



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued**

**Faculté de Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude**

**En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Télécommunication**

**Spécialité : Systèmes de Télécommunication**

**Thème**

**ETUDE ET ANALYSE DES PERFORMANCES D'UN  
RÉSEAU OPTIQUE PASSIF LARGE BANDE  
BIDIRECTIONNEL (BPON)**

**Réalisé par :**

- Bedadda Ayman
- Guediri Lazhar

**Soutenu en juin 2018 devant le jury composé de :**

**Dr. Nacereddine Lakhdar**

**MCA**

**Président**

**M. Mohamed Boulila**

**MAA**

**Examineur**

**Dr. Abdelkader Medjouri**

**MCA**

**Rapporteur**

**ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2017/2018**

# REMERCIEMENTS

Avant tout, on remercie Allah de nous avoir aidés à accomplir ce travail.

Nous adressons les plus vifs remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin de l'élaboration de ce modeste mémoire.

Nos grands remerciements à notre encadreur Mr. ABDELKADER MADJOURI pour ses conseils et ses directives.

Nous lui sommes très reconnaissants pour l'excellent encadrement.

Nous tenons à remercier aussi à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation au département de Technologie.

Nous remercions vivement nos familles GUEDIRI et BEDDADA pour leur aide morale et matérielle durant toute la période de préparation.

## DEDICACES

*Je dédie cet œuvre à la femme qui m'a enfanté, celle qui a sacrifié tout  
pour moi : Son temps, son bonheur et sa santé*

*Ma mère noyau de mon esprit,  
A mon père, source d'énergie pour ma réussite,  
Ecole de mon éducation et principe de la vie,  
Que dieu me les préserve,*

*A mon grand-père et à ma grand-mère*

*A mes sœurs et frères*

*A mon binôme Ayman*

*A tous les membres de ma grande famille*

*A tous mes ami(e)s*

*A tous ceux qui m'aiment et qui je respecte.*

LAZHAR

## DEDICACES

*Je dédie ce travail de fin d'études à*

*Mes parents pour leurs soutiens, mes frères, Ma sœur et sa fille Souma*

*et*

*À toute ma famille.*

*À mes grands-parents, mes oncles et tantes.*

*À mon binôme Lazhar*

*À tous mes amis*

*Surtout Riadh, Souhaib, Hosin, El Taher, Mahmoud, Ayman, Younes*

*À ma deuxième famille Ferketou*

*Mohammed et Khadija et Leurs enfants*

*À me esposa Wahiba Asma.*

AYMAN

# RESUME

La demande en capacité liée à la transmission de tout type d'information (voix, vidéos, données, etc.) ne cesse de croître. Afin d'assurer cet croissance, le débit de transmission doit évoluer à la même vitesse, y compris dans les derniers kilomètres reliant les utilisateurs, que nous appelons les réseaux d'accès. De ce fait, l'optique a fait son entrée dans nos foyers depuis quelques années, à travers les liaisons très haut débit FTTH (fibre jusqu'à au domicile). Plusieurs techniques se distinguent pour amener la fibre jusqu'à l'abonné et nous allons nous attacher particulièrement à la solution PON (Réseaux Optiques Passifs). L'objectif de ce projet est d'étudier et simuler un réseau BPON à (4/8 et 16) abonnés bidirectionnel avec un débit dans les deux sens de 622 Mb/s .

## Les mots clés :

Fibre optique ; Réseaux d'accès ; FTTx ; Transmission haut débit.

# ABSTRACT

The demand for capacity related to the transmission of all types of information (voice, video, data, etc.) are continues to grow. In order to ensure this growth, the transmission rate must evolve at the same speed, including in the last kilometers connecting the users, which we call the access networks. As a result, optics has entered our homes in recent years, through the very high speed FTTH (Fiber to the Home) links. Several techniques are distinguished to bring the fiber to the subscriber and we will focus particularly on the solution PON (Passive Optical Networks). The objective of this project is to study and simulate a bidirectional (4/8 et 16 users BPON network with a flow of 622 Mb/s in both directions upstream and downstream.

## Keywords:

Optical fiber ; Access networks; FTTx; High speed transmission.

## الملخص

الطلب على القدرات المرتبطة بنقل جميع أنواع المعلومات (الصوت والفيديو والبيانات وما إلى ذلك) في نمو مستمر. ولضمان هذا النمو، سرعة التدفق يجب ان تتطور بنفس السرعة، بما في ذلك في الكيلومترات الأخيرة التي تربط المستخدمين، والتي نسميها شبكات الوصول. نتيجة لذلك، دخلت البصريات بيوتنا في السنوات الأخيرة، من خلال وصلات عالية التدفق (الليف حتى المنزل). العديد من التكنولوجيات سخرت لإيصال الألياف البصرية إلى المشترك وسنركز بشكل خاص على الحل المتمثل في الشبكات البصرية الخاملة. الهدف من هذا المشروع هو دراسة ومحاكاة شبكة ثنائية الاتجاه لعدة مستعملين وبمعدل نقل 622 ميجا/الثانية في كلا الاتجاهين.

## الكلمات المفتاحية:

الليف البصري، شبكة النفاذ، FTTx، الارسل ذو التدفق العالي

# SOMMAIRE

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| REMERCIEMENTS.....          | I    |
| DEDICACES .....             | II   |
| RESUME .....                | IV   |
| SOMMAIRE .....              | VI   |
| LISTES DES FIGURES .....    | VIII |
| LISTE DES TABLEAUX.....     | XI   |
| LISTE DES ACRONYMES .....   | XII  |
| INTRODUCTION GENERALE ..... | 1    |

## CHAPITRE I: GENERALITES SUR LA COMMUNICATION PAR FIBREOPTIQUE

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION .....                                        | 3  |
| I.1 BREF HISTORIQUE DES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES ..... | 3  |
| I.2 DESCRIPTION D'UNE LIAISON OPTIQUE .....               | 4  |
| I.3 ÉMETTEUR OPTIQUE .....                                | 5  |
| I.3.1 Source optique .....                                | 5  |
| I.3.1.1 LES DIODES ELECTROLUMINESCENTES (DEL).....        | 6  |
| I.3.1.2 LES DIODES LASER (DL).....                        | 6  |
| I.3.1.3 LA DIFFERENCE ENTRE LA DIODE DEL ET LA DIODE DL.  | 7  |
| I.3.2 Modulateur optique.....                             | 8  |
| I.3.2.1 LA MODULATION DIRECTE.....                        | 8  |
| I.3.2.2 LA MODULATION EXTERNE .....                       | 8  |
| I.4 RECEPTEUR OPTIQUE .....                               | 9  |
| I.4.1 La photodiode PN .....                              | 10 |
| I.4.2 La photodiode PIN.....                              | 10 |
| I.4.3 La photodiode à avalanche .....                     | 11 |
| I.4.4 Comparaison entre les récepteur PIN et PDA .....    | 12 |
| I.5 LA FIBRE OPTIQUE .....                                | 12 |
| I.5.1 Les différents Types des fibres optiques .....      | 13 |
| I.5.1.1 FIBRE OPTIQUE MONOMODE .....                      | 13 |
| I.5.1.2 FIBRES OPTIQUES MULTIMODES .....                  | 13 |
| I.6 PROPRIETES OPTIQUE LINEAIRE .....                     | 14 |
| I.6.1 Atténuation dans la fibre optique .....             | 14 |
| I.6.1.1 LA DISPERSION.....                                | 14 |
| I.7 EFFETS NON LINEAIRES .....                            | 15 |
| I.7.1 Effet de KERR.....                                  | 15 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| I.7.2 Effet de RAMAN..... | 15 |
| CONCLUSION .....          | 16 |

## **CHAPITRE II: LES RESEAUX D'ACCES OPTIQUES**

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION.....                                              | 17 |
| II.1 STRUCTURE DES RESEAUX OPTIQUES .....                      | 17 |
| II.1.1 Les réseaux cœur .....                                  | 18 |
| II.1.2 Les réseaux métropolitains.....                         | 18 |
| II.1.3 Les réseaux d'accès .....                               | 19 |
| II.2 LA TECHNOLOGIE FTTX .....                                 | 19 |
| II.2.1 Différentes architectures du FTTX .....                 | 20 |
| II.2.1.1 ARCHITECTURE POINT-A-POINT (P2P).....                 | 21 |
| Les avantages.....                                             | 21 |
| Les inconvénients .....                                        | 21 |
| II.2.1.2 ARCHITECTURE POINT-A-MULTIPOINT ACTIVE (AON).....     | 22 |
| II.2.1.3 ARCHITECTURE POINT-A-MULTIPOINT PASSIVE (PON).....    | 22 |
| II.3 LES RESEAUX OPTIQUES PASSIFS.....                         | 24 |
| II.3.1 Eléments constitutifs du PON .....                      | 25 |
| II.4 MULTIPLEXAGE OPTIQUE .....                                | 26 |
| II.4.1 Le multiplexage TDM.....                                | 26 |
| II.5 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN RESEAU PON.....           | 27 |
| II.5.1 La voie descendante .....                               | 27 |
| II.5.2 La voie montante .....                                  | 28 |
| II.6 LES DIFFERENTS TYPES DE PONs.....                         | 28 |
| II.6.1 Réseau optique passif ATM .....                         | 29 |
| II.6.2 Réseau optique passif à large bande.....                | 29 |
| II.6.3 Réseau optique passif Gigabit.....                      | 30 |
| II.6.4 Réseau optique passif Ethernet .....                    | 30 |
| II.7 COMPARATIF DES DIFFERENTS STANDARDS D'UN RESEAU PON ..... | 31 |
| II.8 LA SECURITE ET LA FIABILITE D'UN RESEAU PASSIF .....      | 31 |
| II.8.1 La sécurité du PON .....                                | 31 |
| II.8.2 La fiabilité du PON .....                               | 32 |
| II.9 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS D'UN RESEAU PON .....  | 32 |
| CONCLUSION .....                                               | 33 |

## **CHAPITRE III: LA SIMULATION DU RESEAU B-PON BIDIRECTIONNEL**

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| INTRODUCTION.....                       | 34 |
| III.1 CONFIGURATION DE SIMULATION ..... | 34 |
| III.2 RESULTATS ET DISCUSSION.....      | 39 |



|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.2.1 Différents utilisateurs avec différentes techniques de codage..... | 40        |
| III.2.1.1 FACTEUR DE QUALITÉ .....                                         | 41        |
| III.2.1.2 LE TAUX D'ERREUR BINAIRE.....                                    | 42        |
| III.2.1.3 HAUTEUR D'ŒIL .....                                              | 43        |
| III.2.2 Dispersion de la fibre .....                                       | 44        |
| III.2.2.1 FACTEUR DE QUALITE .....                                         | 44        |
| III.2.2.1 LE TAUX D'ERREUR BINAIRE.....                                    | 48        |
| III.2.2.3 HAUTEUR D'ŒIL .....                                              | 46        |
| III.2.3 Différents utilisateurs avec différentes puissances émises .....   | 47        |
| III.2.3.1 FACTEUR DE QUALITE .....                                         | 47        |
| III.2.3.2 LE TAUX D'ERREUR BINAIRE.....                                    | 48        |
| III.2.3.3 HAUTEUR D'ŒIL .....                                              | 48        |
| CONCLUSION .....                                                           | 49        |
| <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>                                           | <b>50</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>                                                 | <b>52</b> |
| <b>ANNEXE .....</b>                                                        | <b>54</b> |

# LISTES DES FIGURES

## CHAPITRE 01

|                                                                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure I.1:</b> Schéma de principe d'un système de transmission optique                                            | <b>5</b>  |
| <b>Figure I.2:</b> Structure d'un émetteur optique                                                                    | <b>5</b>  |
| <b>Figure I.3 :</b> Représentation schématique d'une diode DEL                                                        | <b>6</b>  |
| <b>Figure I.4 :</b> Spectre d'émission d'une DEL                                                                      | <b>6</b>  |
| <b>Figure I.5 :</b> Représentation schématique d'une diode DL                                                         | <b>7</b>  |
| <b>Figure I.6 :</b> Spectre d'émission d'une DL                                                                       | <b>7</b>  |
| <b>Figure I.7 :</b> modulation directe                                                                                | <b>8</b>  |
| <b>Figure I.8 :</b> modulation externe                                                                                | <b>9</b>  |
| <b>Figure I.9 :</b> Schéma d'un récepteur de données à détection directe                                              | <b>9</b>  |
| <b>Figure I.10 :</b> Photodiode PN                                                                                    | <b>10</b> |
| <b>Figure I.11 :</b> Photodiode PIN                                                                                   | <b>11</b> |
| <b>Figure I.12 :</b> Photodiode à avalanche                                                                           | <b>11</b> |
| <b>Figure I.13 :</b> Rapport signal à bruit en fonction de l'intensité du signal émis pour les photodiodes PDA et PIN | <b>12</b> |
| <b>Figure I.14 :</b> Schéma d'une fibre optique                                                                       | <b>13</b> |
| <b>Figure I.15 :</b> fibre optique monomode et son trajet lumineux                                                    | <b>13</b> |
| <b>Figure I.16 :</b> Fibre optique multimode à saut d'indice avec son trajet lumineux                                 | <b>14</b> |
| <b>Figure I.17:</b> fibre optique multimode à gradient d'indice avec son trajet lumineux                              | <b>14</b> |
| <b>Figure I.18 :</b> La dispersion chromatique                                                                        | <b>15</b> |
| <b>Figure I.19 :</b> Les deux sources principales de la dispersion chromatique                                        | <b>15</b> |

## CHAPITRE 02

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure II.1:</b> Schématisation d'architecture d'un réseau optique | <b>18</b> |
| <b>Figure II.2:</b> Structure d'un réseau FTTH/FTTO                   | <b>19</b> |
| <b>Figure II.3:</b> Structure d'un réseau FTTB                        | <b>20</b> |
| <b>Figure II.4:</b> Structure d'un réseau FTTC                        | <b>20</b> |
| <b>Figure II.5 :</b> Architecture point à point (P2P)                 | <b>21</b> |
| <b>Figure II.6 :</b> Architecture point-à-Multipoint Active (AON)     | <b>22</b> |
| <b>Figure II.7:</b> Architecture Point-to-Multipoint (PON)            | <b>23</b> |
| <b>Figure II. 8 :</b> Architecture de base du réseau d'accès (PON)    | <b>24</b> |
| <b>Figure II.9 :</b> Les éléments constitutifs du PON                 | <b>25</b> |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure II. 10 :</b> Multiplexage temporel TDM               | <b>26</b> |
| <b>Figure II.11 :</b> Le multiplexage en longueur d'onde WDM   | <b>27</b> |
| <b>Figure II.12:</b> Transmission sur un PON                   | <b>27</b> |
| <b>Figure II.13:</b> Architecture du la voie descendante       | <b>28</b> |
| <b>Figure II.14:</b> Architecture du la voie montante          | <b>28</b> |
| <b>Figure II.15:</b> Architecture et concept de base d'un BPON | <b>30</b> |

## CHAPITRE 03

|                                                                                                                                                                                                                                                                                             |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Figure III.1 :</b> Liaison B-PON bidirectionnelle.                                                                                                                                                                                                                                       | <b>35</b>    |
| <b>Figure III.2 :</b> À l'intérieur de l'ONU                                                                                                                                                                                                                                                | <b>37</b>    |
| <b>Figure III.3 :</b> Diagrammes d'œil pour 8 utilisateurs avec une longueur de fibre de 20 km en utilisant la technique NRZ<br>(a) voie montant / (b) voie descendante                                                                                                                     | <b>39</b>    |
| <b>Figure III.4 :</b> 8 utilisateurs utilisant la technique RZ.<br>(a) voie montant pour longueur de fibre de 20 km.<br>(b) voie descendante pour longueur de fibre de 20 km.<br>(c) voie montant pour longueur de fibre de 60 km.<br>(d) voie descendante pour longueur de fibre de 60 km. | <b>39/40</b> |
| <b>Figure III.5 :</b> Facteur Q maximum pour la voie descendante pour différents utilisateurs et techniques de codage                                                                                                                                                                       | <b>41</b>    |
| <b>Figure III.6 :</b> Facteur Q maximum pour la voie montant pour différents utilisateurs et techniques de codage                                                                                                                                                                           | <b>41</b>    |
| <b>Figure III.7 :</b> Hauteur d'œil pour la voie descendante pour différents utilisateurs et techniques de codage                                                                                                                                                                           | <b>43</b>    |
| <b>Figure III.8 :</b> Hauteur d'œil pour la voie montant pour différents utilisateurs et techniques de codage                                                                                                                                                                               | <b>43</b>    |
| <b>Figure III.9 :</b> Facteur Q maximum de la voie descendante pour différentes valeurs de dispersion de fibre                                                                                                                                                                              | <b>44</b>    |
| <b>Figure III.10 :</b> Facteur Q maximum de la voie montant pour différentes valeurs de dispersion de fibre                                                                                                                                                                                 | <b>44</b>    |
| <b>Figure III.11 :</b> Hauteur d'œil de la voie descendante pour différentes Valeurs de dispersion de fibre                                                                                                                                                                                 | <b>46</b>    |
| <b>Figure III.12 :</b> Hauteur d'œil de la voie montant pour différentes valeurs de dispersion de fibre                                                                                                                                                                                     | <b>46</b>    |
| <b>Figure III.13 :</b> Facteur Q maximum de la voie descendante pour différents utilisateurs et différentes puissance émise                                                                                                                                                                 | <b>47</b>    |
| <b>Figure III.14 :</b> Facteur Q maximum de la voie montant pour différents utilisateurs et différentes puissance émise                                                                                                                                                                     | <b>47</b>    |

|                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure III.15</b> : Hauteur d'œil de la voie descendante pour différents utilisateurs et différentes puissance émise | <b>48</b> |
| <b>Figure III.16</b> : Hauteur d'œil de la voie montant pour différents utilisateurs et différentes puissance émise     | <b>49</b> |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau II.1</b> : Comparaison des standards PON                                                              | <b>31</b> |
| <b>Tableau III.1</b> : Valeurs paramétriques de simulation optique BPON                                          | <b>36</b> |
| <b>Tableau III.2</b> : BER minimum pour la voie descendante pour différents utilisateurs et techniques de codage | <b>42</b> |
| <b>Tableau III.3</b> : BER minimum pour la voie montant pour différents utilisateurs et techniques de codage     | <b>42</b> |
| <b>Tableau III.4</b> : maximum BER de la voie descendante pour différentes valeurs de dispersion de fibre        | <b>45</b> |
| <b>Tableau III.5</b> : maximum BER de la voie montant pour différentes valeurs de dispersion de fibre            | <b>45</b> |
| <b>Tableau III.6</b> : BER de la voie descendante pour différents utilisateurs et différentes puissance émise    | <b>48</b> |
| <b>Tableau III.7</b> : BER de la voie montant pour différents utilisateurs et différentes puissance émise        | <b>48</b> |

