



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم  
Université de Mostaganem Abdelhamid Ibn Badis (UMAB)  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie



N°d'ordre : M...../GE/2022

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**FILIERE : TELECOMMUNICATIONS**

**Spécialité : Système des Télécommunication**

***Thème***

**Etude et Simulation d'une architecture TWDM-PON dans un  
réseau FTTH pour différents formats de modulations.**

**Présenté par :**

**Boussaid Wafaa**

**Amellal Chahinez**

***Soutenu le 06 / 07 / 2022 devant le jury composé de :***

|              |                   |     |      |
|--------------|-------------------|-----|------|
| Président:   | DJELTI Benbella   | MCB | UMAB |
| Examineur:   | ABED Mansour      | MCA | UMAB |
| Rapporteur:  | BENAOUALI Mohamed | MAA | UMAB |
| Rapporteur : | BENCHELLAL Amel   | MCB | UMAB |

**Année Universitaire : 2021/ 2022**

## *Remerciements*

*Tout d'abord nous remercions notre Dieu puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention consciente d'un grand nombre de personnes.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr : Benaouali Mohamed Et notre Co-encadreur Mme : Amel Benchellal, pour leur patience, leurs précieux conseils qui ont constitué un rapport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menés au bon port. Qu'ils trouvent dans ce travail un hommage vivant à haute personnalité.*

*Nos vifs remerciement vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leur proposition.*

*À nos familles et nos amis qui par leur prière et leur encouragement on a pu surmonter tous les obstacles. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou loin à la réalisation de ce travail.*

## ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon très **cher père que dieu le garde.***

*Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux , honnête , de la personne méticuleux , je tiens à honorer l'homme que tu es . Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité . Je voudrais te remercier pour ton amour éternel, ta générosité, ta compréhension. Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation . Je t'aime papa et j'implore le bon dieu pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse .*

*A **ma mère** qui m'a encouragé, Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.*

*A mon cher frère **Mohammed** a tous les moments d'enfance passés avec toi mon frère , Ces quelques lignes, ne sauraient traduire le profond amour que je te porte , en gage de ma profonde estime pour l'aide que tu m'as apporté, que Dieu te protège , t'accorde santé et succès.*

*A mes sœurs **Zineb, Fatima Zohra, Asma**, que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A mes nièces **Hadil** et **Nihal**.*

*A le plus cher personne dans le monde, mon meilleur ami **Sid Ahmed**, qui ma aidé, supporté et encouragé tout le temps, merci d'être toujours avec moi.*

*A **Wafaa**, chère amie avant d'être binôme*

*A mes chers amis **Ikram, Rania, Imane, Zaza, Yasmine, Dalal, Najat, Ibtissem, Mounir, Hamza, Gift***

*En souvenir des moments heureux passés ensemble, avec mes vœux sincères de réussite, bonheur, santé et de prospérité.*

*A la promotion Master Systèmes de Télécommunications 2021-2022.*

***Chahinez Amellal***

## ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail, comme preuve de respect, de  
gratitude, et de reconnaissance*

*A mes très chers parents pour leur encouragement et leurs  
sacrifices qu'ils ont endurés. A ma très chère famille*

*A mon binôme que j'ai passé avec lui des inoubliables moments*

*A toutes les personnes chères à mon cœur, pour leur aide, leur temps leur  
encouragement, leur assistance et soutien.*

*A la promotion Master Systèmes de Télécommunications 2021-2022*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Merci infiniment.*

***Boussaid Wafaa***

## Liste des symboles

|                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| $\lambda$                | Longueur d'onde.            |
| Q                        | facteur de qualité.         |
| I1                       | l'angle d'incidence.        |
| I2                       | l'angle de réfraction.      |
| N1                       | indices de cœur.            |
| N2                       | indices de gaine.           |
| I1 et I2                 | les tensions moyennes.      |
| $\alpha_1$ et $\alpha_2$ | variances des probabilités. |

## Liste d'abréviation

|      |  |
|------|--|
| ATM  | Asynchronous Transfer Mode.              |
| ADSL | Asymmetric Digital Subscriber Line.      |
| AES  | Advanced Encryption Standard.            |
| AM   | Amplitude Modulation.                    |
| BPON | Broadband Passive Optical Network.       |
| BER  | Bit Error Rate.                          |
| BP   | Bande Passante.                          |
| CSRZ | Carrier Suppressed Return-to-Zero        |
| CATV | Cable Television                         |
| CWDM | Coarse Wavelength Division Multiplexing. |
| DL   | diode laser.                             |
| DEL  | Diode électroluminescentes.              |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplexing   |
| DC   | Dispersion Chromatic.                    |
| DMUX | Démultiplexeur.                          |
| EPON | Ethernet Passive Optical Network.        |
| EDFA | Erbium Doped Fiber Amplifier.            |
| FTTB | Fiber to the Building.                   |
| FTTC | Fiber to the Curb.                       |
| FTTN | Fiber to the Node/Neighborhood.          |
| FTTP | Fiber to the Premises.                   |
| FTTO | Fiber to the Office.                     |
| FTTH | Fibre to the Home.                       |

|       |   |
|-------|---|
| FDM   | Frequency Division Multiplexing.              |
| FM    | Frequency Modulation.                         |
| Gbits | Gigabit Par Seconde.                          |
| GPON  | Gigabit Passive Optical Network.              |
| ITU   | <i>International Telecommunication Union.</i> |
| LAN   | Local Area Network.                           |
| LED   | Light Emitting Diode.                         |
| MAN   | Metropolitan Area Network.                    |
| MZM   | Mach-Zehnder Modulator.                       |
| MODB  | Duo-Binaire modifié                           |
| NT    | Network Termination.                          |
| NRZ   | Non Return to zero                            |
| OOK   | On/Off Keying                                 |
| OTDM  | Optical Time Division Multiplexing.           |
| ODN   | Optical Distribution Network.                 |
| OLT   | Optical Line Terminal.                        |
| ONT   | Optical Network Termination.                  |
| ONU   | Optical Network Unit.                         |
| PON   | Passive Optical Network.                      |
| P2P   | Point to Point.                               |
| PM    | Phase Modulator                               |
| RN    | Remote Node.                                  |
| RTPC  | Réseau Téléphonique Public Commuté            |
| RZ    | Return To Zero                                |
| SRS   | Stimulated Raman Scattering.                  |
| SBS   | Stimulated Brillouin Scattering.              |
| STDM  | Statistical Time Division Multiplexing        |
| TDM   | Time Division Multiplexing.                   |
| TWDM  | Time and Wavelength Division Multiplexing.    |
| TDMA  | Time Division Multiple Access.                |
| TEB   | Taux d'Erreur Binaire.                        |
| WAN   | Wide Area Network.                            |
| WDM   | Wavelength Division Multiplexing.             |

## Liste des Figures

### Chapitre I

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure I.1</b> : Description de la fibre optique. ....                 | 03 |
| <b>Figure I.2</b> : Fibre optique monomode. ....                          | 04 |
| <b>Figure I.3</b> : Fibre multimode a gradient d'indice. ....             | 05 |
| <b>Figure I.4</b> : Fibre multimode à saut d'indice. ....                 | 06 |
| <b>Figure I.5</b> : Atténuation sur les fibres à saut d'indice. ....      | 06 |
| <b>Figure I.6</b> : Performance des trois types fibres. ....              | 07 |
| <b>Figure I.7</b> : schéma d'une liaison optique. ....                    | 08 |
| <b>Figure I.8</b> : Structure de la photodiode. ....                      | 10 |
| <b>Figure I.9</b> : schéma de principe d'un modulateur Mach-Zehnder. .... | 11 |
| <b>Figure I.10</b> : l'ouverture numérique d'une fibre optique. ....      | 12 |
| <b>Figure I.11</b> : Bilan de perte dans une fibre optique. ....          | 13 |
| <b>Figure I.12</b> : atténuation dans les fibres optiques. ....           | 13 |
| <b>Figure I.13</b> : Différentes structures de fibre optique. ....        | 17 |

### Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure II.1</b> : Les types de multiplexage. ....  | 19 |
| <b>Figure II.2</b> : Principe du multiplexage FDM. ....   | 19 |
| <b>Figure II.3</b> : Principe du multiplexage WDM. ....   | 20 |
| <b>Figure II.4</b> : plage longueurs d'ondes (CWDM et DWDM). ....                                     | 22 |
| <b>Figure II.5</b> : multiplexage temporel (TDM). ....  | 23 |
| <b>Figure II.6</b> : principe du TDM synchrone. ....  | 24 |
| <b>Figure II.7</b> : Principe du TDM asynchrone. ....   | 25 |
| <b>Figure II.8</b> : multiplexage OTDM. ....  | 26 |
| <b>Figure II.9</b> : bloc diagramme du format de modulation NRZ. ....                                 | 28 |
| <b>Figure II.10</b> : trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format NRZ.<br>..... | 29 |
| <b>Figure II.11</b> : bloc diagramme du format de modulation RZ. ....                                 | 29 |
| <b>Figure II.12</b> : trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format RZ.<br>.....  | 30 |
| <b>Figure II.13</b> : bloc diagramme du format de modulation CSRZ. ....                               | 30 |
| <b>Figure II.14</b> : la trace temporelle en amplitude et en phase, le diagramme de l'œil et le       |    |

