka and A. Conti. Degrees of freedom for energy savings in practical adaptive wireless systems. *IEEE Communications Magazine*, 49(6) : 38-45, 2011.
- [II.2] Jonathan G. Koomey. Estimating total power consumption by servers in the U.S. and the world. Technical report, Lawrence Berkley National Laboratory, February 2007.
- [II.3] Gerhard Fettweis and Ernesto Zimmermann. ICT Energy Consumption - Trends and Challenges. In 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC 2008, September 2008.
- [II.4] Marian K. Kazimierczuk. *RF Power Amplifiers*. Wiley, November 2008.

## Chapitre III :

- [III.1] Miguel, Eduardo. (2010). Fiber-based orthogonal frequency division multiplexing transmission systems.
- [III.2] Max Fréjus O. SANYA <<Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans les métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM>> thèse de doctorat UNIVERSITÉ DE LIMOGES Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes Le 22 Octobre 2015

[III.3] Khalid, Salmi (juillet 2012) Etude et modélisation d'un système de transmission radio sur fibre