## LISTE DES ACRONYMES

|               |                                                        |
|---------------|--------------------------------------------------------|
| <b>AON</b>    | point-à-Multipoint Active                              |
| <b>APON</b>   | ATM Passive Optical Network                            |
| <b>BER</b>    | Binary Error Rate                                      |
| <b>APD</b>    | Avalanche Photo diode                                  |
| <b>ATM</b>    | Asynchronous Transfer Mode                             |
| <b>BPON</b>   | Broadband Passive Optical Network                      |
| <b>CO</b>     | Central office                                         |
| <b>DEL</b>    | Light-Emitting Diode                                   |
| <b>DL</b>     | Diode LASER                                            |
| <b>EPON</b>   | Ethernet Passive Optical Network                       |
| <b>FSA</b>    | Full Service Access Network                            |
| <b>FTTB</b>   | Fiber To The Building                                  |
| <b>FTTC</b>   | Fiber To The Curb                                      |
| <b>FTTCab</b> | Fiber To The Cabinet                                   |
| <b>FTTH</b>   | Fiber To The Home                                      |
| <b>FTTN</b>   | Fiber To The Neighborhood                              |
| <b>FTTX</b>   | Fiber To The x                                         |
| <b>GEM</b>    | GPON Encapsulation Method                              |
| <b>GPON</b>   | Gigabit Passive Optical Network                        |
| <b>IEEE</b>   | Institute of Electrical and Electronics Engineers      |
| <b>LAN</b>    | Local Area Network                                     |
| <b>LASER</b>  | Light Amplification by Simulated Emission of Radiation |

|             |                                           |
|-------------|-------------------------------------------|
| <b>MAN</b>  | Metropolitan Area Network                 |
| <b>NRZ</b>  | No Return To Zero                         |
| <b>OLT</b>  | Optical Link Terminal                     |
| <b>ONT</b>  | Optical Network Terminal                  |
| <b>ONU</b>  | Optical Network Unit                      |
| <b>P2MP</b> | Point To Multipoint                       |
| <b>P2P</b>  | Point To point                            |
| <b>PD</b>   | Photodiode array                          |
| <b>PIN</b>  | Positive Intrinsic Negative photodiode    |
| <b>PN</b>   | p–n junction                              |
| <b>PON</b>  | Passive Optical Network                   |
| <b>Q</b>    | Quality factor                            |
| <b>QoS</b>  | Quality of Service                        |
| <b>RZ</b>   | Return To Zero                            |
| <b>SNR</b>  | Signal sur bruit                          |
| <b>TDM</b>  | Time Division Multiplexing                |
| <b>UIT</b>  | Union International de Telecommunication. |
| <b>WAN</b>  | Wide Area Network                         |
| <b>WDM</b>  | Wavelength Division Multiplexing          |
| <b>xDSL</b> | x Digital Subscriber Line                 |

# INTRODUCTION GENERALE

Trois décennies après sa première fabrication, la fibre optique est enfin utilisée pour connecter les particuliers via la technologie FTTH (Fiber To The Home). Ce support de transmission va transformer l'environnement des télécommunications à travers le monde au cours des prochaines années. Cette évolution aura un impact profond sur les fournisseurs contenus et les opérateurs de réseau. En effet, au cours des 15 à 20 années à venir, les réseaux d'accès en cuivre à travers le monde seront en grande partie remplacés par un réseau d'accès fibre. Le catalyseur le plus important de ce changement est la perception croissante que le réseau d'accès en cuivre n'est plus en mesure de répondre à la demande croissante en bande passante et à l'instantanéité requise pour une fluidité d'usage. Cet environnement a conduit à l'amorce d'une migration massive vers la fibre dans plusieurs pays où les consommateurs attendent des meilleures performances et des services plus riches.

Aujourd'hui, les technologies de l'Internet sont utilisées pour diffuser des programmes de télévision, contrôler des usines, interconnecter des banques, gérer des transmissions militaires, suivre des opérations médicales, ou transporter des conversations téléphoniques. Des services de plus en plus gourmands en bande passante comme le partage des contenus, le service de stockage en ligne, la télé haute définition (TV3D, TvHD), les jeux en ligne, le Peer To Peer, le téléenseignement et la télé médecine viennent s'ajouter à la liste de nos services usuels.

Le réseau d'accès appelé communément PON (Passive Optical Network) est défini comme étant le segment réseau (les derniers kilomètres) entre le premier équipement d'agrégation de l'opérateur d'accès et l'utilisateur. Dans le contexte général de l'accès optique actuel, les possibilités d'évolution de l'architecture du réseau sont pour l'instant limitées par les performances du réseau G-PON (Gigabit Passive Optical Network) qui est basé sur la technique de multiplexage temporel TDM-PON (Time Division Multiplexing PON). Les utilisateurs connectés à ce réseau PON, qu'ils soient 16, 32 ou 64, partagent un débit de 1,25 Gbit/s et 2,5 Gbit/s en voie montante (de l'abonné vers le central optique) et descendante (du central vers l'abonné) respectivement, par la répartition en temps. Ce standard G-PON est défini par la norme G.984 de l'Union Internationale de Télécommunications ITU et du forum FSAN (Full Service Access Network).



Le but de ce projet est d'étudier le réseau optique passif, en particulier le réseau bidirectionnel B-PON. Ce travail a divisé en trois chapitres, dans le premier chapitre, nous allons faire une étude générale d'une liaison de la fibre optique, d'abord est de donner un historique de la fibre optique. Ensuite, une description d'un système de transmission optique, puis nous définirons le principe, la composition, les différents types ainsi que les caractéristiques.

Le deuxième chapitre se concentre sur les réseaux optiques, et commence par les structures de réseaux optiques, puis à la technologie FTTx et son architecture. Ensuite, étudie les réseaux PON et ses éléments et techniques et son principe de fonctionnement et se termine par leurs types APON-BPON-EPON -GPON. En dernier nous allons citer les débits offerts par les réseaux PON, ainsi que la sécurité, la fiabilité, et les avantages et les inconvénients d'un réseau PON.

Le troisième et dernier chapitre, commence par la présentation du modèle de réseau BPON simulé. Ensuite, présente les différentes composantes de la liaison BPON et leurs caractéristiques. et définissent les configurations requises. Ensuite, démarrez la simulation et obtenez les résultats après avoir modifié les différents paramètres tels que la longueur de la fibre, les techniques de codage, le nombre d'utilisateurs, la dispersion et la puissance émise. Enfin, discutez des résultats et voyez lesquels des paramètres et des conditions donnent un meilleur résultat en termes de qualité de transmission.

## **Chapitre I: Généralités sur la communication par fibre optique**

### **Introduction**

Les transmissions par fibres optiques sont devenues des techniques courantes et éprouvées dans le domaine des télécommunications. Dans les réseaux interurbains, régionaux et inter-centraux, l'utilisation de guides d'ondes optiques représente le mode de transmission le plus fiable lorsqu'il s'agit d'acheminer des débits élevés sur de grandes distances, mais aussi des nombres élevés de canaux.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un bref historique sur la communication par fibre optique puis nous décrivons la liaison optique point à point et citons leurs différents éléments et quelque propriétés optique.

### **I.1 Bref historique des télécommunications optiques**

L'utilisation de la lumière comme moyen de communication n'est pas nouvelle et remonte très loin dans le temps. Les grecs, plusieurs siècles avant Jésus Christ, utilisaient déjà les signaux optiques comme moyen de communication à l'aide d'un code basé sur la position relative de torches. D'autres civilisations utilisaient la fumée ou plus généralement des objets visibles de loin (sémaphores) pour les mêmes besoins. Dans ces systèmes, l'œil humain tenait le rôle de photo-détecteur.

En 1854, le physicien irlandais John Tyndall démontra en utilisant un jet d'eau que la lumière pouvait être guidée sur un chemin courbe. Ce principe, connu sous le nom de réflexion totale interne, est à la base du fonctionnement de la fibre optique puisqu'il permet de piéger la lumière dans le milieu de plus haut indice.

La première approche sérieuse du problème fut faite par Graham Bell qui inventa en 1880 le photophone. En utilisant un miroir vibrant au rythme de la parole et à la réception une cellule au sélénium, Bell pu transmettre des sons sur une distance de plus de 200 m. Cependant, comme pour les systèmes précédents, la portée de ce système était limitée par deux facteurs fondamentaux : la radiance de la source utilisée qui était peu élevée et surtout la propagation de la lumière qui n'était pas guidée, si bien que l'énergie lumineuse se trouvait très vite dispersée.

Ce n'est qu'en 1966, grâce à une publication scientifique de K. C. Kao et G. A. Hockham, que la possibilité d'utiliser les fibres comme canal de transmission en télécommunications a été

sérieusement considérée. Les transmissions sur fibres optiques deviennent donc un objectif réalisable.

L'apparition du LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) en 1960, va favoriser le développement des télécommunications optiques.

En 1970, la firme Corning Glass Works fabrique aux Etats-Unis des fibres optiques à saut d'indice et obtient des affaiblissements inférieurs à 20 dB/km pour une longueur d'onde de 633 nm.

La bande passante d'une fibre optique dépend de la longueur de la fibre. C'est une grandeur donnée pour 1 km de fibre et généralement exprimée en MHz x km. En 1973, la réalisation des premières fibres performantes à gradient d'indice permet d'augmenter la bande passante de quelques dizaines à plusieurs centaines de MHz x km.

En 1977, Bell Systems et General Telephone réalisent les premiers essais sur le terrain respectivement à Chicago sur une distance de 2,5 km et à Long Beach sur une distance de 9 km.

En 1978, les fibres monomodes avec des bandes passantes de l'ordre d'une centaine de GHz x km et quelques dixièmes de décibels d'atténuation à 1,3 et 1,55  $\mu$ m deviennent une réalité.

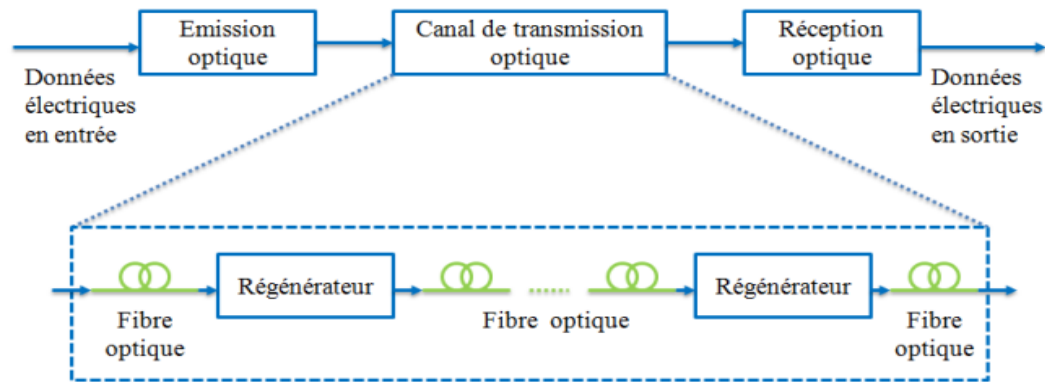
Les progrès des méthodes de fabrication, l'amélioration de la résistance mécanique des fibres, l'apparition de câbles et de composants passifs performants ont permis le développement des liaisons expérimentales puis des premières liaisons commerciales vers les années 1980.

## **I.2 Description d'une liaison optique**

Le principe d'une liaison optique est basé sur le principe de faire circuler une information entre un émetteur et un récepteur afin de réduire la déformation de l'information et aussi d'assurer le bon transfert de l'information. Tous les systèmes se composent d'un bloc émetteur, d'une série de tronçons de fibres optiques séparés par des régénérateurs, et d'un bloc récepteur. Le rôle d'un tel système, au niveau de l'émetteur, d'émettre un signal lumineux et de le moduler en fonction des données binaires et du format choisi. Ensuite, il a bien sûr pour autre objectif de faire propager ce signal optique sur une distance donnée, par le biais d'une ligne optique formée de fibres optiques et des régénérateurs, de telle sorte que le signal soit le moins affecté possible par les différents effets de propagation auxquels il est confronté. Enfin, au

niveau du récepteur, ce signal optique est détecté après la transmission pour être converti en signal électrique [2].

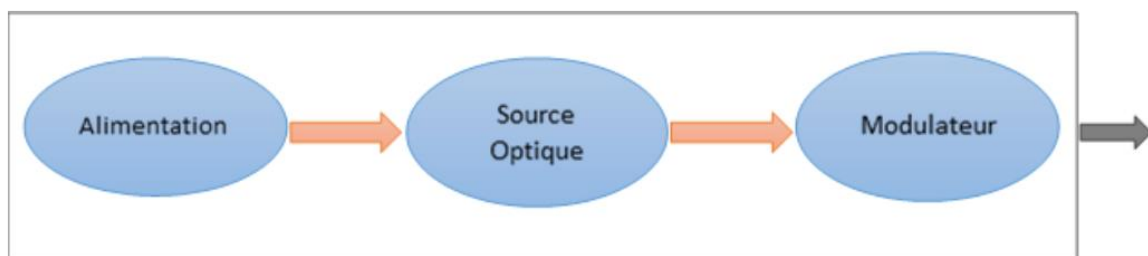
Généralement, une liaison optique est composée d'un émetteur et d'un récepteur reliés par une fibre optique (voir Figure I.1).



**Figure I.1:** Schéma de principe d'un système de transmission optique [2].

### I.3 Émetteur optique

La partie émission d'une liaison optique est composée de différents éléments (source optique, modulateur). Cette partie assure la livraison au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données.



**Figure I.2:** Structure d'un émetteur optique [3].

#### I.3.1 Source optique

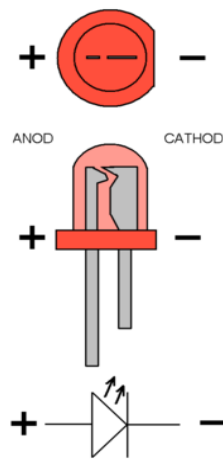
Les sources optiques sont des composants actifs dans le système de la communication optique. Leur fonction fondamentale est de convertir une énergie électrique en une énergie optique (conversion électro-optique).

En télécommunication optique, la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix des sources à spectres réduits telles que les diodes laser DL et les diodes électroluminescentes DEL [10].

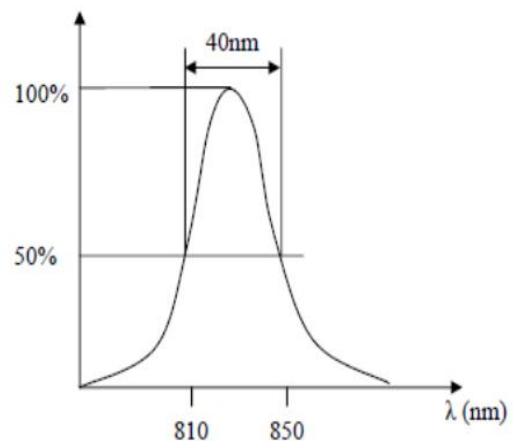
### I.3.1.1 Les diodes électroluminescentes (DEL)

Une diode électroluminescente (DEL) est un composant constitué de semi-conducteurs. Cette diode émet de la lumière quand elle polarisée en direct. La structure de base de la DEL est une jonction p-n, c'est-à-dire un empilement de deux couches semi-conductrices, la première de type p (trous majoritaires) et la seconde de type n (électrons majoritaires) [4].

C'est une source incohérente et polychromatique, elle présente un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes. Elle a un spectre typique d'émission spontanée, continu et assez large d'où une forte sensibilité à la dispersion chromatique (la figure I.4) [10].



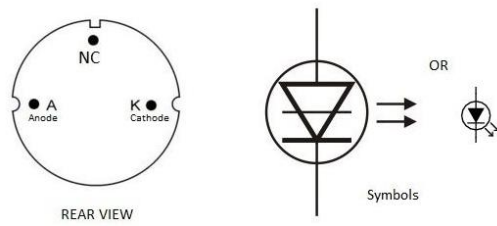
**Figure I.3 :** Représentation schématique d'une diode DEL



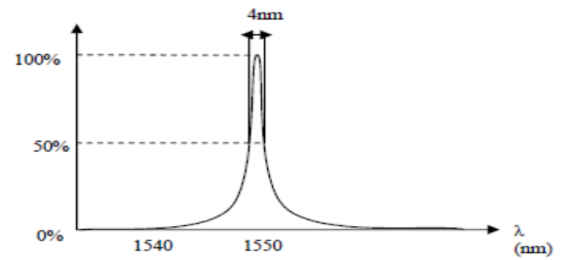
**Figure I.4 :** Spectre d'émission d'une DEL.

### I.3.1.2 Les diodes LASER (DL)

La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très longue distance, ce type de diode caractérisé par : une faible largeur spectrale et une bande passante importante. Le spectre est monomode longitudinal (figure I.6) [10].



**Figure I.5 :** Représentation schématique d'une diode DL



**Figure I.6 :** Spectre d'émission d'une DL.

### I.3.1.3 La différence entre la diode DEL et la diode DL

Il y a quelques différences entre la diode DEL et la diode DL peuvent être montrée ci-dessous :

- la sortie de la LED laser est incohérente alors que d'un laser à diode est cohérent
- La lumière d'une LED à une large largeur spectrale et une divergence de faisceau et donc la capacité de transport d'information d'un système est beaucoup moins.
- La lumière d'une diode laser DL a une cohérence spatiale et temporelle et est donc très monochromatique.
- La diode laser est hautement directionnel.
- Coupler la LED à la fibre est plus difficile et la quantité d'énergie qu'elle peut lancer dans la fibre est relativement faible.
- La LED est moins chère par rapport aux diodes laser.