|   |    |
|---|----|
| spectre du format CSRZ. ....  | 30 |
| <b>Figure II.15</b> : bloc diagramme du format de modulation DB. ....                                       | 31 |
| <b>Figure II.16</b> : bloc diagramme du format de modulation MODB. ....                                     | 32 |
| <br><b>Chapitre III</b>   |    |
| <b>Figure III.1</b> : quelques composantes dans le réseau PON. ....   | 34 |
| <b>Figure III.2</b> : Architecture point à point d'un réseau d'accès optique. ....                          | 34 |
| <b>Figure III.3</b> : Architecture point à multipoint actif d'un réseau d'accès optique. ....               | 35 |
| <b>Figure III.4</b> : Architecture point à multipoint passif d'un réseau d'accès optique. ....              | 36 |
| <b>Figure III.5</b> : Les topologies d'un réseau PON. ....  | 37 |
| <b>Figure III.6</b> : Comparaison entre FTTH et autres technologies. ....                                   | 39 |
| <b>Figure III.7</b> : Les différents types de réseau FTTH. ....   | 40 |
| <b>Figure III.8</b> : Le principe de fonctionnement du TDM PON. ....  | 41 |
| <b>Figure III.9</b> : Le principe du BPON. ....   | 42 |
| <b>Figure III.10</b> : Le principe de l'EPON. ....  | 43 |
| <b>Figure III.11</b> : Le principe du GPON. ....  | 44 |
| <b>Figure III.12</b> : Composants de base d'un WDM. ....  | 45 |
| <b>Figure III.13</b> : Architecture typique du WDM PON. ....  | 45 |
| <b>Figure III.14</b> : architecture d'un TWDM. ....   | 47 |
| <b>Figure III.15</b> : Diagramme de longueur d'onde optique passif. ....                                    | 47 |
| <br><b>Chapitre IV</b>  |    |
| <b>Figure IV.1</b> : Schéma descriptif du notre travail. ....   | 51 |
| <b>Figure IV.2</b> : L'interface graphique Optisystem. ....   | 52 |
| <b>Figure IV.3</b> : Paramètre de dialogue des paramètres de simulation. ....                               | 53 |
| <b>Figure IV.4</b> : diagramme de l'œil. ....   | 54 |
| <b>Figure IV.5</b> : Architecture TWDM-PON. ....  | 56 |
| <b>Figure IV.6</b> Schéma bloc de simulation de la FTTH selon l'architecture TWDM-PON avec Optisystem. .... | 57 |
| <b>Figure IV.7</b> : Schéma bloc de la modulation NRZ. ....   | 58 |
| <b>Figure IV.8</b> : Schéma du circuit d'émission (Modulation CSRZ). ....                                   | 60 |
| <b>Figure IV.9</b> : Schéma du circuit d'émission (Modulation DB). ....                                     | 61 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Figure IV.10</b> : Schéma du circuit d'émission (Modulation MODB). .....                    | 62 |
| <b>Figure IV.11</b> : Le multiplexage des signaux. ....  | 63 |
| <b>Figure IV.12</b> : Le démultiplexage des signaux. ....                                      | 63 |
| <b>Figure IV.13</b> : Description de plusieurs ONU à la réception. ....                        | 64 |
| <b>Figure IV.14</b> : Bloc <i>ONU</i> . ....   | 65 |
| <b>Figure IV.15</b> : Equipement réel de <i>l'ONU</i> . ....                                   | 65 |
| <b>Figure IV.16</b> : Débit binaire en fonction du facteur $Q$ et $\log BER$ . ....            | 67 |
| <b>Figure IV.17</b> : Distance de transmission en fonction du facteur $Q$ et $\log BER$ . .... | 68 |
| <b>Figure IV.18</b> : débit binaire en fonction du facteur ( $Q$ ) et $\log BER$ . ....        | 69 |
| <b>Figure IV.19</b> : distance de transmission en fonction du facteur $Q$ et $\log BER$ . .... | 70 |

## Liste des tableaux

### Chapitre I

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau I.1:</b> comparaison entre fibre ‘multimode / monomode ‘. .... | 07 |
|---|----|

### Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau II.1 :</b> Récapitulatif des différents types de multiplexages. .... | 27 |
|---|----|

### Chapitre IV

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau IV.1 :</b> les paramètres de la simulation. .... | 55 |
|---|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau IV.2 :</b> Description des éléments selon la modulation NRZ. .... | 59 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau IV.3 :</b> Description des éléments selon la modulation CSRZ. .... | 60 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau IV.4 :</b> Description des éléments selon la modulation DB. .... | 61 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau IV.5 :</b> Description des éléments selon la modulation MODB. .... | 62 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau IV. 6:</b> Description des éléments d’un endroit. .... | 64 |
|---|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau IV.7 :</b> Description des éléments constituant l’ONU. .... | 66 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau IV.8:</b> l’impact du débit binaire variable avec une distance de transmission fixe pour les quatre formats de modulations. .... | 67 |
|---|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau IV.9 :</b> l’impact de la distance de transmission variable avec un débit fixe pour les quatre formats de modulations. .... | 68 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau IV.10:</b> l’impact du débit binaire variable avec une distance de transmission fixe pour les quatre formats de modulations. .... | 69 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau IV.11:</b> l’impact de la distance variable avec un débit fixe pour les quatre formats de modulations. .... | 70 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau IV.12 :</b> Distances maximales de transmission trouvées pour chaque format de modulation. .... | 71 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau IV.13 :</b> Débit binaire maximal trouvées pour chaque format de modulation. .... | 72 |
|--|----|

## ملخص:

كل يوم، تزداد الحاجة إلى نقل البيانات الموثوقة بسرعة عالية جداً، مما يلزم شركات الاتصالات بتقديم خدمة جيدة لإرضاء عدد كبير من المستخدمين بجودة أفضل.

الحل الأفضل الذي يحل مشكلة سعة الإرسال ويجعلها ذات سرعات نقل PON تعتبر الشبكة الضوئية المنفصلة عالية ومسافات تصل إلى عشرات الكيلومترات باستخدام تقنيات مضاعفة بصرية مختلفة نضاعف من خلالها عدة مستخدمين في قناة واحدة من خلال الألياف الضوئية.

. تأخذ عمليات المحاكاة التي تم TWDM-PON بهندسة FTTH يركز هذا البحث على تحسين شبكة إجراؤها في هذا العمل في الاعتبار تأثير العديد من العوامل المشاركة في عملنا مثل التباعد بين القنوات وأنواع تنسيق ( وطول الارتباط (طول الألياف الضوئية) ومعدل البت وكذلك MODB و DB و CS-RZ و NRZ-OOK التعديل ) القيود المختلفة مثل التأثيرات غير الخطية والتشتت اللوني.

. نظهر من خلال  $10^{-9}$  -  $10^{-10}$  BER وكذلك معدل الخطأ في البتات Q يتمثل التحسين في تحسين عامل الجودة عمليات المحاكاة أن معيار التحسين لدينا أدى إلى إيجاد أداء أفضل من حيث المسافات والإنتاجية والخسائر والتوهين مع تباعد 100 جيجا هرتز. TWDM-PON لنظام

، معدل خطأ CS-RZ ، MODB ، DB ، NRZ ، PON ، TWDM ، تباعد القنوات ، FTTH الكلمات المفتاحية:

Q ، عامل الجودة BER البت

## Abstract:

Every day, the need for the transmission of reliable data at very high speed increases more and more, which obliges telecommunications companies to offer a good service to satisfy a large number of users with better quality.

The PON passive optical network considered the best solution that solves the problem of transmission capacity and makes it with high transmission speeds and distances up to tens of kilometers using different optical multiplexing techniques by which we multiply several users in a single channel through optical fiber.

This research focuses on the optimization of an FTTH network with a TWDM-PON architecture. The simulations carried out in this work take into account the impact of several factors involved in our work such as the spacing between channels, the types of modulation format (NRZ-OOK, CS-RZ, DB and MODB), the length of the link (optical fiber length), the bit rate as well as the various limitations such as non-linear effects and chromatic dispersion.

The optimization consists in improving the quality factor Q as well as the bit error rate BER  $\sim <10^{-9}$ . We show by simulations that our optimization criterion led to finding better performances in terms of distances, throughput, losses and attenuations for the TWDM-PON system with 100GHz spacing.

**Keywords:** FTTH, channel spacing, TWDM, PON, NRZ, DB, MODB, CSRZ, bit error rate BER, quality factor Q.

## **Résumé:**

Chaque jour, le besoin de la transmission des données fiables à très haut débit augmente de plus en plus ce qui oblige les entreprises de télécommunications d'offrir un bon service pour satisfaire un grand nombre d'utilisateurs avec une meilleure qualité.

Le réseau optique passif PON considéré comme la meilleure solution qui résout le problème de la capacité de transmission et la rendre avec des vitesses de transmission et des distances élevées jusqu'à des dizaines de kilomètres en utilisant différentes techniques de multiplexage optique par lesquelles nous multiplions plusieurs utilisateurs dans un seul canal à travers la fibre optique.

Cette recherche s'intéresse à l'optimisation d'un réseau FTTH avec une architecture TWDM-PON. Les simulations effectuées dans ce travail tiennent compte de l'impact de plusieurs facteurs impliqués dans notre travail tel que l'espacement entre canaux, les types de format de modulation (*NRZ-OOK*, *CS-RZ*, *DB* et *MODB*), la longueur de la liaison (longueur fibre optique), le débit binaire ainsi que les différentes limitations telles que les effets non-linéaires et la dispersion chromatique.

L'optimisation consiste à améliorer le facteur de qualité Q ainsi que le taux d'erreur binaire TEB  $\sim <10^{-9}$ . Nous montrons par simulations que notre critère d'optimisation a conduit à trouver des meilleures performances en termes de distances, de débit, de pertes et d'atténuations pour le système TWDM-PON avec l'espacement 100GHz.

**Mots clés :** FTTH, Espacement de canal, TWDM, PON, NRZ, DB, MODB, CSRZ, Taux d'erreur binaire TEB, facteur de qualité Q.