### I.3.2 Modulateur optique

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

Le modulateur est un dispositif optique qui module le faisceau lumineux continu, et il y a deux techniques de modulation : la modulation directe et la modulation externe [5].

#### I.3.2.1 La modulation directe

La méthode consiste à faire varier le courant de la source. Il en résulte une variation proportionnelle de la puissance émise qui suit le signal modulateur, Ce type de modulateur est privilégié car il utilise peu de composants ce qui simplifie la conception et la fabrication [5].



*Figure I.7 : modulation directe [3].*

#### I.3.2.2 La modulation externe

La modulation externe consiste à graver les données électriques sur un signal optique continu en utilisant un modulateur. Ainsi, les défauts de la modulation directe qui sont liés au laser ne seront plus présents sur le signal optique. Le modulateur 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 pur et peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon  $v(t)$ . Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de  $v(t)$  et choisir les modifications du facteur de transmission [3].

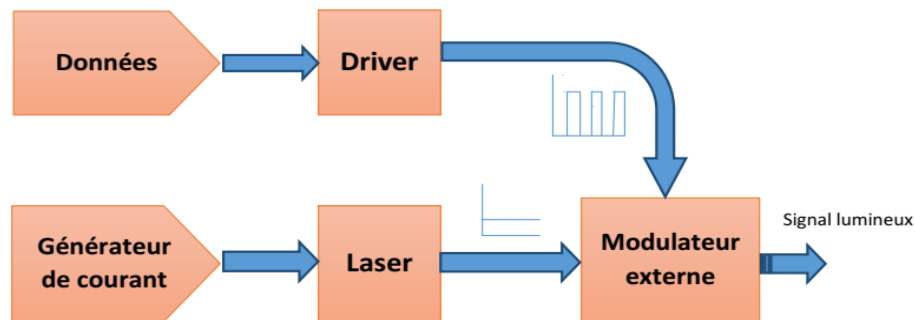


Figure I.8 : modulation externe. [3]

## I.4 Récepteur optique

De même que pour les modules d'émission, de nombreux efforts ont été fournis pour rendre les modules de réceptions de plus en plus performants. Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Ce module est donc composé de trois blocs fonctionnels (Figure I.9) [5].

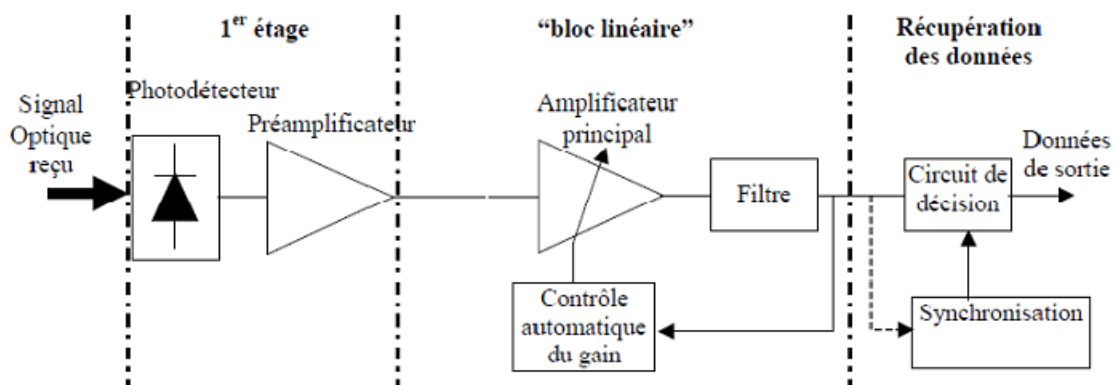


Figure I.9 : Schéma d'un récepteur de données à détection directe [6].

Le bloc du premier étage est composé du photodétecteur. Il est accompagné d'un préamplificateur, qui a pour but de rendre le photo-courant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photodétecteur [6].

Ensuite le bloc 'linéaire', composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre réducteur de bruit [6].

Le bloc 'récupération des données' correspondant au dernier étage du récepteur. A ce niveau il se trouve un circuit de décision et un autre de récupération de rythme, ce dernier est appelé circuit de synchronisation [6].



### I.4.1 La photodiode PN

La lumière à la sortie de la fibre est focalisée sur une jonction P-N à laquelle on applique les caractéristiques du point de fonctionnement (courant inverse de biais) afin de générer une paire d'électron-trou pour chaque photon empiétant sur ou près de sa région active. Le courant inverse ainsi appliqué crée un champ magnétique au travers de la jonction P-N ; ce qui cause une hausse du photo-courant avant la recombinaison permettant ainsi le passage du signal numérique optique en impulsion électrique. [5]

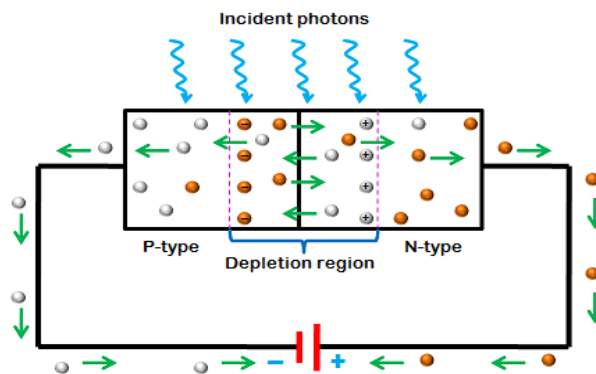


Figure I.10 : Photodiode PN

### I.4.2 La photodiode PIN

Les systèmes nécessitant plus de vitesse et de sensibilité lors de la réception du signal utilisent les photodiodes P-Intrinsèque-N qui sont plus onéreuses. Le principe consiste à coincer entre une jonction P-N un matériau semi-conducteur légèrement dopée (avec du gallium, Indium, Arsenic). 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 décharge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large.

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 [5].

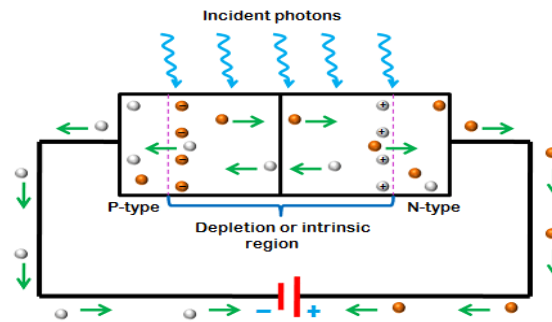


Figure I.11 : Photodiode PIN

### I.4.3 La photodiode à avalanche

Lorsque la puissance lumineuse reçue est très faible, les courants détectés sont peu élevés et se superposent au courant d'obscurité, conduisant à un mauvais rapport signal sur bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire que le courant détecté soit plus important en utilisant d'autres types de photodiode, comme les photodiodes à gain interne de type avalanche. La photodiode d'avalanche est une diode PIN dans laquelle est réalisée une amplification de puissance, cela permet d'extraire un signal électrique fort même pour une puissance lumineuse affaiblie.

Les photodiodes à avalanche sont aussi utilisées grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte [10].

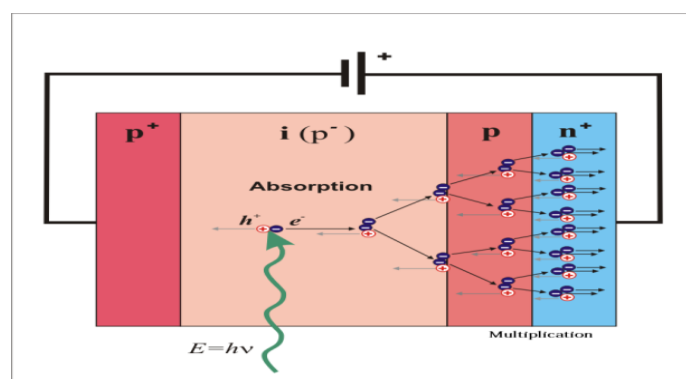
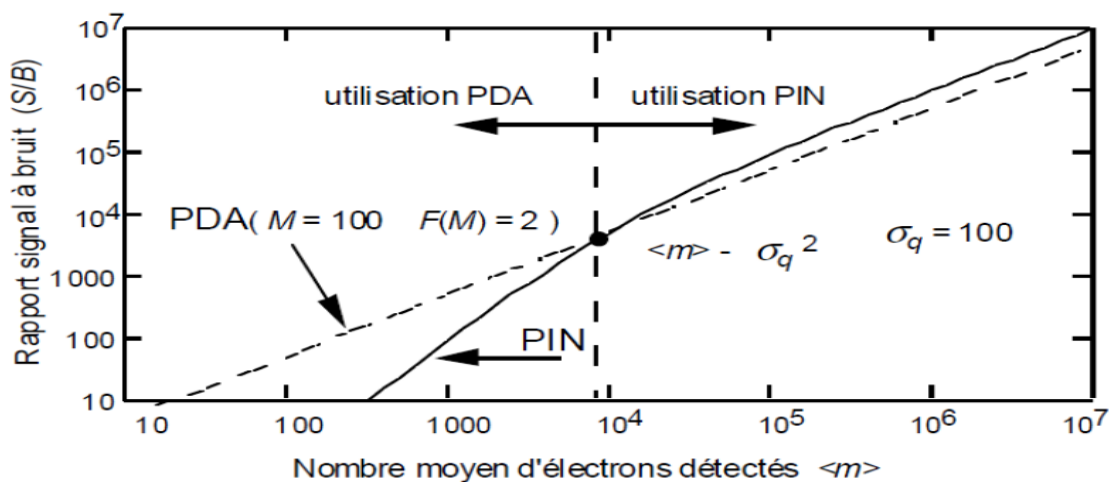


Figure I.12 : Photodiode à avalanche

### I.4.4 Comparaison entre les récepteur PIN et PDA

Une comparaison des performances entre les deux photodiodes permet de faire un choix. Le rapport Signal sur Bruit (S/B) est défini par le rapport du (Photo-courant engendré par la puissance)<sup>2</sup> du signal optique sur le (Courant de bruit du photodétecteur plus courant de bruit de l'amplificateur)<sup>2</sup>. Pour de faibles niveaux, le rapport signal sur bruit est meilleur avec une photodiode à avalanche alors que pour des niveaux plus forts, il vaut mieux utiliser une photodiode PIN [11].

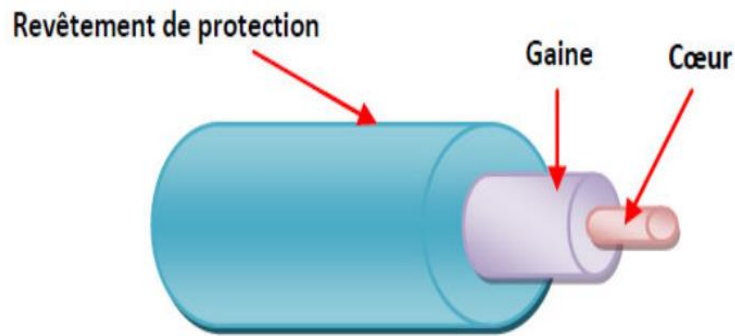


*Figure I.13 : Rapport signal à bruit en fonction de l'intensité du signal émis pour les photodiodes PDA et PIN [11].*

## I.5 La fibre optique

La fibre optique est un support de transmission de la lumière (canal de transmission) dans les systèmes optiques permettant la transmission de données à haut débit grâce à des rayons optiques. Il est constitué des trois éléments principaux : le cœur la gaine et le revêtement de protection.

La fibre optique est, généralement, fabriquée de la silice, un matériau qui ressemble au verre. La silice est un composé de silicium (Si) et d'oxygène (O) dont la formule chimique est  $\text{SiO}_2$ . Nous retrouvons ce composé dans la nature dans différents minéraux tels que le quartz. Le principe de fabrication d'une fibre optique repose sur l'étirage d'une préforme de verre. Grâce à des techniques complexes, on peut ainsi étirer un tube de verre d'un mètre de long sur 10 cm de diamètre jusqu'à en faire une fibre optique de 150 km de long.



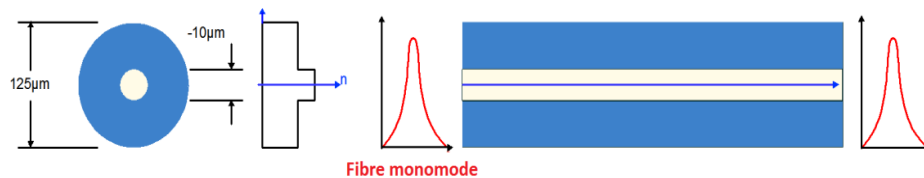
*Figure I.14 : Schéma d'une fibre optique.*

### I.5.1 Les différents Types des fibres optiques

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur et la longueur d'onde utilisée : les fibres monomodes et multimodes.

#### I.5.1.1 Fibre optique monomode

Dans cette fibre l'onde se propage alors suivant un seul chemin optique sans réflexion car le diamètre de cœur est très petit. On préfère utiliser des fibres Monomodes pour de plus longues distances et/ou de plus hauts débits.



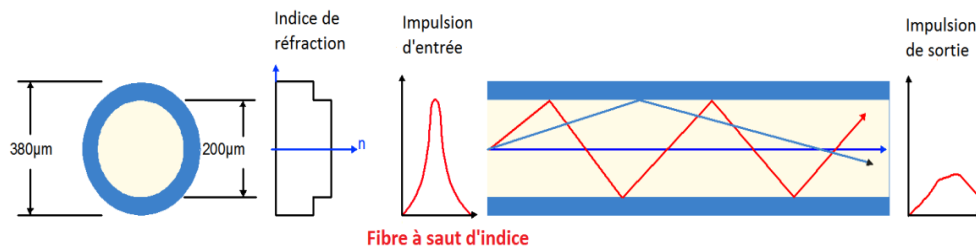
*Figure I.15 : fibre optique monomode et son trajet lumineux.*

#### I.5.1.2 Fibres optiques multimodes

Les fibres optiques multimode peuvent être classées en deux catégories : à saut d'indice et à gradient d'indice.

##### ➤ La fibre multi modes à saut d'indice

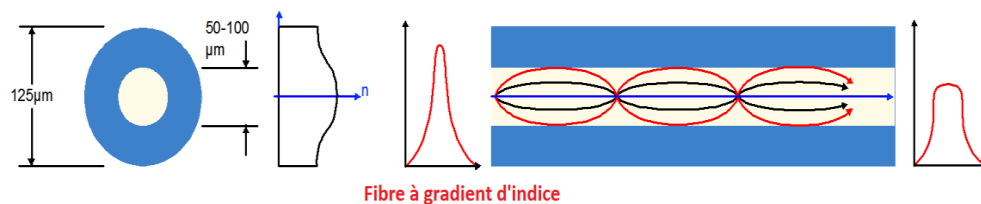
Elles sont constituées d'un cœur d'indice uniforme et d'une gaine avec une rupture d'indice, ou saut, à la frontière cœur-gaine. La lumière est guidée par réflexion totale interne à l'interface cœur-gaine, elle suit un chemin en zigzag.



**Figure I.16 :** Fibre optique multimode à saut d'indice avec son trajet lumineux.

### ➤ La fibre multi modes à gradient d'indice

Dans ce type de fibres, l'indice du cœur diminue graduellement depuis l'axe centre de propagation jusqu'à la gaine.



**Figure I.17:** fibre optique multimode à gradient d'indice avec son trajet lumineux.

## I.6 Propriétés optique linéaire

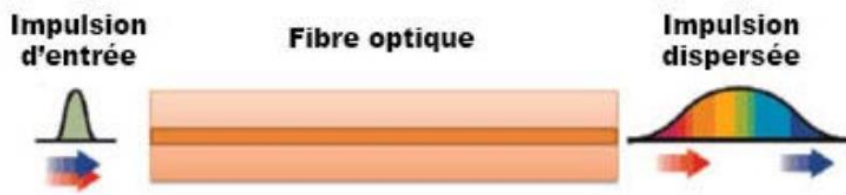
Il y a beaucoup de propriétés linéaires qui caractérisent la fibre optique et il en sera présenté quelques-unes ci-dessous

### I.6.1 Atténuation dans la fibre optique

Une perte, ou atténuation se traduit par la perte d'énergie lumineuse dans la fibre. Elle est mesurée en dB/Km. Les longues portées utilisées avec les fibres optiques influent directement sur le signal lumineux, mais ce n'est pas la seule cause d'atténuation qui existe, en effet, l'absorption, la diffusion, les courbures et les pertes de connectiques sont les principales causes de l'atténuation [5].

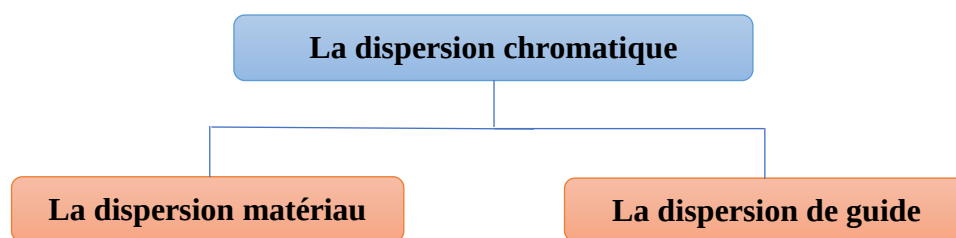
#### I.6.1.1 La dispersion chromatique

Dans les fibres optiques, La dispersion chromatique est une variation de la vitesse de propagation de l'onde lumineuse avec la longueur d'onde, le long de la fibre, elle concerne aussi bien les fibres monomodes que les multimodes.



*Figure I.18: La dispersion chromatique [12].*

La dispersion chromatique résulte des deux sources : la dispersion de guide et la dispersion de matériaux.



*Figure I.19 : Les deux sources principales de la dispersion chromatique*

## I.7 Effets non linéaires

Les effets non linéaires sont la variation de la vitesse de propagation liée à la longueur d'onde d'une part et à l'intensité d'autre part. Ils sont généralement présents dans les fibres monomodes et peuvent se traduire par :

- Une atténuation du signal en fonction de l'augmentation de puissance transmise.
- Une création de nouvelles longueurs d'onde.

Les principales causes des effets non linéaires sont :

### I.7.1 Effet de KERR

Il est créé dans un matériau à l'aide d'un champ électrique extérieur et il est dû à la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité optique [14].

### I.7.2 Effet de RAMAN

C'est le phénomène par lequel un milieu peut modifier légèrement la fréquence du signal qui y circule. Ce décalage de fréquence correspond à un échange d'énergie entre le rayon lumineux et les vibrations du matériau [14].

## **Conclusion**

Nous avons vu dans ce chapitre la description d'une liaison de fibre optique et de ses différents éléments tels que les composants de l'émetteur et du récepteur et le canal de transmission qui est la fibre optique avec leurs types.

Nous pouvons dire que la fibre optique est le meilleur support de transmission pour transporter les très hauts débits de données numériques et le besoin de celui-ci dans la communication moderne augmente jour après jour.

Ce système est la base de l'architecture optique passive PON (Passive Optical Network) qui sera étudiée dans le chapitre suivant.

## **Chapitre II: Les réseaux d'accès optiques**

### **Introduction**

Les progrès dans les technologies multimédias ont conduit au développement actif de nombreux types de services à large bande, tels que la fourniture de services de données, voix et vidéo (Triple Play). Les réseaux PON (réseaux optiques passifs) peuvent fournir ces services de manière rentable. Les réseaux PON sont des réseaux d'accès optique qui s'étendent d'un bureau central d'opérateur à des maisons individuelles, des immeubles d'habitation et des bureaux d'affaires.

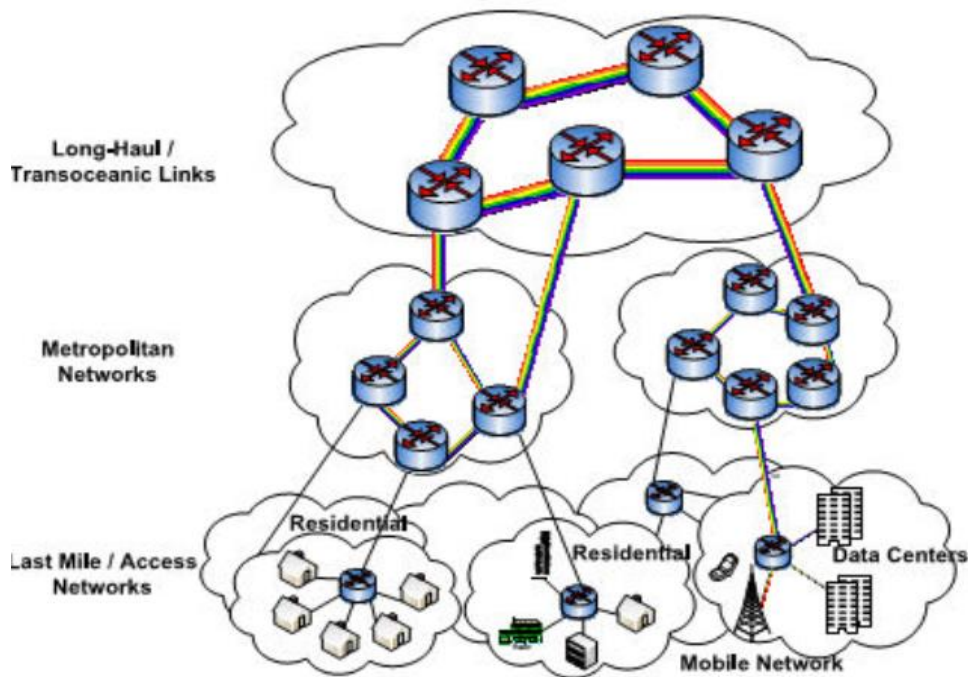
Les PON sont généralement caractérisés par l'absence de composants actifs, à l'exception des sites où l'OLT (terminaison de ligne optique) et l'ONU / ONT (unité de réseau optique / terminaison de réseau optique) sont placés. Cependant, un PON peut également inclure un RE (Reach Extender), qui contient des composants actifs, lorsqu'une longue distance entre l'OLT et l'ONU est requise. Les PON sont généralement basés sur des topologies de réseau arborescent qui utilisent des répartiteurs optiques passifs.

Ce chapitre introduit les réseaux optiques, en particulier les réseaux optiques passifs, ses éléments constitutifs, son principe de fonctionnement. Nous décrivons aussi les deux architecteurs principaux de réseau FTTH : point à point, point à multipoints passif, et les différents types de réseaux PON. En plus, nous présenterons les techniques de multiplexage utilisée dans la technologie PON (TDM, WDM).

### **II.1 Structure des réseaux optiques**

On distingue trois types de réseaux, suivant leurs tailles et leurs débits de transfert, au fait tous les réseaux sont des assemblages des réseaux locaux :





*Figure II.1: Schématisation d'architecture d'un réseau optique*

- ✓ **Le réseau cœur** : s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres.
- ✓ **Le réseau MAN**: ayant des dimensions de l'ordre de la centaine de kilomètres.
- ✓ **Le réseau LAN** : encore appelés réseaux de distribution ou réseaux d'accès dont la couverture est des dimensions de l'ordre de quelques kilomètres à quelques dizaines [10].

### II.1.1 Les réseaux cœur

On les appelle également les réseaux WAN. Ce sont généralement des réseaux dotés d'une structure maillée ou en anneaux où les débits de transmission de données sont supérieurs à 100 Gbit/s.

Les distances d'interconnexions varient entre la centaine de kilomètres et plus de mille kilomètres, couvrant ainsi des zones géographiques à l'échelle des continents [7].

### II.1.2 Les réseaux métropolitains

Encore appelé réseau intermédiaire, le réseau métropolitain connaît en ce moment un véritable essor. Déployé entre le dernier autocommutateur à autonomie d'acheminement du réseau longue distance et une zone plus précise (arrondissement, campus, petite ville, ...),

Il possède un environnement souvent très complexe et divers. Fondamentalement, on peut distinguer les réseaux métropolitains structurants et métropolitains d'accès.

Les réseaux métropolitains structurants sont généralement constitués d'anneaux de 80 à 150km de circonférence avec six à huit nœuds. En revanche, les réseaux métropolitains d'accès sont des anneaux de 10 à 40km de circonférence dotée de trois ou quatre nœuds avec des embranchements vers des sites distants. Suivant les réseaux ou les pays, ces chiffres peuvent varier considérablement. En particulier, il existe des différences notables entre les zones très peuplées d'Europe et d'Asie, où les distances seront inférieures, et les Etats-Unis où les applications métropolitaines s'apparentent à de véritables réseaux régionaux [10].

### **II.1.3 Les réseaux d'accès**

Il est également nommé réseau de distribution ou d'accès. C'est la dernière partie du réseau de télécommunication, celle qui relie l'abonné et le dernier autocommutateur. Sa longueur varie de 2 à 50 km et sa capacité est au plus du même ordre de grandeur que celle du réseau métropolitain.

Il est toujours constitué par une partie en fibre optique entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. Cependant, il est de plus en plus envisagé dans l'avenir de réduire la contribution de l'électrique pour aller vers le tout optique dans le but d'augmenter le débit disponible chez l'abonné [10].

## **II.2 La technologie FTTx**

Le FTTx (Fiber To The x) est la nouvelle technologie utilisée pour le transport de données à très haut débit. Cette technologie propose un débit théorique maximal de 100 Mo/s et un taux d'affaiblissement très faible. Pour ce faire, elle utilise comme support physique la fibre optique.

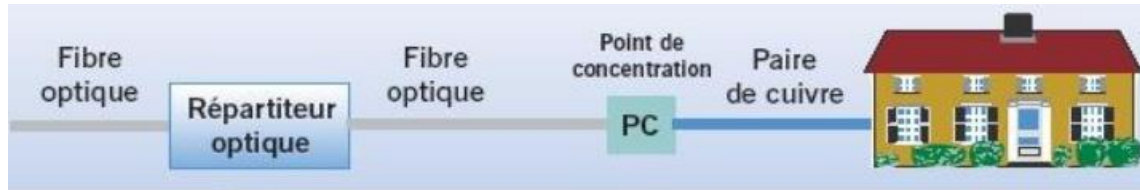
Il existe plusieurs acronymes pour cette technologie, chacun indiquant jusqu'à quel niveau de la liaison la fibre optique est utilisée.

- **FTTH / FTTO** : La terminaison du réseau optique, propre à un abonné, est implantée dans ses locaux. La fibre optique va donc jusqu'à au domicile ou au bureau [3].



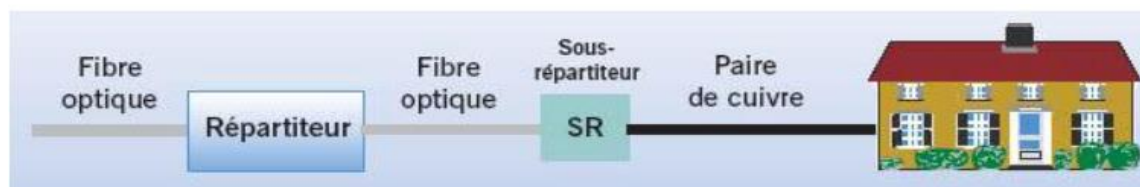
**Figure II.2:** Structure d'un réseau FTTH/FTTO [3].

- **FTTB** : La terminaison optique est localisée soit au pied de l'immeuble, soit dans un local technique, soit dans une armoire ou un conduit sur le palier. Elle est généralement partagée entre plusieurs abonnés [3].



*Figure II.3: Structure d'un réseau FTTB [3].*

- **FTTC** : La terminaison de réseau optique est localisée soit dans une chambre souterraine, soit dans une armoire du sous répartiteur sur la voie publique, soit dans un centre de télécommunications, soit sur un poteau [3].



*Figure II.4: Structure d'un réseau FTTC [3].*

- **FTTN** : Fibre s'étend à un point de raccordement (une armoire située dans une grande rue ou une unité de réseau optique) [8].

### II.2.1 Différentes architectures du FTTH

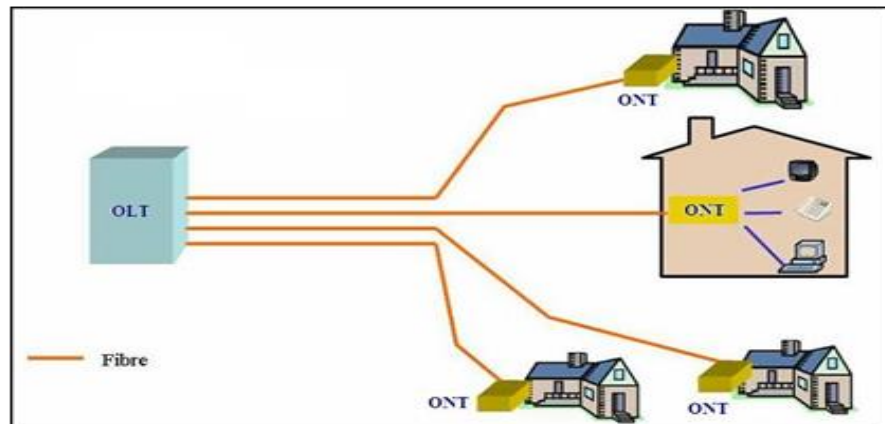
Les deux architectures couramment utilisées pour le déploiement FTTH sont :

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

Le choix de l'architecture active ou passive pour le déploiement dépend du type de services devant être fourni, du coût de l'infrastructure, de l'infrastructure actuelle et des plans futurs de migration vers les nouvelles technologies [8].

### II.2.1.1 Architecture point-à-point (P2P)

Le point-à-point est l'architecture la plus simple à mettre en œuvre parmi les topologies physiques du réseau d'accès optique. Elle consiste à avoir un lien physique en fibre optique directement entre le central et l'abonné (généralement bi-fibre) [3].



*Figure II.5 : Architecture point à point (P2P) [8].*

- **Les avantages**

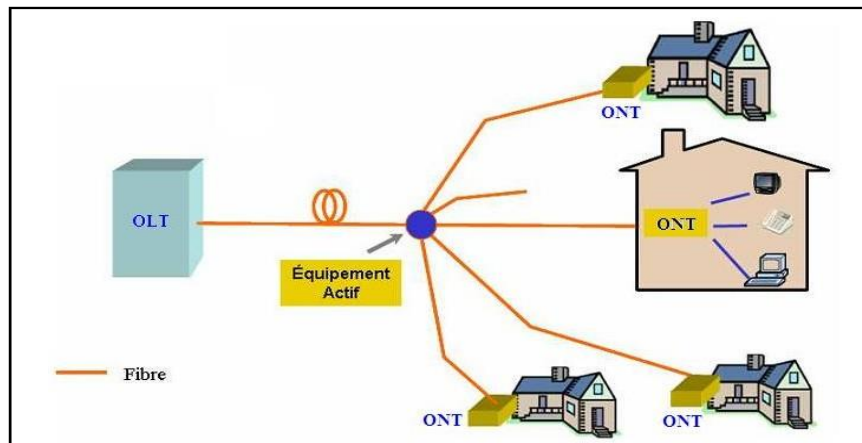
- Solution universelle adaptée aux clients résidentiels et aux entreprises.
- Budget optique optimal puisque pas de composants optiques entre l'OLT et l'ONT.
- Les composants d'extrémité ne requièrent pas de grandes performances donc peuvent être bas coût.
- La sécurité des données est garantie puisqu'il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

- **Les inconvénients**

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

### II.2.1.2 Architecture point-à-Multipoint Active (AON)

Ce type de réseau optique (P2MP) permettant de partager l'infrastructure entre plusieurs clients, Dans cette architecture appelée AON (Active Optical Network), on utilise un équipement « actif » installé à proximité d'une « grappe » d'utilisateurs d'un secteur géographique donné et regroupe ces utilisateurs, La terminaison finale peut être réalisée en fibre optique après avoir opéré une nouvelle conversion électro-optique du signal [8].

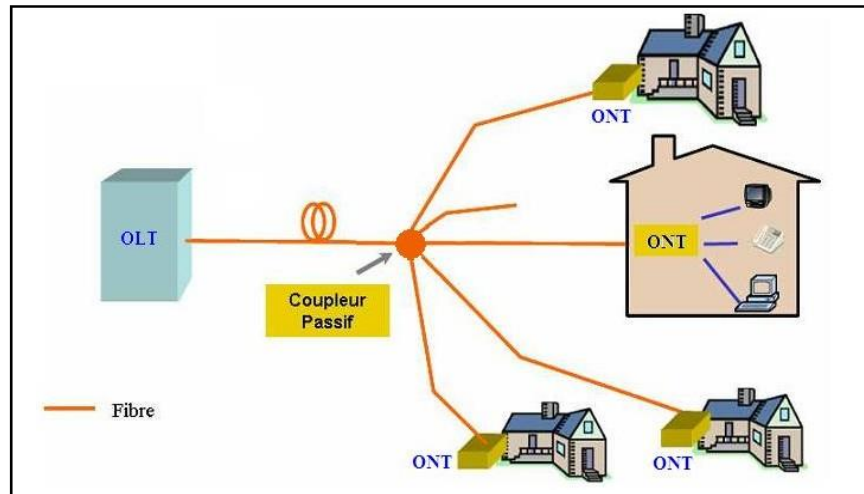


*Figure II.6 : Architecture point-à-Multipoint Active (AON) [8].*

- **Les avantages :**
  - Infrastructure partiellement partagée (économie sur la fibre)
  - Budget optique aisé (lié à la portée cuivre/optique)
  - Migration aisée entre cuivre et optique
- **Les inconvénients :**
  - Partie active dans le réseau (nécessite une alimentation)
  - Besoin d'une batterie de secours
  - QoS pas encore approuvée.

### II.2.1.3 Architecture point-à-Multipoint passive (PON)

Le PON (Passive Optical Networks) représente la deuxième solution P2MP. Le concept d'employer un réseau optique passif (PON) qui est composé uniquement des éléments passifs, L'élément principal de cette l'architecture est un coupleur optique passif qui divise la puissance optique entre les abonnés. Dans de tels réseaux, les utilisateurs partagent la même bande passante, ces systèmes recouvrent plusieurs normes qui se sont succédé au cours du temps [8].



**Figure II.7:** Architecture Point-to-Multipoint (PON).

- **Les avantages**

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

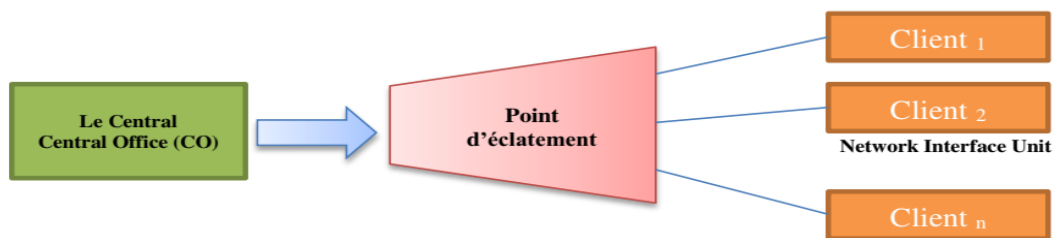
- **Les inconvénients**

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

### II.3 Les réseaux optiques passifs

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

Le réseau optique passif PON (**P**assif **O**ptical **N**etwork) 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 [7].



**Figure II. 8 :** Architecture de base du réseau d'accès (PON) [7].

Sur la figure (II.8), on distingue trois parties principales dans l'architecture du réseau d'accès :

- **Le central (Central office –CO) :** coordonne l'émission – réception des données en provenance des utilisateurs ou l'inverse, et permet de faire la liaison avec les réseaux supérieurs.
- **Le point d'éclatement :** a pour rôle de distribuer le flux descendant et montant à destination.
- **Network Interface Unit :** situé au niveau du block utilisateur et permet la connexion au réseau, selon le type de technologie d'accès cette partie peut avoir plusieurs appellations telles que ONU (Optical Network Unit), ONT (Optical Network Terminal) [7].