## ☞ Sommaire ☜

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Liste des symboles .....     | i   |
| Liste des abréviations ..... | i   |
| Liste des figures .....      | iii |
| Liste des tableaux .....     | vi  |
| Résumé .....                 | vii |
| Introduction générale .....  | 1   |

### **Chapitre I : Généralités sur les transmissions à fibres optiques**

|  |   |
|--|---|
| I.1 Introduction .....                                       | 2 |
| I.2 Définition .....   | 2 |
| I.3 Description de la fibre optique .....                    | 2 |
| I.3.1 Le cœur .....  | 3 |
| I.3.2 La gaine optique .....                                 | 3 |
| I.4 Le principe de fonctionnement de la fibre optique .....  | 3 |
| I.5 Condition de guidage de la lumière .....                 | 4 |
| I.6 Les différents types de la fibre optique .....           | 4 |
| I.6.1 Fibre monomode .....                                   | 4 |
| I.6.2 La fibre multimode .....                               | 5 |
| A. La fibre multimode à gradients d'indice .....             | 5 |
| B. La fibre multimode à saut d'indice : .....                | 6 |
| I.6.3 Performances des trois types de fibres optiques .....  | 7 |
| I.6.4 comparaison entre fibre 'multimode / monomode' .....   | 7 |
| I.7 Le principe de propagation et transmission optique ..... | 8 |
| I.8 Système de communication par fibre optique .....         | 8 |
| I.8.1 Liaison optique .....                                  | 8 |
| I.8.2 Emetteurs et Récepteurs à fibres optiques .....        | 8 |
| I.8.2.1 Emetteurs optiques .....                             | 8 |
| I.8.2.2 Récepteurs optiques .....                            | 9 |
| I.8.3 Les Sources optiques .....                             | 9 |

|  |    |
|--|----|
| I.8.3.1 Diode Laser (DL).....                            | 9  |
| I.8.3.2 La diode électroluminescente DEL.....            | 9  |
| I.8.4 Photodiode.....                                    | 10 |
| I.8.5 Photodiode PIN.....                                | 10 |
| I.8.6 Modulation directe.....                            | 11 |
| I.8.7 Modulation externe.....                            | 11 |
| I.8.8 Le modulateur Mach-Zehnder (MZM).....              | 11 |
| I.8.9 Les caractéristiques de la fibre optique.....      | 12 |
| I.8.9.1 L'ouverture numérique d'une fibre optique.....   | 12 |
| I.8.9.2 L'atténuation.....                               | 13 |
| I.9 Dispersion chromatique.....                          | 14 |
| I.9.1 La dispersion matériau.....                        | 14 |
| I.9.2 La dispersion guide.....                           | 14 |
| I.10 Les effets non linéaire.....                        | 14 |
| I.11 Les domaines d'application de la fibre optique..... | 15 |
| I.11.1 Les avantages de la fibre optique.....            | 16 |
| I.11.2 Les inconvénients de la fibre optique.....        | 16 |
| I.12 Couplage par fibre.....                             | 16 |
| I.13 Structure des câbles de la fibre optique.....       | 17 |
| I.14 Conclusion.....                                     | 17 |

## **Chapitre II : Technique de multiplexage et modulation optique**

|   |    |
|---|----|
| II.1 Introduction.....  | 18 |
| II.2 Les différentes techniques de multiplexage.....                          | 18 |
| II.2.1 Multiplexage fréquentielle (FDM).....                                  | 19 |
| II.2.1.1 Avantages et inconvénients du FDM.....                               | 20 |
| II.2.1.2 Applications du multiplexage par répartition en fréquence (FDM)..... | 20 |
| II.2.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM).....                             | 20 |
| II.2.2.1 Avantages et inconvénients du WDM.....                               | 21 |
| II.2.3 Multiplexage CWDM ( <i>Coarse-WDM</i> ).....                           | 21 |
| II.2.3.1 Avantages et inconvénients du CWDM.....                              | 21 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| II.2.4   | Multiplexage DWDM ( <i>Dense-WDM</i> ) .....              | 22 |
| II.2.4.1 | Avantages et inconvénients du DWDM .....                  | 23 |
| II.2.5   | Multiplexage temporel (TDM).....                          | 23 |
| II.2.5.1 | Le multiplexage TDM synchrone.....                        | 24 |
| II.2.5.2 | Le multiplexage TDM asynchrone (STDM) .....               | 24 |
| II.2.5.3 | Avantages et inconvénients du TDM .....                   | 25 |
| II.2.5.4 | Applications du TDM.....                                  | 25 |
| II.2.6   | Multiplexage optique par répartition en temps (OTDM)..... | 25 |
| II.2.6.1 | Avantages et inconvénients de l'OTDM .....                | 26 |
| II.2.6.2 | Applications de l'OTDM.....                               | 26 |
| II.3     | Les différentes techniques de modulation optique.....     | 28 |
| II.3.1   | Principe de la modulation optique.....                    | 28 |
| II.3.2   | Codages en intensité (OOK) .....                          | 28 |
| II.3.2.1 | Le format NRZ (Non Return-to-Zero).....                   | 28 |
| II.3.2.2 | Le format RZ (Return-to-Zero) .....                       | 29 |
| II.3.2.3 | Le format CSRZ (Carrier Suppressed Return-to-Zero).....   | 30 |
| II.3.3   | Codages duo-binaires .....                                | 31 |
| II.3.3.1 | Le format duo-binaire (DB).....                           | 31 |
| II.3.3.2 | Le format duo-binaire (MODB) .....                        | 31 |
| II.4     | Conclusion .....  | 32 |

### **Chapitre III : Les réseaux PON et les réseaux FTTH**

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| III.1     | Introduction .....                                      | 33 |
| III.2     | Les réseaux optiques passifs (PON) .....                | 33 |
| III.2.1   | Architecture point-à-point (P2P).....                   | 34 |
| III.2.2   | Architecture point à multipoint active (P2M).....       | 35 |
| III.2.3   | Architecture point à multipoint passive (P2M-PON) ..... | 36 |
| III.3     | Différentes topologies du réseau PON .....              | 36 |
| III.4     | Les réseaux FTTX (fibre to the X) .....                 | 37 |
| III.5     | Technologies des réseaux PON .....                      | 40 |
| III.5.1   | Le TDM PON .....  | 40 |
| III.5.1.1 | APON (ATM PON) .....                                    | 42 |

|   |    |
|---|----|
| III.5.1.2 EPON (Ethernet PON) .....                     | 42 |
| III.5.1.3 GPON (Gigabit PON) .....                      | 43 |
| III.5.2 WDM PON .....                                   | 45 |
| III.6 Les techniques du multiplexage hybride .....      | 46 |
| III.6.1 Le système hybride TWDM-PON .....               | 46 |
| III.6.1.1 Avantages WDM-TDM PON .....                   | 48 |
| III.6.1.2 Inconvénients WDM-TDM PON .....               | 48 |
| III.7 Caractéristiques de système hybride TWDM-PON..... | 49 |
| III.8 Conclusion .....                                  | 49 |

## **Chapitre IV : [Tapez le titre du document]**

|  |    |
|--|----|
| IV.1 Introduction .....  | 50 |
| IV.2 Description du logiciel Optisystem .....                                  | 52 |
| IV.2.1 Les applications de l'Optisystem.....                                   | 53 |
| IV.2.2 Avantages du logiciel Optisystem .....                                  | 53 |
| IV.2.3 Paramètres de qualité d'une liaison optique .....                       | 53 |
| A. Le diagramme de l'œil .....   | 54 |
| B. Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q .....                       | 54 |
| C. Le taux d'erreur binaire BER .....  | 55 |
| IV.3 paramètres de la simulation.....  | 55 |
| IV.4 Description des architectures réaliser en simulation .....                | 56 |
| IV.4.1 Description des éléments de la chaine de transmission .....             | 58 |
| IV.4.1.1 Description du circuit d'émission OLT (Optical Line Termination)..... | 58 |
| IV.4.1.2 Multiplexage et démultiplexage.....                                   | 63 |
| IV.4.1.3. Description du circuit de réception .....                            | 64 |
| IV.4.1.4 Schéma bloc de l'ONU (Optical Network Unit).....                      | 65 |
| IV.5 Présentation des résultats de la simulation .....                         | 66 |
| IV.5.1 Espacement 100 GHz entre deux canaux adjacents .....                    | 66 |
| IV.5.1.1 Etude de l'impact de variation du débit binaire sur le système .....  | 67 |
| IV.5.1.2 Etude de l'impact de la distance de transmission sur le système.....  | 68 |
| IV.5.2 Espacement 25 GHz (0.2nm) entre deux canaux adjacents .....             | 69 |



|   |    |
|---|----|
| IV.5.2.1 Etude de l'impact du débit binaire sur le système .....              | 69 |
| IV.5.2.2 Etude de l'impact de la distance de transmission sur le système..... | 70 |
| IV.5.3 Résultats récapitulatifs.....  | 71 |
| IV.5.3.1 Distance de transmission maximale.....                               | 71 |
| IV.5.3.2 Débits binaire maximum.....  | 72 |
| IV.6 Conclusion.....  | 73 |
| Conclusion générale et perspectives .....                                     | 74 |
| Références bibliographiques   |    |

### Introduction Générale

La fibre optique offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien les programmes de télévision, les conversations téléphoniques, la visioconférence ou les données informatiques. Au cours des 10 à 15 années à venir, les réseaux d'accès en cuivre à travers le monde seront en grande partie remplacés par un réseau d'accès fibre ce support de transmission va transformer l'environnement des télécommunications à travers le monde avec des meilleures performances et des services plus riches.

Le réseau d'accès appelé communément PON (Passive Optical Network) est l'une des technologies préférées dans les réseaux optiques contrairement à un réseau optique actif, l'alimentation en électricité n'est nécessaire qu'au niveau des points d'envoi et de réception c'est pourquoi les réseaux PON sont extrêmement efficaces du point de vue des coûts opérationnels et réduit la consommation d'énergie.