### II.3.1 Eléments constitutifs du PON

L'architecture d'un réseau optique passif PON est basée sur éléments essentiels suivant :

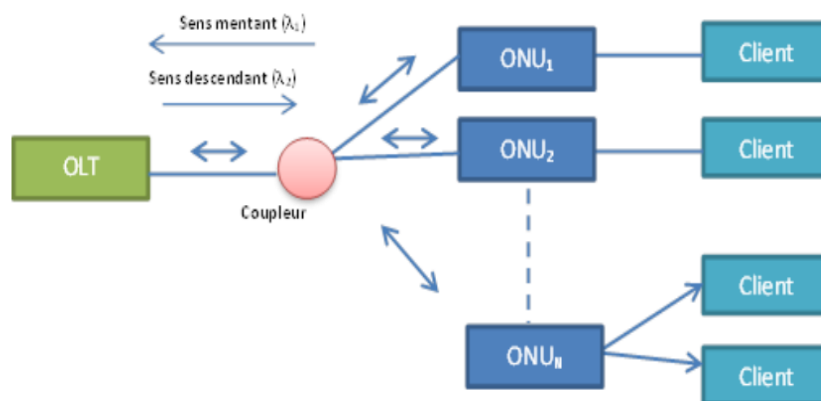
- **OLT (Optical Link Terminal) :** est un élément actif au niveau du central constitue l'équipement d'émission – réception [7].

- **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.

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 [14].

- **ONU (Optical Network Unit) :** c'est un équipement de type ONT, mais partagé entre plusieurs utilisateurs, et utilisé dans le cas où la fibre ne pénètre pas jusqu'au l'abonné (cas des FTTCab/Curb/Building). La transmission entre l'ONU et les abonnés est réalisée sur les paires de cuivre comme la technologie xDSL [8].

- **ONT (Optical Network Terminal) :** c'est l'interlocuteur direct de l'OLT. Il est placé au niveau de chaque logement dans le cas mono-client FTTH ; il constitue la partie réceptrice des signaux descendants et émettrice des signaux montants [7].



**Figure II.9 :** Les éléments constitutifs du PON [3].



## II.4 Multiplexage optique

La division de la bande passante en canaux peut être réalisée, comme en électronique, dans la dimension temporelle ou dans la dimension des fréquences. Dans le premier cas on parle de multiplexage temporel (TDM) et dans le second on parle de multiplexage en longueur d'onde (WDM).

### II.4.1 Le multiplexage TDM

Le multiplexage TDM consiste à imbriquer temporellement différents canaux de communication en trames successives. Si l'on se représente un flot d'information par les dents d'un peigne, le multiplexage temporel revient à superposer les peignes des différents canaux en les décalant les uns par rapport aux autres (voir la figure II.10) Cela nécessite une synchronisation précise à la réception, chaque canal temporel est démultiplexé puis acheminé vers sa destination.

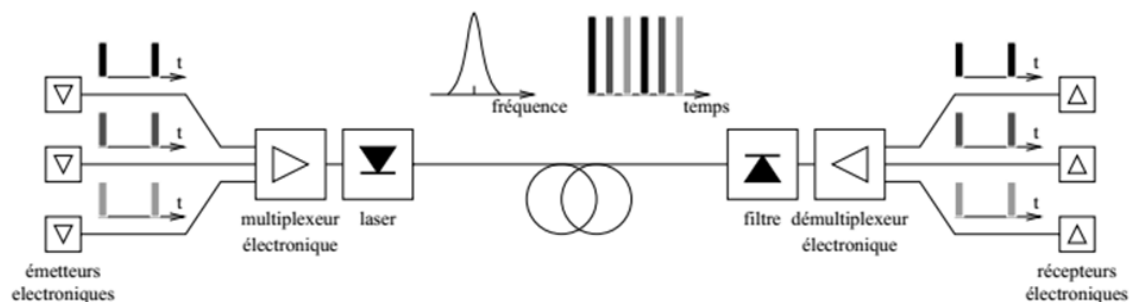
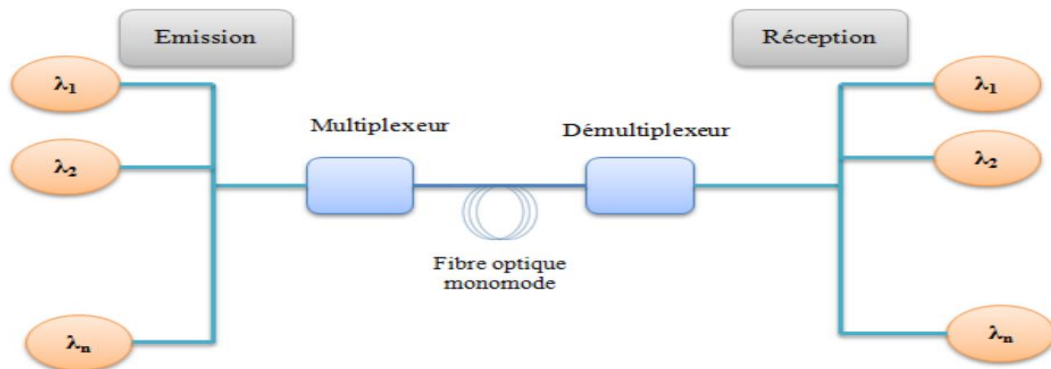


Figure II.10 : Multiplexage temporel TDM [15].

### II.4.2 Le multiplexage WDM

Le multiplexage en longueur d'onde est une technique utilisée en communications optiques qui permet de faire passer plusieurs signaux de longueur d'onde différentes sur une seule fibre optique en les mélangeant à l'entrée à l'aide d'un multiplexeur (MUX) et en les séparant à la sortie à l'aide d'un démultiplexeur (DEMUX).

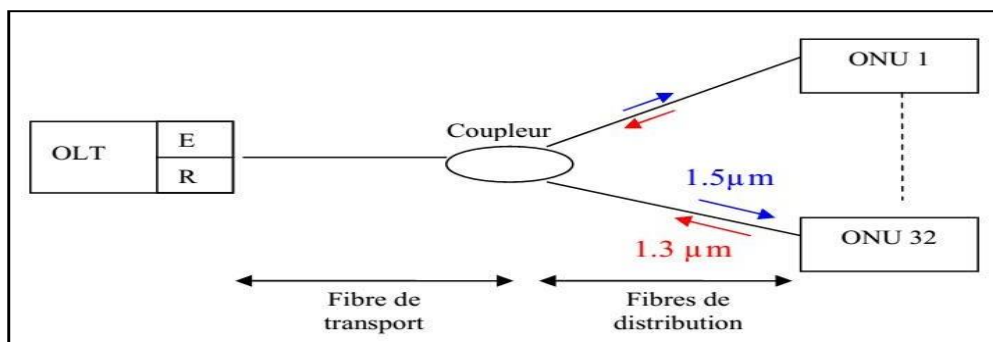
Le principe consiste à transporter plusieurs signaux sur un brin de fibre optique. Chaque signal est placé sur une longueur donnée grâce à un transpondeur. Puis via un multiplexeur optique, toutes les longueurs d'onde sont envoyées sur le même brin de fibre optique. A l'autre extrémité, un démultiplexeur va séparer les longueurs d'onde les unes des autres [14].



**Figure II. 11 :** Le multiplexage en longueur d'onde WDM [3].

## II.5 Principe de fonctionnement d'un réseau PON

Dans un réseau PON la transmission se fait sur une seule fibre optique en utilisant le multiplexage de longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing), il est à noter que les PONs actuels sont mono longueur d'onde c'est-à-dire qu'ils n'utilisent qu'une seule longueur d'onde pour le sens montant ou pour le sens descendant. Il s'agit de PON TDM (PON Time Division Multiplexing) [8].



**Figure II.12:** Transmission sur un PON [8].

### II.5.1 La voie descendante

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 II.13) montre ce principe.

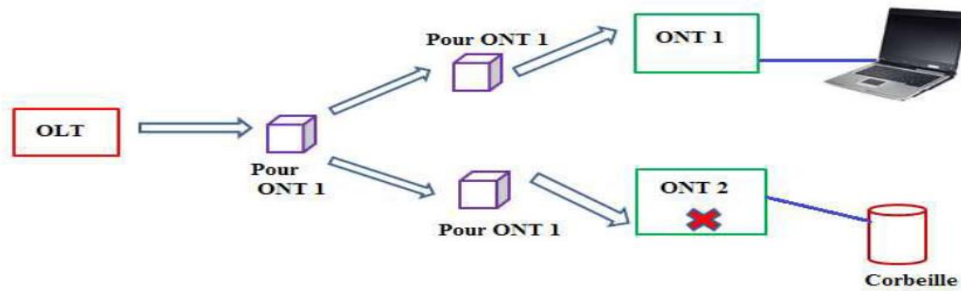


Figure II.13: Architecture du la voie descendante [14].

Dans le réseau PON et sur l'architecture du sens descendant, le débit instantané est partagé entre tous les abonnés qui reçoivent les données [14].

### II.5.2 La voie montante

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

L'OLT attribue à tour de rôle à chaque ONT un intervalle de temps (quelques micro secondes) pendant lequel cet ONT est seul autorisé à émettre (figure II.15). S'il a beaucoup de données à transmettre, l'OLT lui attribue davantage de temps de paroles, et inversement elle réduit pour les ONT qui émettent peu [14].

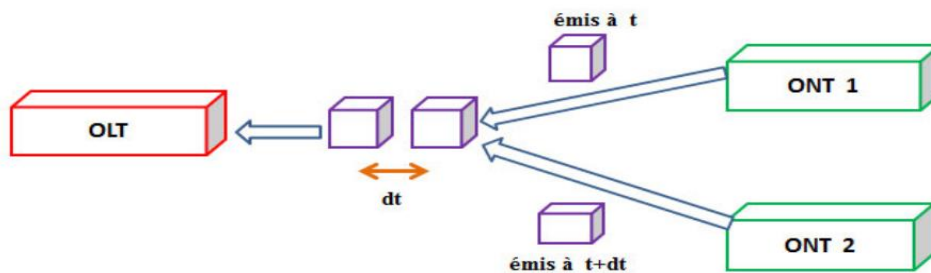


Figure II.14: Architecture du la voie montante [14].

## II.6 Les différents types de PONs

Depuis les années 1990, les technologies PON ont été normalisées par l'ITU (International Telecommunication Union) et par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), différents standards apparaissent au fil des années, on a ainsi défini : APON, BPON, GPON et EPON, le paragraphe qui suit détaille ces technologies.

### **II.6.1 APON**

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

Un système APON peut relier jusqu'à 32 abonnés au PON et leur fournit un système d'accès flexible et un débit élevé (622 Mbit/s ou 155 Mbit/s dans le sens descendant, 155 Mbit/s dans le sens montant). Dans le sens descendant, le multiplexage des cellules ATM est utilisé, alors qu'un protocole de TDMA commande l'accès ascendant des abonnés [8].

### **II.6.2 BPON (Broadband PON)**

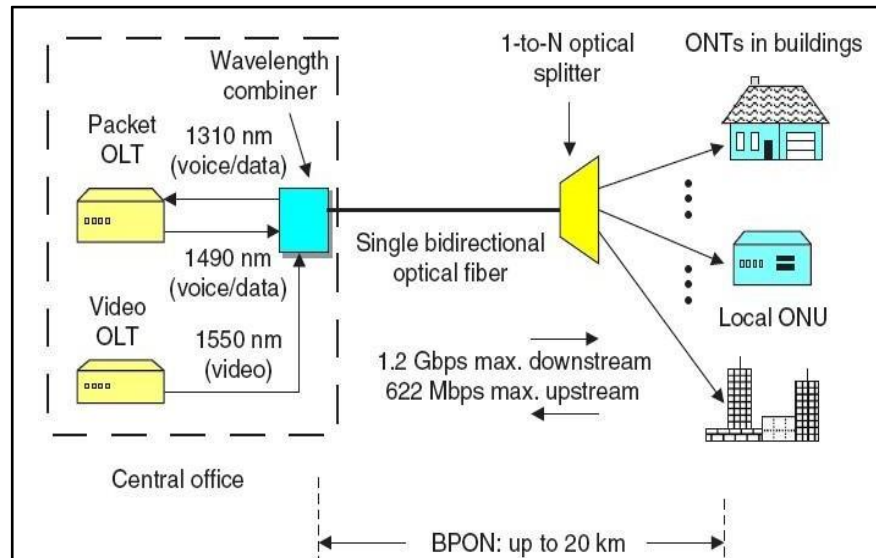
Le BPON est l'extension de l'APON en vue de fournir d'autres services, tels que l'Ethernet et la diffusion de la vidéo (broadcast vidéo). C'est un réseau de distribution en fibre optique à large bande. En effet, les améliorations récentes de l'APON incluent une vitesse plus élevée, le multiplexage en longueur d'onde WDM, une commande dynamique de la largeur de bande, une meilleure sécurité de données [3].

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

Les BPON actuellement déployés opèrent en l'un des 3 modes down Stream /up Stream : 155Mb/s /155Mb/s, 622Mb/s /155 Mb/s, 622Mb/s /622Mb/s ou 1244 Mb/s /622Mb/s. Les autres caractéristiques de réseau BPON sont :

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

L'avantage des A/BPONs est qu'ils permettent en quelque sorte la réallocation dynamique en mode TDM. En effet, vu que la bande offerte est limitée, les ONUs les plus actifs peuvent envoyer leurs données pendant les times slots des ONUs inactifs, de cette manière le débit par utilisateur actif peut être augmenté [8].



**Figure II.15:** Architecture et concept de base d'un BPON [8].

### II.6.3 GPON (Gigabit PON)

Le progrès de la technologie, le besoin en bande passante plus large, en plus de l'insuffisance de l'ATM, ont poussé à réviser le standard APON et à réfléchir à une autre solution appelée GPON (Gigabit PON) qui a été standardisée par l'ITU en 2003. L'architecture GPON ne repose plus sur un tramage ATM mais sur un protocole beaucoup plus simple appelé GFP (Generic Framing Procédure : Protocole de multiplexage).

### II.6.4 EPON (Ethernet PON)

L'architecture Ethernet PON a été standardisée en septembre 2004 par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sous la référence 802.3ah. Fortement déployée au Japon, en Corée et en Europe, la norme E-PON supporte le service « triple play : Voie, Data et la vidéo » sur IP. Elle est basée sur l'utilisation de l'Ethernet pour encapsuler et transmettre les données. Comme Ethernet est une technologie peu coûteuse, omniprésente et possède une très large bande passante, EPON apparaît comme la meilleure solution en ce moment pour délivrer les paquets IP à travers les PONs.

## II.7 Comparatif des différents standards d'un réseau PON

Le tableau ci-dessus résume les caractéristiques des différents standards d'un réseau PON

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

**Tableau II.1** : Comparaison des standards PON [8].

## II.8 La sécurité et la fiabilité d'un réseau passif

Le réseau PON offre un mode de fonctionnement sécurisé en ce qui concerne la confidentialité des données, il permet aussi d'assurer une fiabilité car la probabilité de défaillance d'un équipement est faible [14].

### II.8.1 La sécurité du PON

Dans la technologie PON il est difficile pour une personne malveillante d'essayer de capter des données qui ne lui seraient pas destinées, le réseau PON a mis en œuvre des mécanismes afin que l'abonné ne puisse lire que les données qui lui sont adressées. Le mécanisme de sécurisation employé est le suivant :

- ✓ Le trafic descendant est crypté. Il utilise l'algorithme standardisé AES à 128-bits : chaque équipement client a sa propre clé cryptage/décryptage privée, de nouvelles clés

sont automatiquement échangées par l'OLT et l'ONU à des intervalles de temps réguliers.

- ✓ Le trafic remontant est émis en utilisant une couleur optique de 1310 nm. Les modems client n'ont aucun moyen de détecter ce signal optique et par conséquent de lire le trafic remontant des autres clients.
- ✓ L'interception des données provoque l'interruption temporaire de tous les flux optiques, ce qui serait immédiatement détectée par l'OLT et générerait une alerte majeure [14].

### **II.8.2 La fiabilité du PON**

Pour assurer la fiabilité du réseau PON, L'ITU a utilisé le principe de la redondance des réseaux pour assurer la fiabilité du PON, en cas de panne d'un lien il bascule sur le lien secondaire. Pour les raccordements sensibles l'accès est dupliqué [14].

## **II.9 Les avantages et les inconvénients d'un réseau PON**

Le réseau PON permet d'autoriser des débits très importants tout en minimisant l'infrastructure (moins de fibres optique), il présente certains points positifs :

- Peu de fibres optiques sont employées dans le réseau PON
- Aucun local alimenté en énergie n'est nécessaire dans ce type de réseau, ce qui entraîne des économies d'investissement, d'exploitation et de maintenance.
- Au niveau de la centrale, le PON permet d'économiser de l'espace grâce au partage des ports des équipements actifs entre plusieurs abonnés.

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.
- Si un réseau est construit sur une architecture PON strict, celui-ci ne peut être partagé entre plusieurs fournisseurs des services qu'au niveau transport : un opérateur unique gère les OLT, et transporte jusqu'à l'abonné les données apportées à la centrale par des fournisseurs de service.

## **Conclusion**

L'évolution des communications optiques a permis aux réseaux de télécommunications d'atteindre un niveau de performance extraordinaire et a grand ouvert les portes devant l'apparition de nouvelles disciplines qui visent l'amélioration de l'existence et la création de nouveaux dispositifs pour la transmission et le traitement du signal optique. La rapidité et l'importance des progrès réalisés dans le domaine des télécommunications entraînent de véritables changements dans les structures des systèmes de transmission.



## **Chapitre III: La simulation du réseau B-PON bidirectionnel**

### **Introduction**

Dans ce chapitre nous allons faire l'étude d'une liaison B-PON bidirectionnelle à l'aide du logiciel « OPTISYSTEM », ce logiciel permet de faire la simulation de telle liaison et d'optimiser la qualité de transmission. Premièrement nous allons présenter les différents composants et éléments utilisés dans la liaison B-PON bidirectionnelle, Ensuite nous allons présenter les résultats obtenus avec l'architecture point à multipoint (PON), et cela en variant des paramètres de la liaison tel que le nombre d'utilisateurs, le type de modulation (NRZ, RZ), la dispersion chromatique et la puissance émise.

### **III.1 Configuration de simulation**

La figure III.1 donne la configuration de simulation qui est utilisée pour analyser les performances du système. Comme on peut évidemment le voir sur la figure III.1, des composants tels qu'un transmetteur WDM, un circulateur optique, une fibre optique et un analyseur BER ont été utilisés. Une liste de presque toutes les valeurs paramétriques ajustées dans la simulation optique en fonction des valeurs de réseau standard est présentée dans le Tableau III.1. Le trafic de la voie descendante est transmis à travers la fibre optique à la longueur d'onde de 1550 nm et le trafic de la voie montant est transmis à la longueur d'onde de 1300 nm. L'une des fenêtres d'atténuation les plus basses possible s'est produits lorsque ces deux longueurs d'onde ont été utilisé.

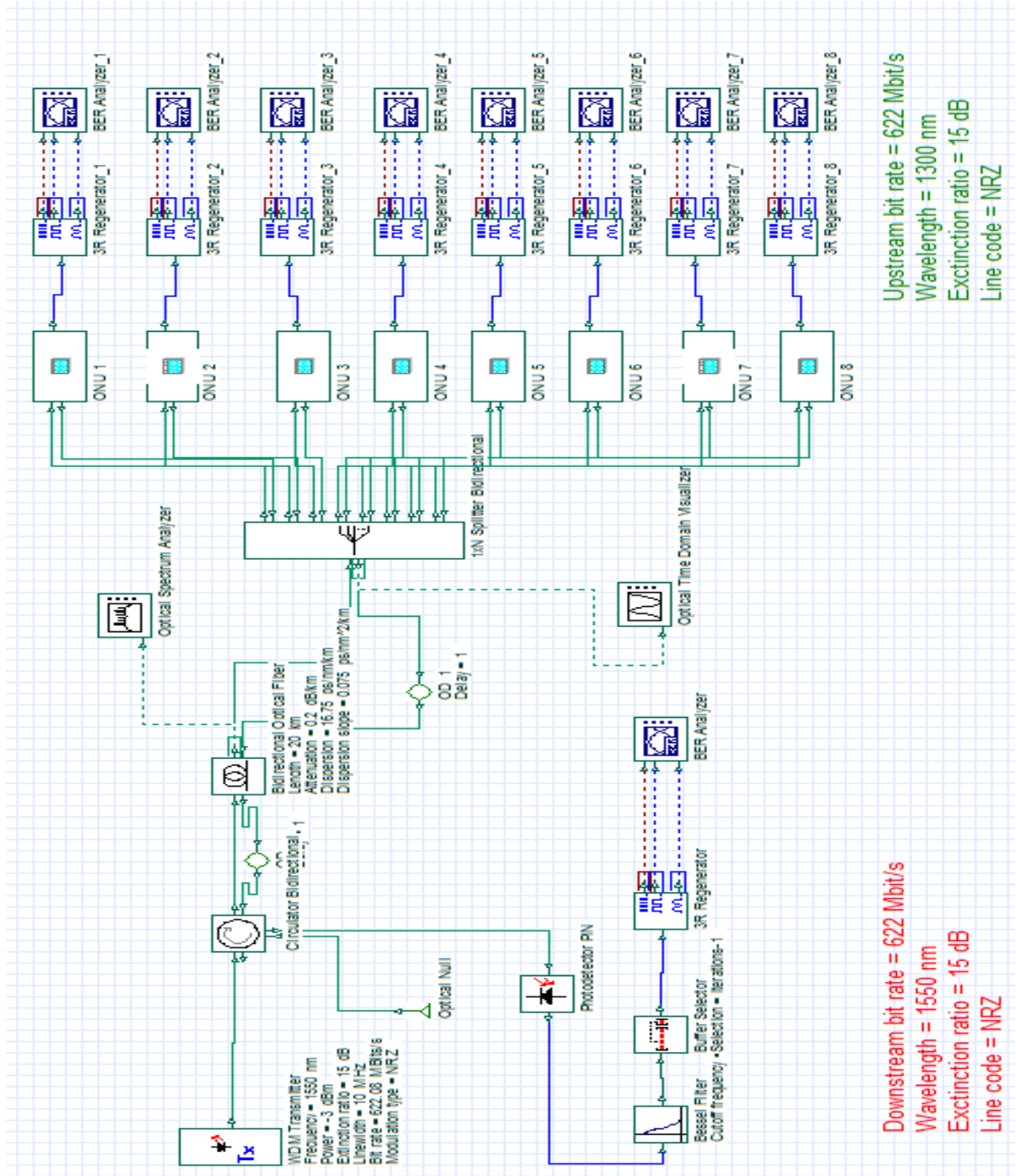
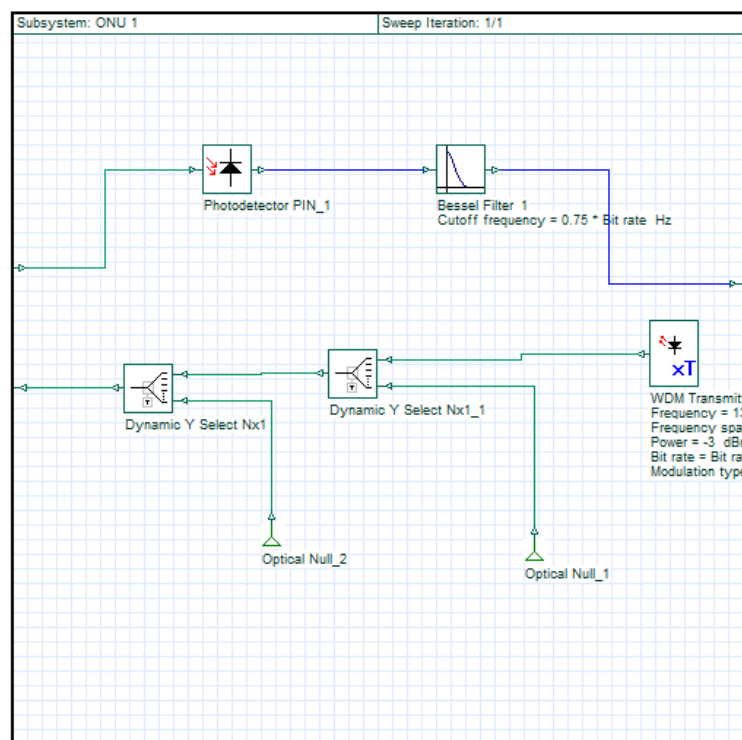


Figure III.1 : Liaison B-PON bidirectionnelle.

| Côté      | Composant                     | Direction du trafic | Paramètre             | Valeur           |
|-----------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|
| Émetteur  | Émetteur WDM                  | Voie descendante    | Fréquence             | 1550 nm          |
|           |                               |                     | Puissance             | -3 dBm           |
|           |                               |                     | Taux d'extinction     | 15 dB            |
|           |                               |                     | Modulation            | NRZ              |
|           |                               | Voie Montant        | Fréquence             | 1300 nm          |
|           |                               |                     | Puissance             | -3 dBm           |
|           |                               |                     | taux d'extinction     | 12 dB            |
|           |                               |                     | Modulation            | NRZ              |
| Canal     | Fibre optique unique          | Tous les deux       | longueur              | 20, 40 et 60km   |
|           |                               |                     | Atténuation           | 0.25 dB/km       |
|           |                               |                     | Dispersion            | 16.75 ps/nm/km   |
|           | séparateur optique (splitter) | Tous les deux       | Nombre d'utilisateurs | 4,8 et 16        |
| récepteur | Photodétecteur PIN            | Tous les deux       | Réceptivité           | 1 A/W            |
|           |                               |                     | courant d'obscurité   | 10 nA            |
|           | Filtre de Bessel              |                     | Fréquence de coupure  | 0.75*Bit rate Hz |

Tableau III.1 : Valeurs paramétriques de simulation optique BPON

La Figure III.2 montre ce qu'il y a dans les sous-systèmes, quelles sont les ONU. Les sous-systèmes ou les unités ONU sont les éléments responsables de la conversion des signaux optiques en signaux électriques dans la direction du trafic de la voie descendante. Les unités ONU entières reliées aux utilisateurs comprennent un émetteur distinct afin de moduler les données de l'utilisateur sur les faisceaux laser et de transmettre les données au séparateur optique. Le séparateur optique fonctionne comme un combineur optique dans la direction du trafic de voie montant. Le signal combiné collecté à partir de différents utilisateurs est transmis au côté OLT du central pour l'analyser à l'aide de l'analyseur BER (BER analyzer).



**Figure III.2 :** À l'intérieur de l'ONU

La structure du PON bidirectionnel pour 8 utilisateurs utilisant des fibres optiques individuelles dépend du circulateur optique. Le circulateur optique est utilisé pour deux raisons : l'isolation des signaux optiques de la voie montant et la voie descendante et la reconnaissance de la transmission bidirectionnelle en fibre unique. La voie montante est utilisée pour collecter des données auprès des utilisateurs, et la voie descendante est utilisée pour diffuser des services tels que des services de données, voix et vidéo aux utilisateurs.

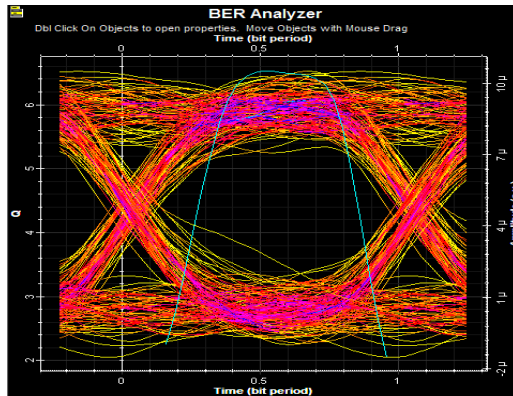
Afin de créer un retard de signal optique, un élément de retard a été placé dans le réseau de transmission. Afin d'avoir un délai, un signal NULL est transmis au port de sortie. Le photodétecteur PIN est utilisé pour convertir le signal optique transmis à travers la fibre en un signal électrique. Après cela, les signaux électriques convertis par les PIN passent aux filtres Bessel passe-bas puis aux régénérateurs 3R. Il est possible de récupérer les bits d'origine et les signaux électriques en utilisant le générateur 3R. Les trois bornes sorties des régénérateurs 3R sont connectées à l'analyseur BER pour tester le signal transmis.

Les résultats ont été basés sur cinq facteurs importants : le nombre d'utilisateurs, technique de codage, longueur de fibre optique et puissance émise. La longueur de fibre optique a été choisie pour différer de 20 km à 60 km. NRZ et RZ sont deux techniques de codage différentes qui ont été utilisées. Dans ce projet, un certain nombre d'utilisateurs ont été choisis en fonction du séparateur (splitter) optique standard pour l'architecture BPON, Dans ce projet, un certain nombre d'utilisateurs a été choisi est différent de 4,8 et 16. La puissance émise a été choisie pour varier de -3 dB à 0 dB. La valeur de la dispersion dans la fibre optique a été choisie pour varier de 7ps/nm/km à 17ps/nm/km.

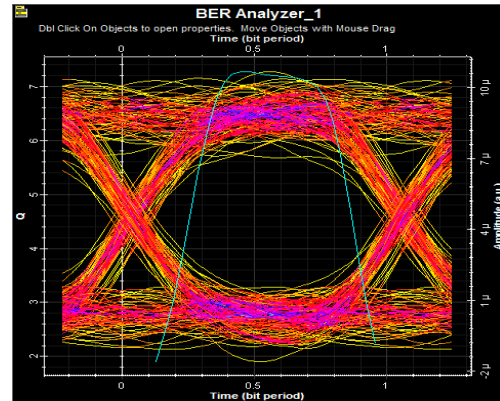
Les diagrammes d'œil ont été obtenus pour analyser la performance du signal dans les deux sens de circulation. Facteur de qualité Q, taux d'erreur sur les bits minimum et hauteur de l'œil. Ces trois paramètres sont importants pour analyser les performances du signal reçu dans le système de communication optique.

Afin de tester le système BPON, trois paramètres qui sont le facteur Q maximum, le taux d'erreur binaire minimum et la hauteur de l'œil doivent être testés. Facteur Q maximum et le rapport signal sur bruit (SNR) sont deux paramètres proportionnels les uns par rapport aux autres. Le taux d'erreur binaire minimal peut être décrit comme le rapport entre le nombre d'erreurs binaires réalisées du côté du récepteur et le nombre initial de bits émis du côté de l'émetteur. Selon la définition du taux d'erreur binaire minimum, le rapport devient 0 et le pire est lorsque le rapport devient 1. La totalité des bits émis est transmise sans erreur donc le rapport donne 0, alors que l'intégralité des bits envoyés sont pleins d'erreurs le rapport donne 1. La distorsion du signal est réalisée par la hauteur de l'œil. Moins de distorsion est survenue au signal lorsque la hauteur du signal est la plus grande.

### III.2 Résultats et discussion



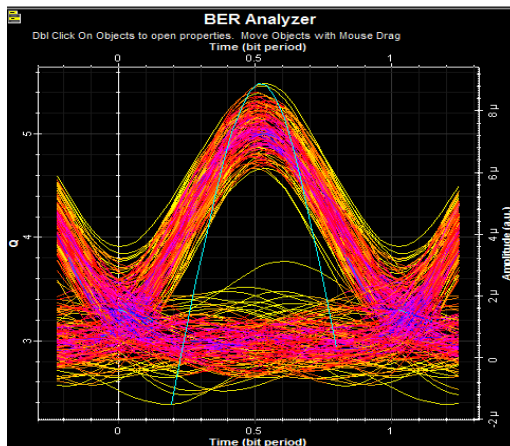
(a)



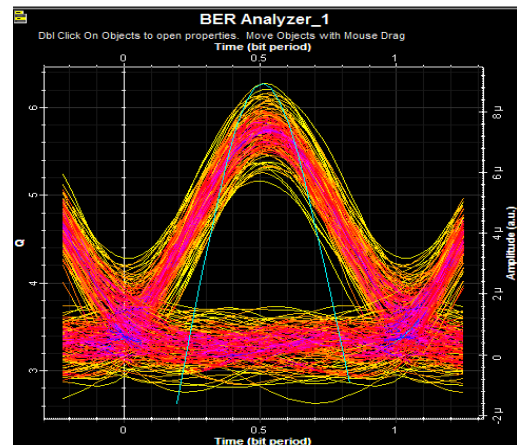
(b)

**Figure III.3 :** Diagrammes d'œil pour 8 utilisateurs avec une longueur de fibre de 20 km en utilisant la technique NRZ. (a) voie montant (b) voie descendante

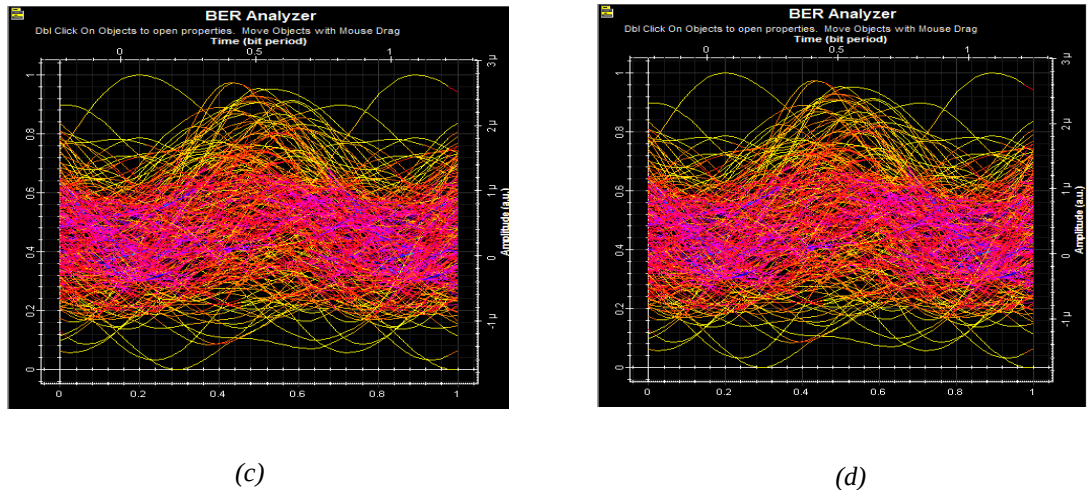
Un diagramme de l'œil pour 8 utilisateurs utilisant la technique de codage NRZ et une distance de fibre optique de 20 km pour les directions de circulation voie montant et voie descendante et montrer que le signal est bon et non déformé.



(a)



(b)



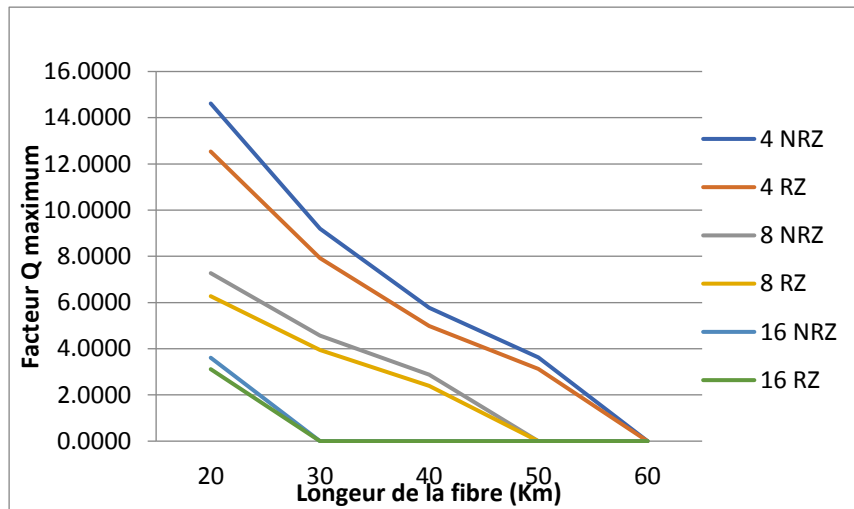
**Figure III.4 :** 8 utilisateurs utilisant la technique RZ. (a) voie montant pour longueur de fibre de 20 km. (b) voie descendante pour longueur de fibre de 20 km. (c) voie montant pour longueur de fibre de 60 km. (d) voie descendante pour longueur de fibre de 60 km.

La figure III.4 a été fournie pour comparer entre le diagramme de l'œil avec la plus faible perte et un autre diagramme de l'œil avec une perte maximale. Les diagrammes d'œil fournis sont 8 utilisateurs utilisant la technique RZ pour les directions voie montant et voie descendante de sur une distance de 20 km et de 60 km. Lorsque le signal été passé dans la fibre de longueur de 20 km, ce qui est de courte distance, le signal est très pur et non déformé. Cependant, quand le signal été passé une distance de 60 km, ce qui est longue distance, le signal est très ambigu et n'est pas clair, ce qui est dû à la distorsion.