L'objectif de ce mémoire est de faire une comparaison des performances entre différentes formats de modulation sur un réseau optique passif de multiplexage en temps et en longueur d'onde (TWDM-PON) sous différents espacement entre canaux.

Le mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, les notions et les concepts de base sur la fibre optique en général seront rappelées et en particulier leur usage en transmission.

Le second chapitre est consacré à l'exposition des principaux types de multiplexages optique et les différents formats de modulation avec lequel nous avons travaillés dans notre simulation.

Le troisième chapitre est plus particulièrement consacré à la présentation des différentes architectures et standards du réseau PON et des généralités sur les technologies FTTX et en particulier la technologie FTTH et ses architectures associées.

Le dernier chapitre est consacré aux différentes simulations du système hybride TWDM-PON avec des différents formats de modulation optique et son comportement en termes de taux d'erreur binaire (TEB), de facteur de qualité (Q).

En fin une conclusion générale des travaux de ce mémoire résumera les différentes études et contributions présentées dans ce contexte.

# *Chapitre I*

---

## *Généralités Sur les Transmissions à Fibres Optiques*

### I.1 Introduction

Avant l'invention du téléphone par Graham Bell en 1876, les télécommunications utilisaient déjà le télégraphe. Puis, grâce à la recherche du Maxwell et Hertz, l'information a emprunté la voie des airs. Finalement, au début des années 1970 est apparu le principe de transmission optique à l'aide de la fibre optique : transmettre des signaux lumineux à travers cœur de verre ou plastique [1].

La fibre optique a connu de nombreux développements depuis ses débuts et on annonce de bien plus prometteuses encore : la multiplicité des paramètres, qui jouent sur l'efficacité de la fibre, fait que l'on peut sans cesse améliorer les performances de celle-ci.

La fibre optique est actuellement, le support de transmission par excellence, idéal, le plus fiable, et le plus sécurisé, pour la transmission de données, dans le monde des télécommunications.

### I.2 Définition

La fibre optique est un fil très fin en verre, ou en plastique, qui conduit la lumière pour transporter une grande quantité de données numériques avec une vitesse très élevée sur une longue distance. Le réseau est déployé par des fournisseurs d'accès qui utilise l'infrastructure.

La capacité de la fibre à transmettre très rapidement des informations permet le développement de nouvelles applications dans plusieurs domaines comme la télévision, la médecine, récemment ils ont utilisés la fibre optique dans l'éclairage et la fibroscopie.

Elle offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux traditionnels [2].

La fibre optique sert donc à :

- Transporter de l'information numérique.
- Utiliser une variation d'intensité lumineuse pour générer un signal binaire.

### I.3 Description de la fibre optique

Un câble à fibres optiques est soutenu avec des fils de renforcement en plastique, tel que le kevlar, ceci rend un câble plus résistant, assurant ainsi que les fibres optiques ne s'abîment pas lorsqu'elles sont pliées.

Si on parle de la fibre optique, c'est parce que ce câble transporte de la lumière. Cette lumière est guidée dans le centre de la fibre qui s'appelle le cœur.

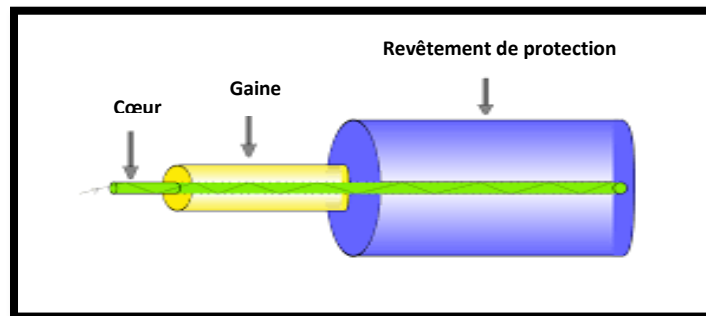
### I.3.1 Le cœur

Cette composante est constituée en majorité de silicium, enrichi avec d'autres éléments. C'est dans ce cœur que sera confinée la plus grande partie de l'énergie lumineuse guidée. Il est entouré par la gaine optique [3].

### I.3.2 La gaine optique

La gaine optique est composée généralement du même matériau que le cœur, mais dopée différemment, son indice de réfraction est bien inférieur à celui du cœur. Cela permet justement à la lumière de se réfléchir.

Elle est protégée par une enveloppe, fabriquée fréquemment en plastique [4].



**Figure I.1 :** Description de la fibre optique [4].

### I.4 Le principe de fonctionnement de la fibre optique

Le fonctionnement de la fibre optique repose sur la réfraction de la lumière. L'information qui circule dans les câbles se déplace grâce à la lumière. Dans le cas de l'informatique, l'information correspond par exemple aux données échangées sur Internet entre des utilisateurs séparés parfois par des milliers de kilomètres. Revenons à la réfraction, terme clé sans lequel il est impossible de bien définir le mécanisme de la fibre optique. La capacité d'une onde électromagnétique à changer de direction lors de son passage dans un milieu quelconque se nomme indice de réfraction.

L'indice de réfraction à l'intérieur du cœur de la fibre est plus élevé que dans la gaine optique. La lumière à l'intérieur du câble rebondit sur les parois du cœur. Ce phénomène physique se traduit par une circulation plus rapide de la lumière et par une transmission plus rapide des données.

Le cœur est généralement en silice. Le signal lumineux est émis par une diode laser. Cette technique permet de limiter au maximum la perte de vitesse du signal, même lorsqu'il parcourt de longues distances [5, 6].

### I.5 Condition de guidage de la lumière

La conduction d'un rayon sur la fibre nécessite que celui-ci soit réfléchi à l'interface cœur/gain de la fibre, ce qui demande une conduction sur l'angle d'incidence du rayon sur la face d'entrée de la fibre. Pour un angle d'incidence inférieur à l'angle critique, le rayon est guidé dans la fibre, mais s'il est supérieur à l'angle critique dans ce cas, le rayon ne sera pas guidé dans la fibre [3].

### I.6 Les différents types de la fibre optique

Aujourd'hui les industriels commercialisent deux types de fibres optiques : fibre monomode et multimode. Leurs principales différences résident essentiellement dans la longueur d'onde utilisée et le diamètre du cœur [5].

1. La fibre optique monomode
2. La fibre optique multimode

#### I.6.1 Fibre monomode

La fibre optique qui transmet un seul rayon, elle est appelée une fibre monomode. Elle est principalement appliquée par les opérateurs pour les grandes distances (WAN). La transmission des données se fait au moyen d'un laser, L'utilisation de ce type est très coûteuse. Fibre de faible diamètre de cœur (Figure 1.2), évitant la dispersion des rayons, ceux-ci se propagent donc dans l'axe de la fibre. Elle est généralement utilisée dans les réseaux longs distances. La fibre est dite « monomode » car, en raison de la très petite taille du cœur (9  $\mu\text{m}$ ), il n'y a qu'un seul mode de propagation de la lumière.

Actuellement les fibres monomodes présentent la bande passante la plus large et le niveau d'atténuation le plus bas. C'est pourquoi elles sont universellement utilisées pour transmettre des signaux à très haut débit et sur longues distances [7].



**Figure 1.2 :** Fibre optique monomode [7].

Les fibres monomodes ont un noyau très fin, de la taille d'un cheveu. L'atténuation sur ce type de fibre est quasi nulle, c'est ce qui la rend si puissante.

### I.6.2 La fibre multimode

La fibre optique qui transmet plusieurs rayons, avec des chemins différents, elle est appelée fibre multimode, le cœur de la fibre multimode est plus grand que celui de la fibre monomode.

Elle est principalement utilisée dans les réseaux locaux LAN dont la distance n'excède pas les deux km. La transmission des données se fait en général au moyen d'une LED.

La fibre multimode est le moins chère, ce qui en fait le câble préféré et le plus utilisé par les entreprises.

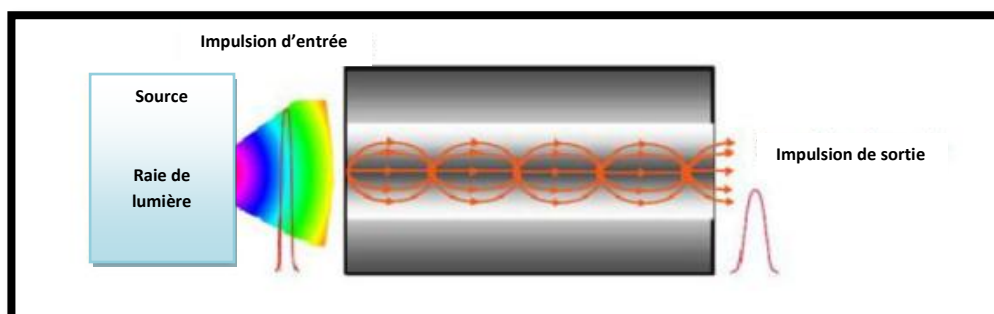
Les inconvénients qui présentent ce type de fibre c'est l'atténuation des signaux plus marquée ou encore une vitesse de propagation des signaux plus faible. Elle est aujourd'hui utilisée sur de courtes distances ou dans les décorations [8].

Il existe deux types de fibres multimodes :

#### A. La fibre multimode à gradients d'indice

Dans ce type de fibre l'indice du cœur diminue progressivement du centre vers sa périphérie, ce qui compense les différences de trajet (Figure I.3). L'étalement des impulsions est nettement plus faible. C'est la plus utilisée pour les liaisons informatiques (réseaux LAN). C'est une fibre multimode, donc plusieurs modes de propagation coexistent. A la différence de la fibre à saut d'indice, il n'y a pas de grande différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine [3].

Cependant, le cœur des fibres à gradient d'indice est constitué de plusieurs couches de matière ayant un indice de réfraction de plus en plus élevé. Ces différentes couches de silice de densités multiples influent sur la direction des rayons lumineux, qui ont une forme elliptique.



**Figure 1.3 :** Fibre multimode à gradient d'indice [3].

### B. La fibre multimode à saut d'indice :

Les fibres multimodes à saut d'indice sont les plus courantes. Ce type de fibre est utilisé dans les réseaux locaux de type LAN. La lumière se propage à l'intérieur du noyau de silice. C'est pour cela que les rayons lumineux se propagent par réflexion totale interne en "dent de scie".

Leur différence réside principalement dans la différence du diamètre du cœur. La fibre à saut d'indice présente un diamètre de cœur deux à quatre fois plus grand que celui des fibres à gradient d'indice [9].

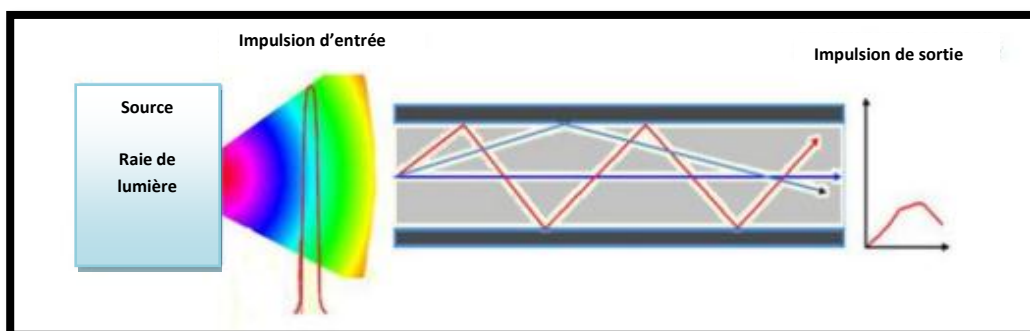


Figure I.4 : Fibre multimode à saut d'indice [3].

- La fibre à saut d'indice possède un cœur très large.
- L'atténuation sur ce type de fibre est très importante comme on peut le voir sur la différence des impulsions d'entrées et de sorties.
- La fibre à gradient d'indice possède un cœur de taille intermédiaire.

L'atténuation sur ce type de fibre est moins importante que sur les fibres à saut d'indice.

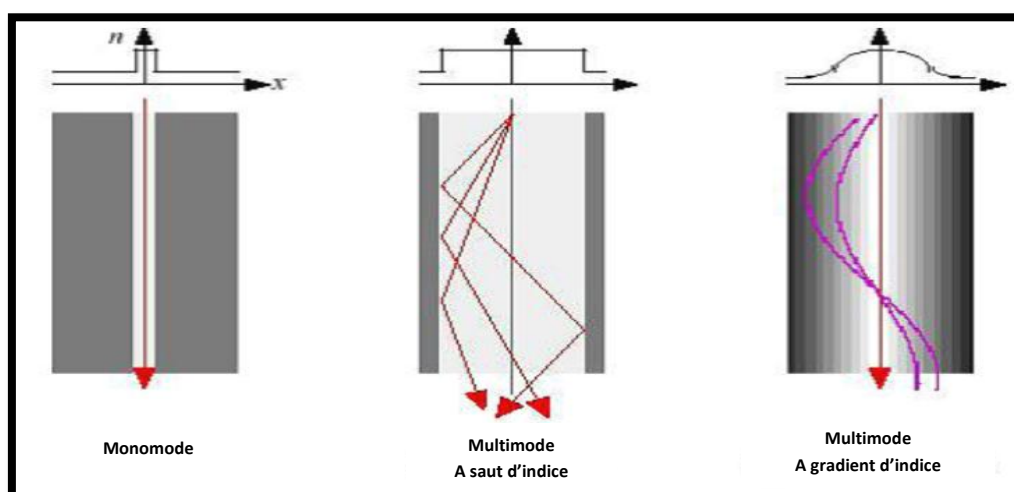


Figure I.5 : Atténuation sur les fibres à saut d'indice [3].



**I.6.3 Performances des trois types de fibres optiques**

La figure suivante montre l'interprétation des trois types de la fibre optique ; On remarque que l'atténuation est constante quelle que soit la fréquence, mais seule la dispersion lumineuse qui limite la largeur de la bande passante [7,10].

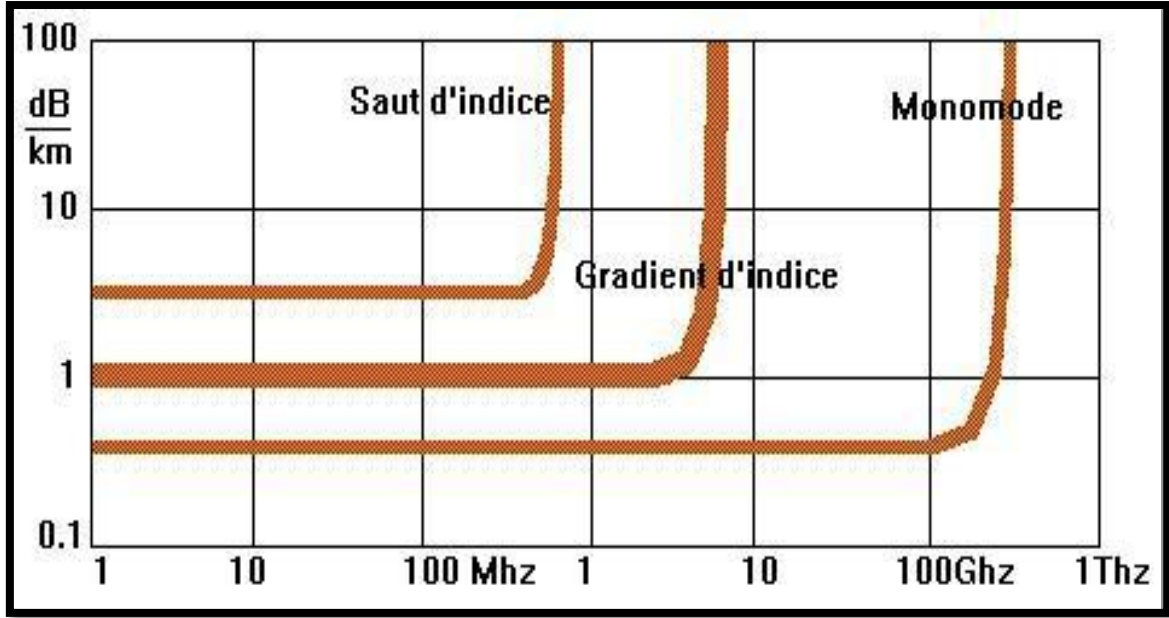


Figure I.6 : Performance des trois types fibres [7].

**I.6.4 comparaison entre fibre ‘multimode / monomode ‘**

Le tableau suivant résume une comparaison entre la fibre monomode et la fibre multimode :

| Fibre monomode                                     | Fibre multimode                                      |
|--|--|
| Faible dispersion                                  | Forte dispersion                                     |
| Ouverture numérique faible<br>(Connexion délicate) | Ouverture numérique grande<br>(Connexion facile)     |
| Faible atténuation                                 | Forte atténuation                                    |
| Utilisation pour longues distances                 | Utilisation pour réseaux locaux<br>(courte distance) |

Tableau I.1: comparaison entre fibre ‘multimode / monomode ‘[7].

### I.7 Le principe de propagation et transmission optique

La vitesse de la lumière varie sensiblement selon les différentes densités des matériaux qu'elle traverse. Les rayons lumineux qui se propagent le long du cœur de la fibre heurtent sa surface avec un angle d'incidence supérieur à l'angle critique: la totalité de la lumière est alors réfléchiée dans la fibre [11].

La lumière peut ainsi se propager sur de longues distances, en se réfléchissant des milliers de fois. Afin d'éviter les pertes de lumière liées à son absorption par les impuretés à la surface de la fibre optique, le cœur de celle-ci est revêtu d'une gaine en verre d'indice de réfraction beaucoup plus faible; les réflexions se produisent alors à l'interface cœur-gain.

### I.8 Système de communication par fibre optique

Aujourd'hui, les routeurs Internet et des systèmes d'interface et d'interconnexions réseau utilisent des émetteurs-récepteurs à fibres optiques dans leur conception de système.

#### I.8.1 Liaison optique

Une Liaison point à point sur fibre optique met plusieurs sous-ensembles de base comme le montre la figure suivante [12].

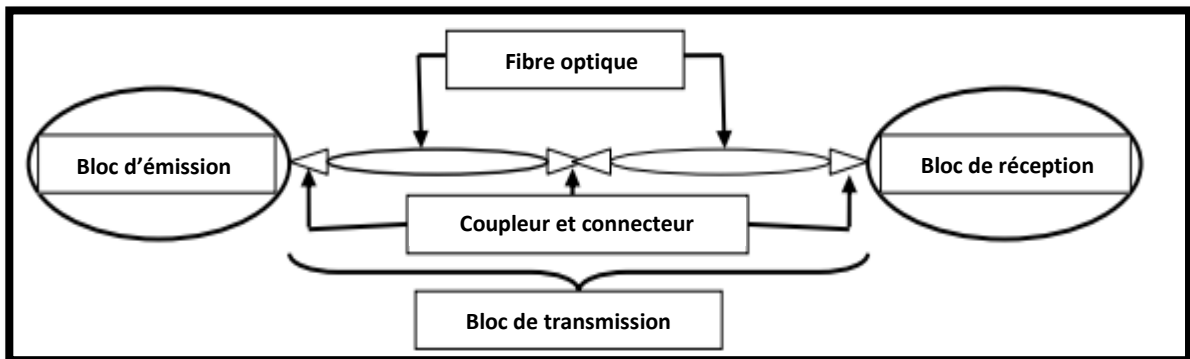


Figure I.7 : schéma d'une liaison optique [12].