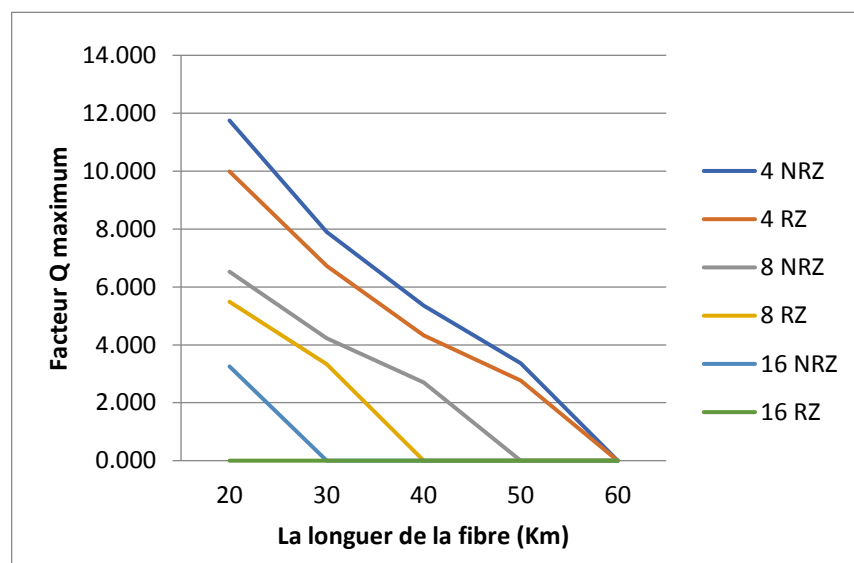
### III.2.1 Différents utilisateurs avec différentes techniques de codage

Dans cette section, une comparaison est faite entre trois différents groupes d'utilisateurs qui sont 4, 8 et 16 utilisateurs avec l'utilisation de deux types de techniques de codage : NRZ et RZ. Cette comparaison est faite selon trois paramètres le facteur Q maximum, le BER minimal et la hauteur d'œil dans les deux directions voie montant et voie descendante. NRZ et RZ sont deux types de formats de modulation de technique de codage qui peuvent être utilisés dans le système BPON.

## III.2.1.1 Facteur Q



**Figure III.5 :** Facteur Q maximum pour la voie descendante pour différents utilisateurs et techniques de codage



**Figure III.6 :** Facteur Q maximum pour la voie montant pour différents utilisateurs et techniques de codage

Le facteur Q diminue chaque fois que la longueur de la fibre et le nombre d'utilisateurs augmentent et la technique de codage RZ souffre plus que la technique de codage NRZ et qui peut résulter des pertes, comme représenté sur les figures III.5 et figure III.6. Et c'est une preuve que la technique de codage RZ donne de mauvais résultats par rapport à la technique de codage NRZ.



## III.2.1.2 BER

| Longueur (km) | 20          | 30          | 40          | 50          | 60   |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 4 NRZ         | 1,10013E-48 | 1,90887E-20 | 3,81617E-09 | 0,000142726 | 1,00 |
| 4 RZ          | 2,32534E-36 | 1,13886E-15 | 3,0121E-07  | 0,000869826 | 1,00 |
| 8 NRZ         | 1,7652E-06  | 2,50825E-06 | 0,00202298  | 1,00        | 1,00 |
| 8 RZ          | 1,74429E-10 | 3,97876E-05 | 0,00846929  | 1,00        | 1,00 |
| 16 NRZ        | 0,000152685 | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 1,00 |
| 16 RZ         | 0,000916358 | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 1,00 |

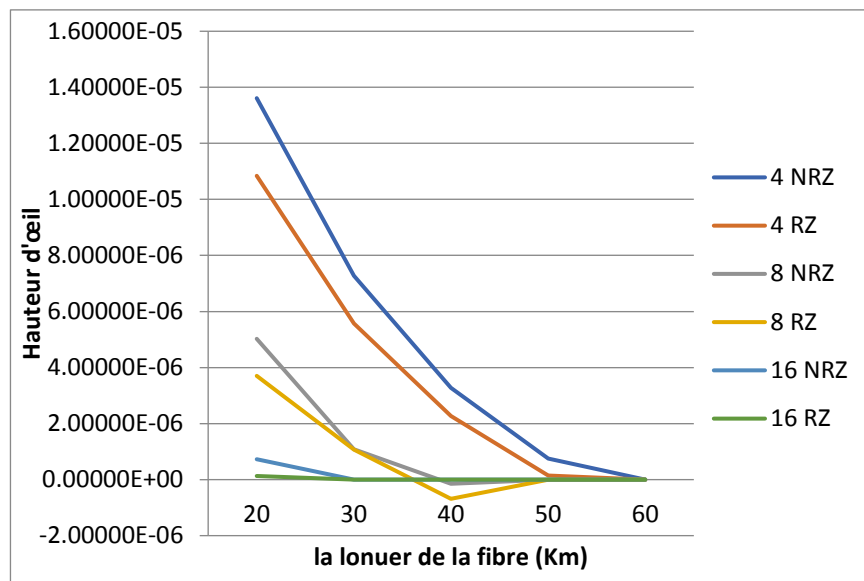
**Tableau III.2 :** BER minimum pour la voie descendante pour différents utilisateurs et techniques de codage

| Longueur (km) | 20          | 30          | 40          | 50          | 60   |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 4 NRZ         | 3,29127E-32 | 1,263E-15   | 3,78144E-08 | 0,000336758 | 1,00 |
| 4 RZ          | 7,8196E-24  | 7,89002E-12 | 6,44794E-06 | 0,00236886  | 1,00 |
| 8 NRZ         | 3,36293E-11 | 1,20303E-05 | 0,00349575  | 1,00        | 1,00 |
| 8 RZ          | 2,03685E-08 | 0,00424321  | 1,00        | 1,00        | 1,00 |
| 16 NRZ        | 0,000567714 | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 1,00 |
| 16 RZ         | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 1,00 |

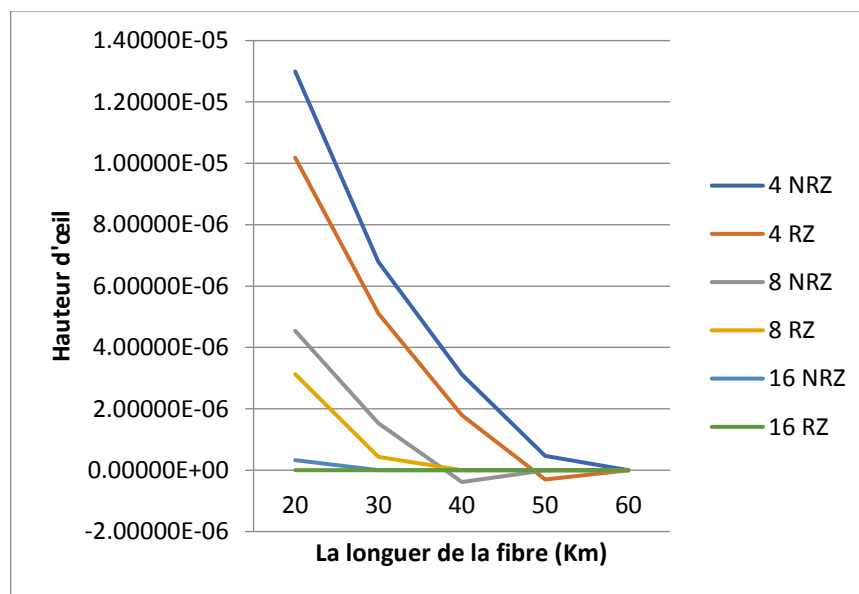
**Tableau III.3 :** BER minimum pour la voie montant pour différents utilisateurs et techniques de codage

Les résultats de BER ne sont pas clairs dans les graphiques car les valeurs obtenues sont très petites. Par conséquent, les résultats obtenus pour le BER minimum pour les deux sens de circulation sont indiqués dans les Tableaux III.2 et III.3, et ils montrent que dans la direction du trafic que la longueur de la fibre augmente, le taux d'erreur binaire augmente, C'est parce que la perte augmente, et aussi lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, le taux d'erreur binaire augmente aussi.

## III.2.1.3 Hauteur d'œil



**Figure III.7 :** Hauteur d'œil pour la voie descendante pour différents utilisateurs et techniques de codage



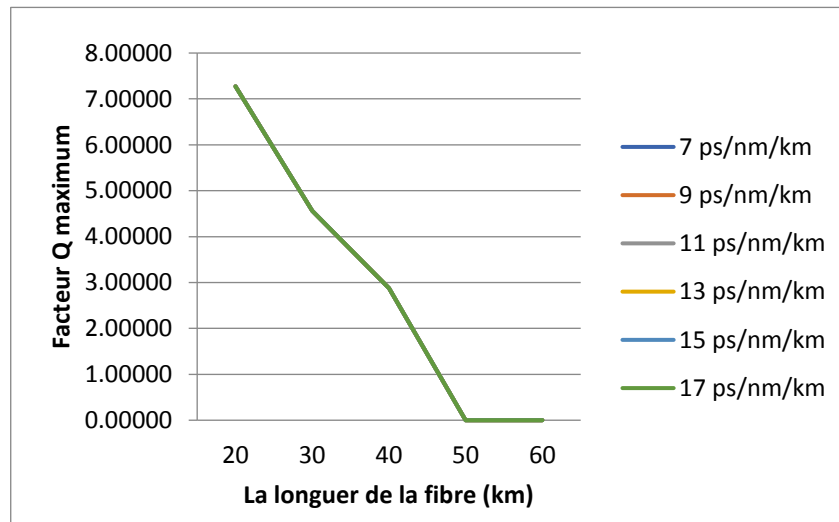
**Figure III.8 :** Hauteur d'œil pour la voie montant pour différents utilisateurs et techniques de codage

Les figures III.7 et III.8 montrent que pour la voie montant et voie descendante, la hauteur d'œil diminue exponentiellement lorsque la longueur des fibres augmente, et il est clair que travailler avec le codage NRZ est meilleur que le codage RZ.

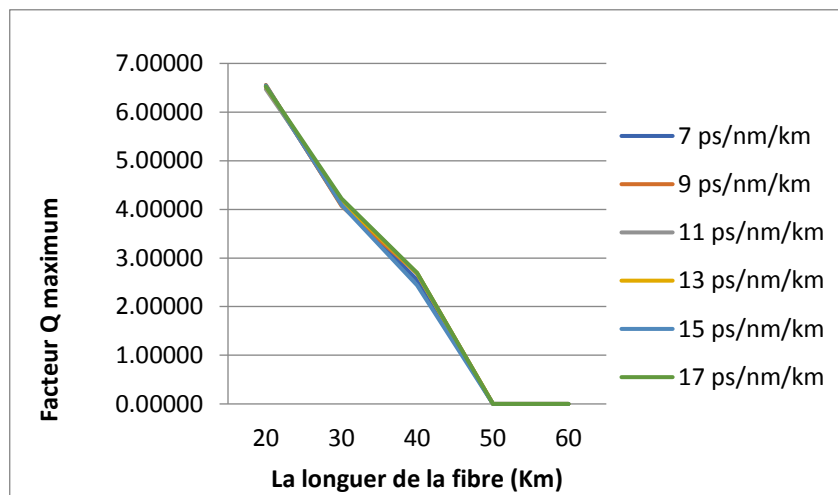
### III.2.2 Dispersion de la fibre

La dispersion chromatique, correspondant aux variations de temps de propagation des diverses longueurs d'onde, est l'un des facteurs limitant de la bande passante. Dans cette partie de la dispersion des fibres, le résultat est pour le B-PON bidirectionnel de 8 utilisateurs avec un codage NRZ.

#### III.2.2.1 Facteur Q



**Figure III.9 :** Facteur Q maximum de la voie descendante pour différentes valeurs de dispersion de fibre



**Figure III.10 :** Facteur Q maximum de la voie montant pour différentes valeurs de dispersion de fibre

Les résultats obtenus montrent que lorsque la valeur de la longueur de la fibre optique bidirectionnelle augmente, le facteur Q maximum diminue dans les deux sens, cependant, l'augmentation de la valeur de dispersion de la fibre optique bidirectionnelle dans les plages choisies (de 7ps / nm / km à 17ps / nm / km) ne donne pas une image claire de la diminution des performances du système, et les résultats sont les mêmes dans chaque cas. Et l'explication raisonnable est que débit est faible par rapport les dispersions choisies, en d'autres termes débit faible signifie que les impulsions du signal sont séparées avec des intervalles de temps considérables.

### III.2.2.2 BER

| Longueur (km) | 20          | 30           | 40         | 50   | 60   |
|---------------|-------------|--------------|------------|------|------|
| 7 ps/nm/km    | 1,72610E-13 | 2,52930E-06  | 0,00202415 | 1,00 | 1,00 |
| 9 ps/nm/km    | 1,72611E-13 | 2,50834E-06  | 0,00202389 | 1,00 | 1,00 |
| 11 ps/nm/km   | 1,72609E-13 | 2,502828E-06 | 0,00202363 | 1,00 | 1,00 |
| 13 ps/nm/km   | 1,72609E-13 | 2,502824E-06 | 0,00202339 | 1,00 | 1,00 |
| 15 ps/nm/km   | 1,76517E-13 | 2,502824E-06 | 0,00202317 | 1,00 | 1,00 |
| 17 ps/nm/km   | 1,76520E-13 | 2,502825E-06 | 0,00202298 | 1,00 | 1,00 |

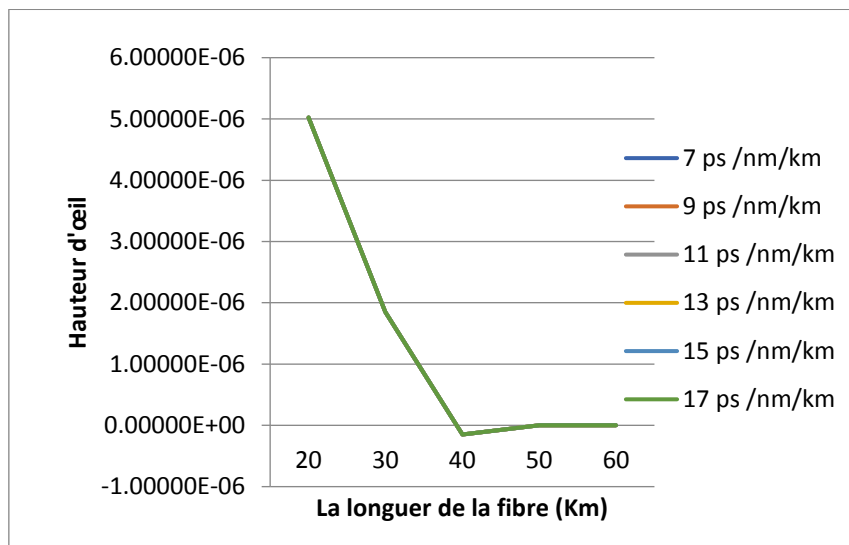
**Tableau III.4 :** BER minimum de la voie descendante pour différentes valeurs de dispersion de fibre

| Longueur (km) | 20          | 30          | 40         | 50   | 60   |
|---------------|-------------|-------------|------------|------|------|
| 7 ps/nm/km    | 3,36018E-11 | 2,07638E-05 | 0,00541977 | 1,00 | 1,00 |
| 9 ps/nm/km    | 2,71677E-11 | 2,36364E-05 | 0,0036526  | 1,00 | 1,00 |
| 11 ps/nm/km   | 4,88393E-11 | 1,33734E-05 | 0,00366619 | 1,00 | 1,00 |
| 13 ps/nm/km   | 3,38144E-11 | 1,51828E-05 | 0,00360911 | 1,00 | 1,00 |
| 15 ps/nm/km   | 2,92285E-11 | 2,13821E-05 | 0,00743848 | 1,00 | 1,00 |
| 17 ps/nm/km   | 3,36293E-11 | 1,20330E-05 | 0,00349575 | 1,00 | 1,00 |

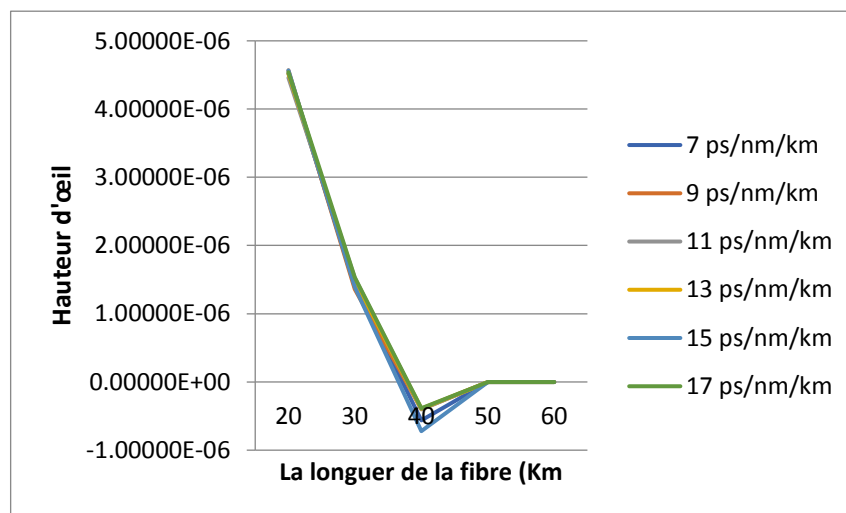
**Tableau III.5 :** BER minimum de la voie montant pour différentes valeurs de dispersion de fibre

Comme on peut le voir dans le Tableau III.4 et III.5, le BER minimum est en bonne performance dans la longueur de fibre de 20 Km et continue à diminuer quand la longueur augmente, mais le résultat ne change pas quand la dispersion est changée.