#### I.8.2 Emetteurs et Récepteurs à fibres optiques

##### I.8.2.1 Emetteurs optiques

Un émetteur a deux fonctions primordiales; la génération d'un signal optique, et la modulation de ce signal par l'information, mettre une qualité supplémentaire très utile d'un émetteur optique est sa capacité d'être accordable en fréquence.

Les deux sources classiques utilisées en fibre optique sont: les LED et les LASER [6].

### I.8.2.2 Récepteurs optiques

La fonction d'un récepteur dans un système de transmission optique est de: détecter et de démoduler un signal lumineux transmis sur une fibre. La détection consiste en la conversion du signal optique en signal électrique. La démodulation est généralement accomplie ensuite par les techniques habituelles des systèmes de transmission électriques.

Il existe sur le marché essentiellement deux types de composants:

- La photodiode et la photodiode PIN, Ces deux composants transforment une énergie
- Les diodes PIN sont les plus populaires et les moins chères [13].

### I.8.3 Les Sources optiques

Depuis le début des communications par fibre optique, le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs semi-conducteurs en raison de leurs petites dimensions, ils sont la source la plus appropriée; Permet une meilleure efficacité du couplage optique avec la fibre.

Aussi, la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix de sources à spectres réduits telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL) [8].

#### I.8.3.1 Diode Laser (DL)

Une diode laser (DL) est une jonction de semi-conducteurs, conçue et utilisée de façon à exploiter l'effet laser

Elle est caractérisée par :

- La source DL est cohérente et monochromatique.
- Largeur de spectre étroite.
- Les émissions se font dans la même direction (diagramme de rayonnement directive).
- Utilisée dans les systèmes de transmission à grande distance.

#### I.8.3.2 La diode électroluminescente DEL

C'est un composant qui réalise directement l'émission de photons par recombinaison des Porteurs dans une hétérojonction polarisée en directe. Les matériaux utilisés sont choisis en fonction de la longueur d'onde d'émission.

Les caractéristiques de ce dispositif sont :

- La diode DEL est une source poly- chromatique, et incohérente.
- Le spectre est assez large.
- Le diagramme de rayonnement est moins directif.
- La caractéristique puissance-courant est assez linéaire.
- Utilisées dans les systèmes des transmissions dont ils ne nécessitent pas de grande bande passante [14].

### I.8.4 Photodiode

Une photodiode, est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique. Il se compose d'un cristal hétérogène de structure PN placé entre deux électrodes qui sont reliés à une source de tension par l'intermédiaire d'une résistance de charge R [8].

La figure suivante nous montre la composition interne de la photodiode :

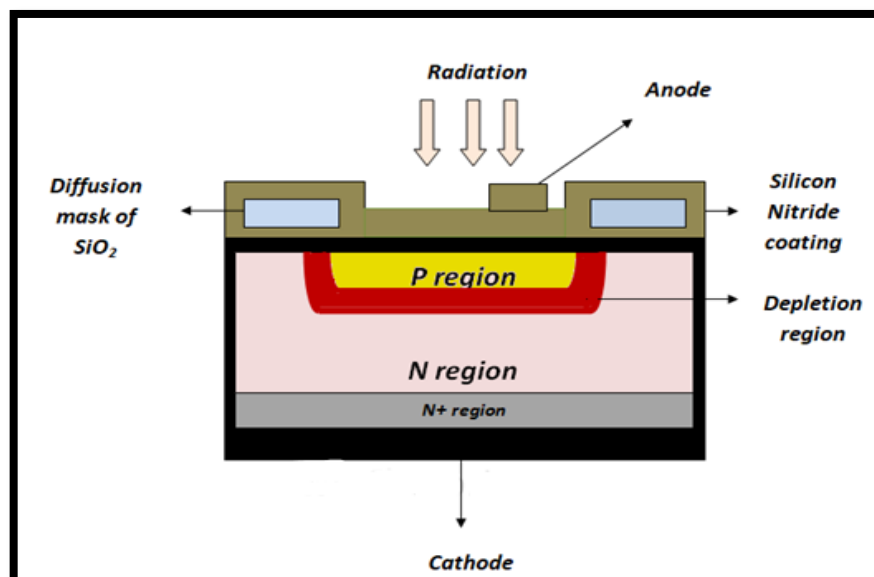


Figure I.8 : Structure de la photodiode [8].

### I.8.5 Photodiode PIN

La photodiode PIN est un composant optoélectronique, utilisée dans de nombreuses applications industrielles. Sa particularité vient de sa jonction composée d'une zone intrinsèque intercalée entre une région fortement dopée P et une autre fortement dopée N.

De même la photodiode PIN a un rendement quantique (conversion des photons en électrons) bien supérieur à la photodiode PN tout en conservant des temps de réponse très rapides [5].

### I.8.6 Modulation directe

La modulation directe peut être assimilée à une technique de modulation de type "classique". En effet, on va ici moduler directement le courant injecté en entrée de la diode.

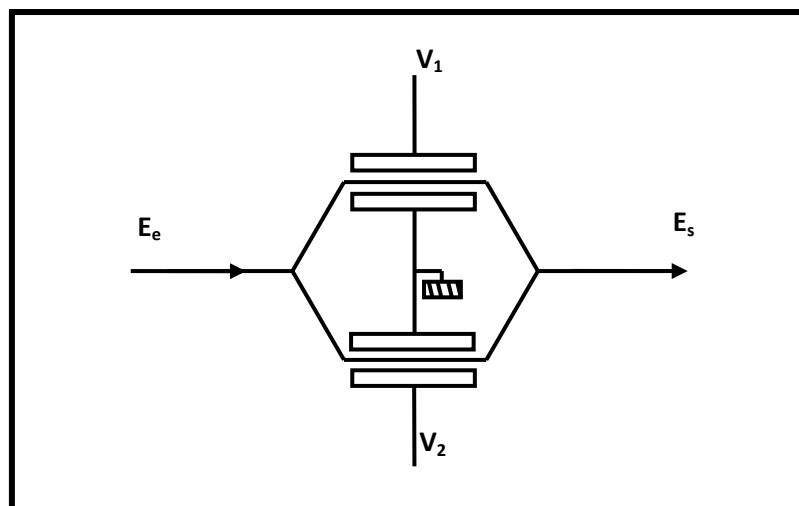
A la suite de cette modulation de courant, l'intensité de la lumière produise par la diode sera affectée. Plus le courant reçu par la diode est important, plus l'intensité lumineuse qu'elle délivrera sera puissante [15].

### I.8.7 Modulation externe

Pour pouvoir utiliser des formats de modulation plus variés, il est préférable d'utiliser un modulateur externe. En ce qui concerne les modulateurs d'amplitude, il en existe principalement de deux sortes : les modulateurs à électro-absorption (EAM pour Electro-Absorption Modulator) et les modulateurs Mach-Zehnder (MZM pour Mach-Zehnder Modulator). Il existe aussi des modulateurs de phase (PM pour Phase Modulator) [16].

### I.8.8 Le modulateur Mach-Zehnder (MZM)

Le modulateur Mach-Zehnder est constitué de deux bras recevant chacun la moitié de la puissance lumineuse initiale. Au niveau de ses bras, un déphasage relatif entre les deux signaux est appliqué. Ce déphasage est converti en variation d'intensité optique par l'interférence entre les signaux déphasés issus des deux bras. La Figure I.9 montre un schéma d'un MZM.



**Figure I.9** : schéma de principe d'un modulateur Mach-Zehnder [16].

Le MZM est caractérisé par sa fonction de transfert décrite, dans sa forme idéale, par l'Équation :

$$E_S = E_e \cos \left( \pi \frac{V_1 - V_2}{2V_\pi} \right) e^{-i \left( \pi \frac{V_1 + V_2}{2V_\pi} \right)} \quad \dots (I.1)$$

$E_e$  représente le champ électrique du signal optique d'entrée, continu car il provient directement de la source laser.  $E_S$  représente le champ électrique du signal qui sortie, susceptible de présenter une modulation d'amplitude ou de phase.  $V_1$  et  $V_2$  sont les tensions de commande des cellules électro-optiques, appliquées à chacun des bras du MZM [16].

### I.8.9 Les caractéristiques de la fibre optique

La fibre optique est caractérisée par certains paramètres qui sont déterminés à partir de ses différents types. Parmi les paramètres les plus importants on peut citer :

- ✓ L'ouverture numérique;
- ✓ L'atténuation.

#### I.8.9.1 L'ouverture numérique d'une fibre optique

L'ouverture numérique d'une fibre optique caractérise le cône d'acceptance si les rayons lumineux dans ce cône seront guidés par réflexion totale interne de la fibre; dans le cas contraire, le rayon ne sera pas guidé. Pour les fibres monomodes il est préférable d'utiliser une source laser, car l'ouverture numérique est faible, Mais pour les fibres à gradient d'indice où il varie le long d'un diamètre, l'ouverture numérique est alors maximale sur l'axe de la fibre et s'annule à la périphérie du cœur [17].

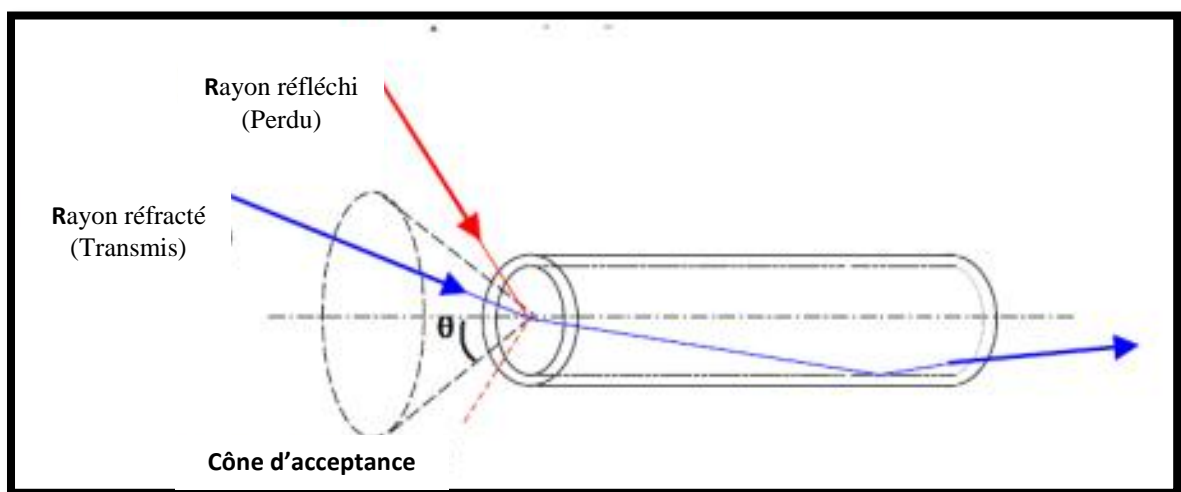


Figure I.10 : l'ouverture numérique d'une fibre optique [17].

### I.8.9.2 L'atténuation

L'atténuation dans une fibre optique est définie comme étant le rapport de la puissance optique transmise dans la fibre et la puissance reçue exprimée.

$$A[\text{dB}] = 10 \log \left( \frac{P_e}{P_r} \right) \quad \dots(1.2)$$

Avec :  $P_e$  : la puissance lumineuse à l'entrée.

$P_r$  : est la puissance lumineuse à la sortie.

L'atténuation provoque une perte d'énergie du signal transmis, parmi les causes principales nous citons trois :

- Les propriétés intrinsèques des matériaux utilisées: diffusion, absorption ...
- Les défauts de fabrication : impuretés, défauts géométrique ...
- Le non respect des règles d'ingénierie : courbures trop importantes

L'atténuation provoque aussi une diminution exponentielle de la puissance optique le long de la fibre [8]. Pour résumer toutes ces pertes et atténuation qui existent au sein d'une fibre optique, voici un schéma récapitulatif :

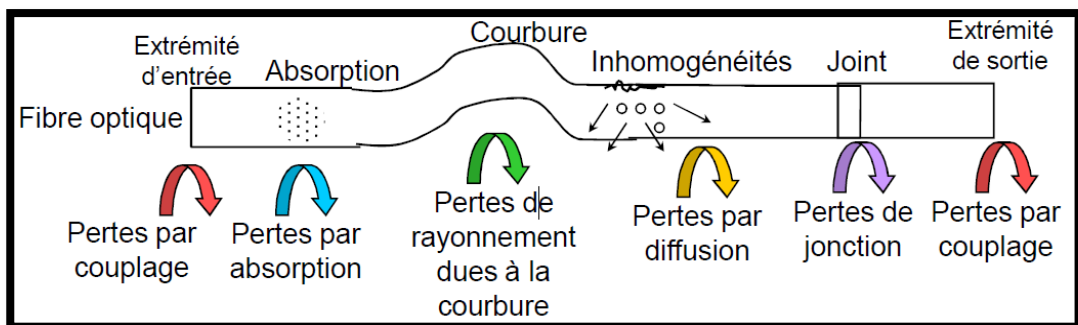


Figure I.11 : Bilan de perte dans une fibre optique [8].

La figure suivante nous montre atténuation dans les fibres optiques :

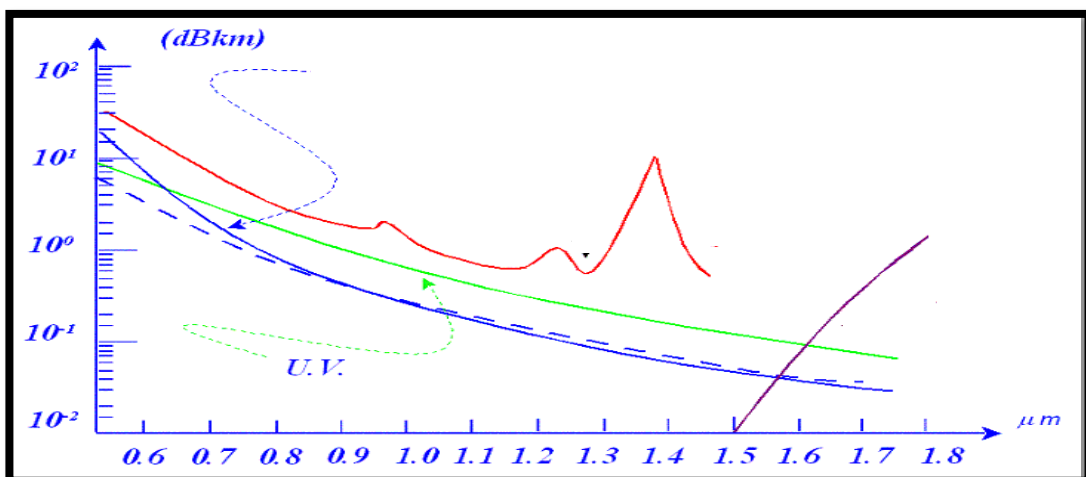


Figure I.12 : atténuation dans les fibres optiques [8].

### I.9 Dispersion chromatique

Ce terme regroupe en fait deux types de dispersion :

#### I.9.1 La dispersion matériau

Les lasers et les LEDs ne sont pas des sources monochromatiques. Ils produisent de la lumière dans une gamme de longueur d'ondes. Une impulsion lumineuse issue de source optique est donc composée de plusieurs longueurs d'onde. L'indice de réfraction des fibres étant différent selon la longueur d'onde de la lumière, chaque longueur d'onde se propage dans la fibre à une vitesse spécifique. Certaines longueurs d'ondes arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale (s'élargit).

#### I.9.2 La dispersion guide

Ceci est dû au fait que la lumière n'est en fait pas strictement confinée dans le cœur. Les champs électrique et magnétique constituant l'impulsion lumineuse s'étendent en fait (légèrement) à l'extérieur du cœur, donc dans la gaine. Le champ électromagnétique "déborde" dans la gaine d'autant plus que la longueur d'onde est grande. L'indice de réfraction vu par l'onde est donc une moyenne entre de l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine. Les longueurs d'ondes les plus petites auront donc tendance à se propager plus lentement que les longueurs d'ondes plus grande, d'où un élargissement de l'impulsion lumineuse.

Cet effet est quasiment négligeable avec les fibres multimodes (qui n'ont un rayon de cœur relativement grand) mais ne l'est pas avec les fibres monomodes (pour lesquelles le rayon du cœur est quasiment de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde).

Les deux types de dispersion, guide et matériau, se compensent ainsi exactement à la longueur d'onde de 1310nm donnant ainsi une dispersion chromatique nulle pour cette longueur d'onde, ce qui est le principal avantage à travailler dans la seconde fenêtre de transmission [4-8].

### I.10 Les effets non linéaire

Une onde optique de forte intensité se propageant dans une fibre optique uni-modale, peut générer un grand nombre d'effets non linéaires, Parmi ceux-ci, nous pouvons citer :

- l'effet de Kerr : L'effet de Kerr interprète la variation (l'augmentation) de l'indice de réfraction de la fibre sous l'action d'une onde électromagnétique (intensité du champ optique).



- l'effet de Brillouin et l'effet de Raman : La classe des effets non-linéaires résultant de diffusions stimulées inélastiques consiste à un transfert d'une partie de l'énergie du champ optique vers le milieu non-linéaire. Deux importants effets font partie de cette catégorie, et ils sont reliés aux modes d'excitations des vibrations de la silice. Ces phénomènes, connus sous les noms de diffusion Raman stimulée (SRS : Stimulated Raman Scattering) et diffusion Brillouin stimulée (SBS : Stimulated Brillouin Scattering). Ce qui les différencie est : la participation de phonons optiques dans la diffusion Raman et de phonons acoustiques dans la diffusion Brillouin [14].

### I.11 Les domaines d'application de la fibre optique

Le domaine d'utilisation des fibres optiques est illimité, il est en constante évolution. Parmi les applications actuelles des fibres optiques on peut citer les suivantes [3,10] :

- En télécommunication, la fibre optique est utilisée essentiellement pour la transmission des données que ce soit des conversations téléphoniques, des images. C'est probablement l'un des domaines où l'utilisation de la fibre optique est plus importante et a de très grands avantages.
- En domaine des réseaux comme les réseaux nationaux, internationaux et les réseaux locaux en environnement bruité.
- En médecine, la fibre optique est utilisée en médecine tant pour diagnostiquer des problèmes de santé que pour traiter certaines maladies, mais dans les traitements elle sert à transporter la lumière intense d'un laser à l'intérieur du corps humain où elle interagira par effet thermique avec les tissus: en chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de: pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur ou réparer une rétine, et en endoscopie qui sert à éclairer l'intérieur du corps, et transmettre les images pour le médecin.
- Les capteurs (température, pression...). Les applications de la fibre optique dans ce domaine sont nouvelles, par exemple; elle permet de mesurer une variation de température.
- Dans le domaine de l'éclairage, les fibres optiques sont très utilisées, par exemple dans l'architecture, l'aménagement d'espaces publics et domestiques.
- Dans le domaine militaire, la fibre optique est très utile surtout pour gérer le contrôle et le système radar.