## III.2.2.3 Hauteur d'œil



**Figure III.11 :** Hauteur d'œil de la voie descendante pour différentes Valeurs de dispersion de fibre



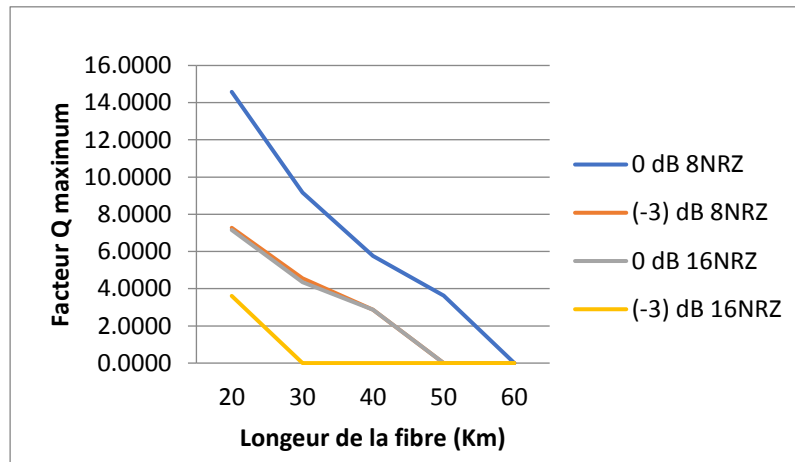
**Figure III.12 :** Hauteur d'œil de la voie montante pour différentes valeurs de dispersion de fibre

La même chose peut être appliquée à la hauteur des d'œil, comme on peut le voir Figure III.11 et III.12 que les courbes de différentes valeurs de dispersion sont approximativement les mêmes. Comme indiqué précédemment, les performances du système diminuent exponentiellement dans la direction de la voie descendante, De même, dans la voie montante, les performances du système BPON ont également diminué et ont soudainement diminué encore plus lorsque la longueur de la fibre atteignait 40 km.

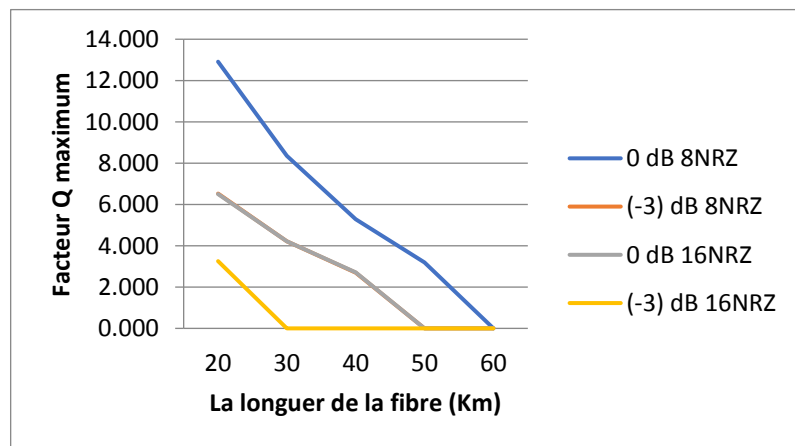
### III.2.3 Différents utilisateurs avec différentes puissances émises

La puissance est un facteur important dans les transmissions optiques, cette partie étudie l'effet de changement de puissance sur la performance de la transmission, les résultats obtenus dans cette section sont basés sur BPON bidirectionnel pour 8 et 16 utilisateurs avec la technique de codage NRZ et puissances émises variables de -3 dB et 0 dB.

#### III.2.3.1 Facteur Q



**Figure III.13 :** Facteur Q maximum de la voie descendante pour différents utilisateurs et différentes puissances émises



**Figure III.14 :** Facteur Q maximum de la voie montant pour différents utilisateurs et différentes puissances émises

Comme prévu, lorsque la puissance a augmenté, le facteur Q maximum augmente dans les deux directions et dans les deux cas 8 et 16 utilisateurs comme indiqué dans les deux figures III.13 et III.14. Il est frappant que l'augmentation soit un double et les résultats du cas (0dB 16 NRZ) sont égaux à (-3dB 8 NRZ), et ceci conduit à ce que l'ajout de plus d'utilisateurs nécessite d'augmenter la puissance pour éviter les problèmes d'atténuation.

## III.2.3.2 BER

| Longueur (km) | 20          | 30          | 40          | 50          | 60   |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 0 dB 8NRZ     | 1,83492E-48 | 2,33940E-20 | 4,14266E-09 | 0,000147549 | 1,00 |
| (-3) dB 8NRZ  | 1,7652E-06  | 2,50825E-06 | 0,00202298  | 1,00        | 1,00 |
| 0 dB 16NRZ    | 2,01E-13    | 2,64E-06    | 0,0020671   | 1,00        | 1,00 |
| (-3) dB 16NRZ | 0,000152685 | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 1,00 |

Tableau III.6 : BER de la voie descendante pour différents utilisateurs et différentes puissance émise

| Longueur (km) | 20          | 30          | 40          | 50          | 60   |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 0 dB 8NRZ     | 1,93400E-38 | 3,415E-17   | 6,20024E-08 | 0,000711988 | 1,00 |
| (-3) dB 8NRZ  | 3,36293E-11 | 1,20303E-05 | 0,00349575  | 1,00        | 1,00 |
| 0 dB 16NRZ    | 3,95371E-11 | 1,27329E-06 | 0,00343251  | 1,00        | 1,00 |
| (-3) dB 16NRZ | 0,000567714 | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 1,00 |

Tableau III.7 : BER de la voie montant pour différents utilisateurs et différentes puissance émise

La performance s'est améliorée beaucoup après avoir augmenté la puissance surtout dans le cas des 16 utilisateurs, dans lequel il ne fonctionnait pas au premier niveau de puissance (-3dB), mais maintenant il fonctionne au moins dans la longueur standard (B-PON bidirectionnel) de la fibre 20 km.

## III.2.3.3 Hauteur d'œil

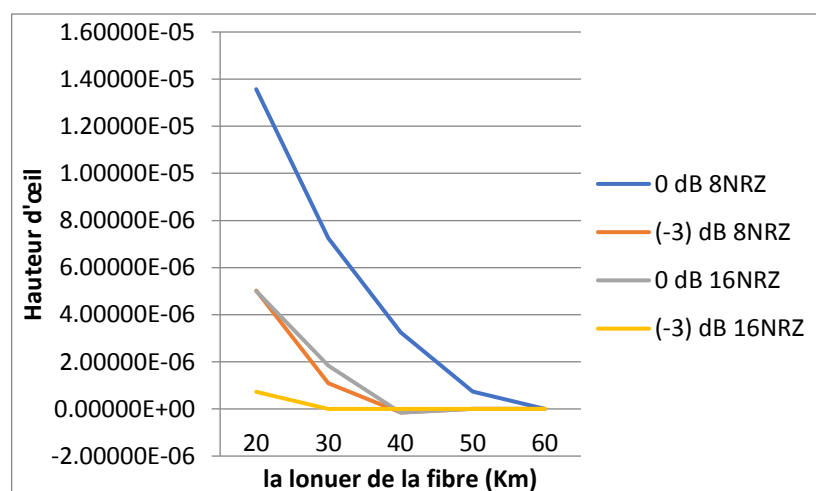
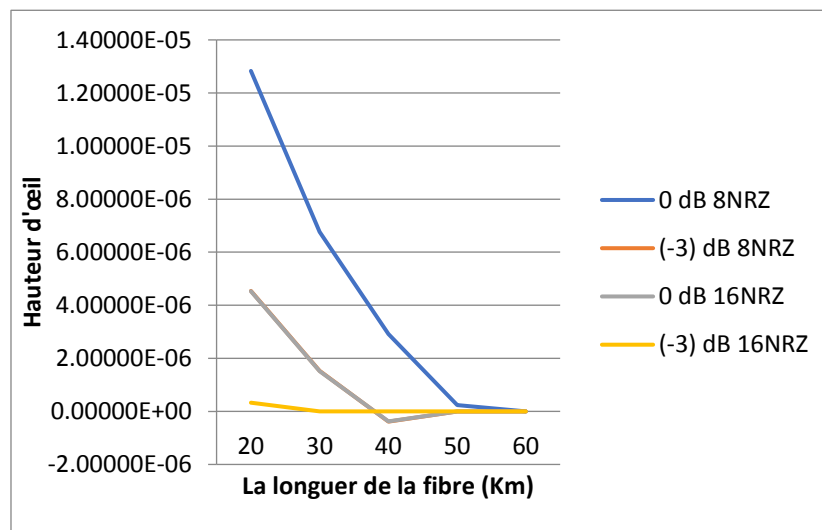


Figure III.15 : Hauteur d'œil de la voie descendante pour différents utilisateurs et différentes puissance émise



**Figure III.16 :** Hauteur d'œil de la voie montant pour différents utilisateurs et différentes puissance émise

La même chose ici, la hauteur d'œil a augmenté après le changement de la puissance et la hauteur d'œil également améliorée dans le cas de 16 NRZ (même en 8 NRZ), il continue à diminuer avec l'augmentation de la longueur de la fibre et c'est normal en raison des effets d'atténuation.

## Conclusion

L'étude du réseau BPON nous permet d'explorer et de connaître les paramètres pouvant influencer sur la qualité de transmission. Ces paramètres étant représentés en nombre d'utilisateurs et en longueur de fibre pour que chaque fois qu'ils augmentent, les performances diminuent. La technique de codage est également importante et le NRZ fonctionne clairement mieux que le codage RZ. Ensuite, la puissance émise qui est un paramètre très important et il devrait être en bon niveau pour obtenir de bons résultats. Finalement la dispersion a montré un effet très faible. Cela a été justifié par le faible débit de fonctionnement.



## **Conclusion Générale**

De nos jours, des débits d'informations de plus en plus élevés sont demandés aux supports de transmission et en particulier les fibres optiques. En revanche, des efforts considérables sont nécessaires pour le développement de la fibre optique permettant d'avoir le minimum de perte et de dispersion.

Le développement de la fibre optique conduit à l'invention des réseaux d'accès optiques, et ce dernier, a aussi évolué vers de nombreuses générations, les réseaux optiques passifs étant les plus courants aujourd'hui et toujours en développement continu.

Les réseaux optiques passifs (PON) sont plus compétents pour répondre à la demande d'énormes bandes passantes et de technologies à haute capacité dans le système de communication optique. Le réseau PON est un réseau point à multipoint qui améliore également l'efficacité du réseau et réduit les coûts de terminaison du réseau. La performance de BPON est mesurée par des variations de facteurs tels que le BER minimum et le facteur de qualité. Si le BER du système diminue, le facteur de qualité augmente et vice versa.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les liaisons par fibres optiques, en spécifiant les différents types de composants tels que l'émetteur optique et le récepteur optique et une étude détaillée sur les fibres optiques.

Dans le deuxième chapitre, l'étude a porté sur les réseaux d'accès optique et la description générale des réseaux de fibres FTTX, puis une étude sur les réseaux optiques passifs PON, leurs composants, les techniques de multiplexage, leur principe de fonctionnement, leurs types et leurs caractéristiques.

Dans le troisième chapitre, la performance du BPON bidirectionnel dans les deux sens de trafic montant et descendante a été analysée à l'aide du logiciel Optisystem. Le système a été étudié en fonction du nombre d'utilisateurs, des techniques de codage, des longueurs de fibre, de la dispersion des fibres et de la puissance émise. Ces résultats ont permis de déterminer les meilleures configurations et les conditions qui permettent au réseau de fonctionner avec une bonne qualité de transmission et moins de problèmes. Nous avons permis de dire que la distance maximale atteinte est de 20 km jusqu'à 25 km, avec un débit de 622 Mbit/s dans les deux sens, et un nombre d'utilisateur de 16. Le nombre peut atteindre 32 utilisateurs comme le standard du BPON mais il nécessite plus de puissance émise.

La conclusion de cette étude que les Réseaux Optiques Passifs (PON) peuvent atteindre des vitesses élevées avec une bonne qualité de transmission, l'évaluation de ces débits change en fonction de l'architecture utilisée, mais il faut toujours garder le compromis utilisateurs / débit, et distances / débit.

## Bibliographie

- [1] : **Togniclo Carolle Thon-Adjaline**, "ETUDE D'UN SYSTEME DE TRANSMISSION SUR FIBRE OPTIQUE PLASTIQUE À SAUT D'INDICE", UNIVERSITÉ LAVAL, 2011.
- [2] : **GRAINI Leila**, "Applications des similarités dans les systèmes de télécommunications par fibre optique à très haut débit" thèse doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, avril 2017.
- [3] : **Melle LOUAZANI Marwa /Melle MEDDANE Samira** "ETUDE DES RESEAUX D'ACCES OPTIQUE EXPLOITANT LE MULTIPLEXAGE EN LONGUEURS D'ONDE" mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID- TLEMCEN, juin 2017.
- [4] : **Article proposé par : Benjamin Damilano**, [benjamin.damilano@crhea.cnrs.fr](mailto:benjamin.damilano@crhea.cnrs.fr), Julien Brault, A. Dussaigne et Jean Massies, Centre de Recherche sur l'hétéroépitaxie et ses applications (CRHEA), CNRS.
- [5] : **AMARI MALIKA / HAMRI BELLEL** "ETUDE ET EVALUATION D'UNE CHAÎNE DE TRANSMISSION OPTIQUE POINT A POINT AVEC UNE LONGUEUR D'ONDE 1.55 $\mu$ m" MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE DE SAÏDA, juin 2017.
- [6] : **MEDJDOUB FADILA**, « Optimisation par la Simulation Système d'une Chaîne de Transmission Numérique par Fibre Optique Haut Débit », Mémoire de Magister en Télécommunications ,2010 Université Abou Bekr BelkaidTlemcen.
- [7] : **Sarah BENAMEUR** "La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission tique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable" thèse doctorat, UNIVERSITE DJILALI LIABES, SIDI BEL-ABBES, Juin 2015.
- [8] : **CHENIKA Abdelfettah**, " ETUDE ET CONCEPTION DE NOUVEAUX FORMATS DE MODULATIONS DEDIES AUX RÉSEAUX D'ACCÈS OPTIQUES HAUT DÉBIT"Thèse doctorat, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen - ,2017
- [9] : **Fabienne SALIOU** " ETUDES DES SOLUTIONS D'ACCES OPTIQUE EXPLOITANT UNE EXTENSION DE PORTEE" pour obtenir le grade DOCTEUR de TELECOM PARIS TECH, Juin 2010.
- [10] : **Melle BILLAMI Hanane / Melle BENDAHDANE Raouida**, "Etude d'un réseau optique ADM 10Gbit/s" mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID- TLEMCEN, juin 2013.
- [11] : **Jean-Louis VERNEUIL**, " Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s" thèse doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES, novembre 2003.
- [12] : **Victor Girondin**, " Etude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques - Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe" THESE DE DOCTORAT, L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, mai 2016.

**[13] : BENDRIHEM ABDELAZIZ**, "Etude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques" mémoire MAGISTERE, Université de Batna.

**[14] : FEROUI Sarah**, " Etude D'un Réseau B-PON Bidirectionnel " mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID- TLEMCEN, juin 2013

**[15] : Bruno BEAUQUIER**," COMMUNICATIONS DANS LES RESEAUX OPTIQUES PAR MULTIPLEXAGE EN LONGUEUR D'ONDE", L'UNIVERSITE DE NICE, janvier 2000

## Annexe

### 1. Présentation du logiciel de simulation

OptiSystem, est un logiciel de conception, de tests et d'optimisation de n'importe quel type de liaison optique, Un niveau de système simulateur basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communication par fibre optique, OptiSystem possède un environnement de simulation puissant et une définition vraiment hiérarchique de composants et systèmes. Ses capacités peuvent être facilement élargies avec l'ajout de l'utilisateur de composants et d'interfaces continu à une gamme d'outils largement utilisés.

OptiSystem est un logiciel très performant qui permet aussi de concevoir et de modéliser des composants optiques. Lors de la conception, il suffit de glisser le composant de la bibliothèque vers le Layout. La figure suivante représente un exemple d'un composant optique de la bibliothèque d'OptiSystem, qui est dans notre cas une fibre monomodes avec tous ces paramètres.

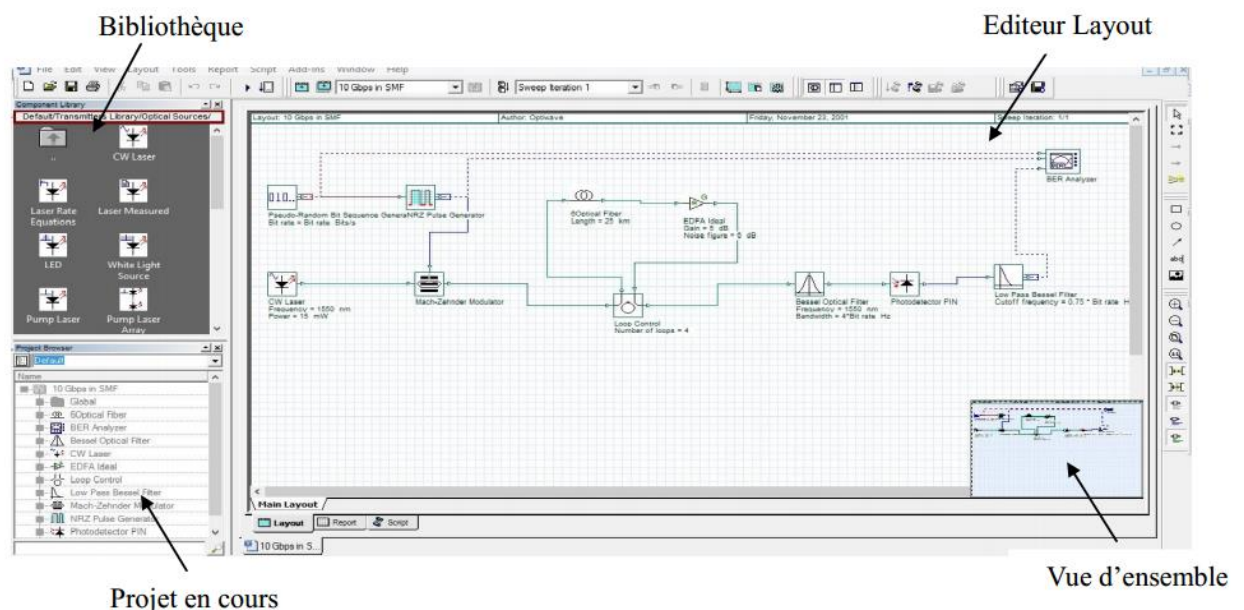


Figure 1: Les fenêtres d'OPTISYSTEM

## **2. Applications d'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 optiques passifs (PON).
- L'espace libre pour les systèmes optique (OSA).
- La conception d'anneau SONET/SDH.
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

## **3. 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 des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée produisent le SAOS Spectral, le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation schémas et beaucoup plus.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire sur le moniteur au même port. L'état de l'art et le calcul de flux de données.