### I.11.1 Les avantages de la fibre optique

- Performances de transmission : très faible atténuation, très large bande passante, multiplexage possible de plusieurs signaux et de plusieurs utilisateurs. Elles permettent de concevoir des systèmes de transmission de portée et capacité très supérieures à celles des câbles conducteurs.
- Avantages de mise en œuvre : faible poids, très petite taille, grande souplesse.
- Sécurité électrique : la fibre optique a une force de tension plus grande que les fibres de cuivre ou d'acier du même diamètre. Elle est plus flexible, et peut être tordue plus facilement résistant à la plupart des éléments corrosifs que le câble de cuivre ne peut pas y résister.
- Sécurité électromagnétique : la fibre optique n'est pas sensible aux parasites.
- Avantage économique : le coût global d'un système sur fibres optiques est de plus en plus souvent inférieur à celui d'un système cuivre, c.à.d. que les matières premières qui servent à fabriquer du verre sont nombreux contrairement au cuivre. Cela veut dire que le système à fibre est plus facile et moins cher à fabriquer.
- La rentabilité de la fibre : le réseau à fibre optique a un cycle de vie de 20 ans [4].

### I.11.2 Les inconvénients de la fibre optique

- Malgré les offres de la fibre optique, elle présente quelques inconvénients que l'on peut citer [6,4] :
- Coût : les câbles de fibre optique sont plus coûteux à installer, mais durent plus longtemps que les câbles de cuivre.
- La fragilité : la fibre optique est plutôt fragile aux dommages par rapport aux fils de cuivre, donc il faut ne pas tordre ou plier les câbles.
- La distance entre l'émetteur et le récepteur doit rester courte.
- Difficultés de raccordement entre deux fibres.
- Protection : Les fibres exigent plus de protection autour du câble comparé au cuivre

### I.12 Couplage par fibre

Le couplage par fibres optiques se fait pour raccorder deux fibres ensemble en utilisant plusieurs méthodes on peut citer [8 - 18] :

- Le couplage mécanique de deux connecteurs par une pièce mécanique
- Le couplage par "Splicing" mécanique qui est utilisé pour la connexion des câbles ou pour la réparation.

- La fusion, au moyen d'un appareil qui sert à épisser c'est-à-dire faire une épissure ou une fusion entre deux fibres.

### I.14 Conclusion

L'information avec les fibres optiques, n'est plus transmise sous forme électrique, mais lumineuse. Elle est résistante et de moins en moins coûteuse. Alors, la lumière permet de transmettre beaucoup plus d'informations que ne le permet l'électricité, en faisant également un choix de fréquences beaucoup plus vaste, d'où le terme "large bande". Il est alors possible d'envoyer différents types de signaux et par conséquent, plusieurs services à la fois sur une seule et même ligne dans un réseau adapté à une telle application. La fibre optique, de la taille d'un cheveu, reste un moyen actuel pour transporter de très hauts débits d'informations numériques. Grâce à ses nombreux avantages et performances, la transmission optique reste la meilleure de tous les moyens de transmissions qui puissent exister d'où la présence de plusieurs câbles.

# *Chapitre II*

---

## *Techniques de Multiplexages et Modulations Optiques*

### II.1 Introduction

Un système de communication véhicule l'information entre une source à un destinataire séparé par une distance considérable. L'information primaire que l'on veut transmettre à distance est convertie d'un signal électrique qui est modulé par un émetteur (Laser ou Diode Electroluminescente) en un signal optique.

Un codage par la variation d'intensité lumineuse est effectué avant l'émission du signal ce codage consiste à coder les niveaux logiques bas par une absence de signal lumineux, tandis que les niveaux logiques hauts seront détectés grâce à la présence d'un fort signal lumineux au sein de la fibre optique.

Le passage de plusieurs signaux simultanément sur une fibre optique est possible par le multiplexage, A l'aide de ce principe simple, de larges économies sont possibles grâce à la réduction des coûts d'installation et/ou d'exploitation (moins de câbles pour faire passer la même quantité d'information).

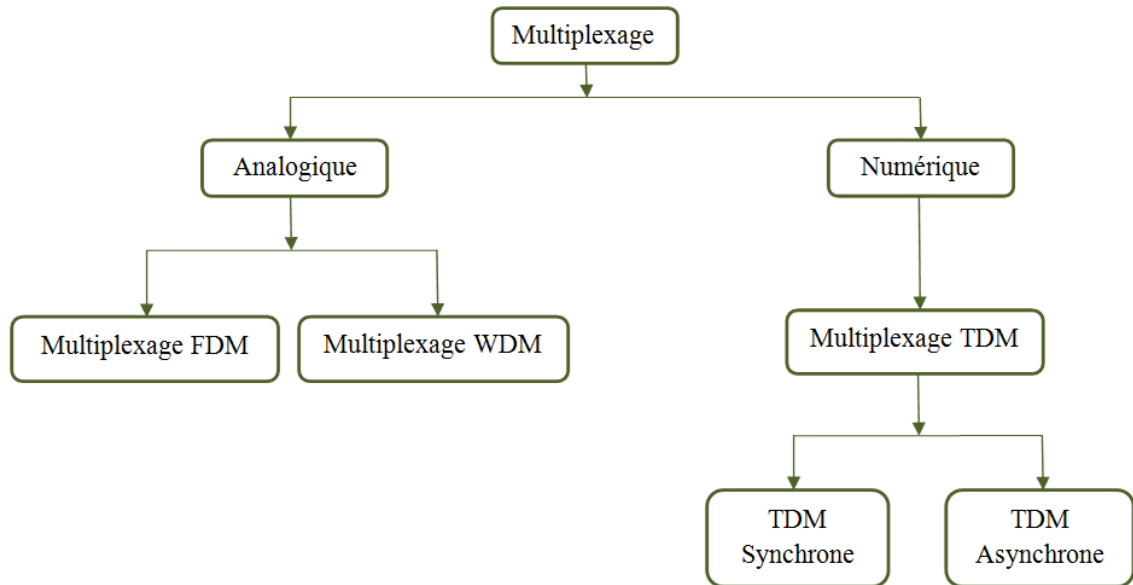
Nous verrons dans cette partie plusieurs types de multiplexage et codages pour bien véhiculer les informations.

### II.2 Les différentes techniques de multiplexage

Des techniques de multiplexage ont ainsi été développées, chacune permettant de transmettre  $N$  signaux simultanément sur le même canal, ce qui équivaut à transmettre un seul signal global [19].

Seulement, ces techniques de multiplexage doivent respecter la condition nécessaire de pouvoir restituer les données propres à chaque utilisateur après leur transmission sans créer d'interférences entre les données des différents utilisateurs. Parmi ces techniques traditionnelles de multiplexage, on cite le multiplexage temporel (*TDM : Time Division Multiplexing*) et le multiplexage fréquentiel (*FDM : Frequency Division Multiplexing*).

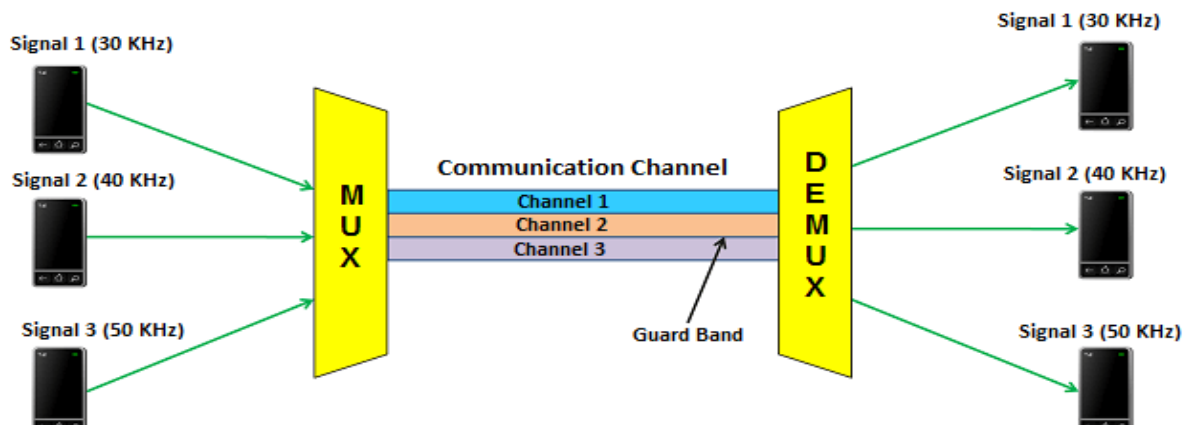
La figure II.1 présente les différentes techniques de multiplexage que l'on veut aborder.



**Figure II.1:** Les types de multiplexage.

### II.2.1 Multiplexage fréquentielle (FDM)

Le multiplexage par répartition en fréquence est une technique analogique. C'est la technique de multiplexage la plus répandue. Nous utilisons largement cette technique dans la transmission TV et radio [20]. Ce multiplexage nous permet l'envoi des signaux dans une plage de fréquences allouée avec un écart de fréquence entre deux signaux adjacents afin d'éviter le chevauchement. La probabilité de collision est faible car les signaux sont envoyés dans un temps imparti.



**Figure II.2:** Principe du multiplexage FDM [20].

### II.2.1.1 Avantages et inconvénients du FDM

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

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

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

### II.2.1.2 Applications du multiplexage par répartition en fréquence (FDM)

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

### II.2.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Le multiplexage en longueur d'onde (*Wavelength Division Multiplexing: WDM*) est une technique analogique dans laquelle plusieurs signaux optiques (lumière laser) de différentes longueurs d'onde ou couleurs sont combinés en un seul signal et sont transmis sur le canal de communication. C'est la méthode la plus importante et la plus populaire pour augmenter la capacité d'un réseau.

Avec le système WDM, Les signaux ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ) sont combinés par un multiplexeur et ensuite introduits dans une fibre optique, cela signifie que chaque canal a sa propre bande passante dédiée et que tous les signaux arrivent en même temps. Ensuite, les canaux combinés sont séparés dans l'unité de réception par un démultiplexeur et détectés par un photo-détecteur.

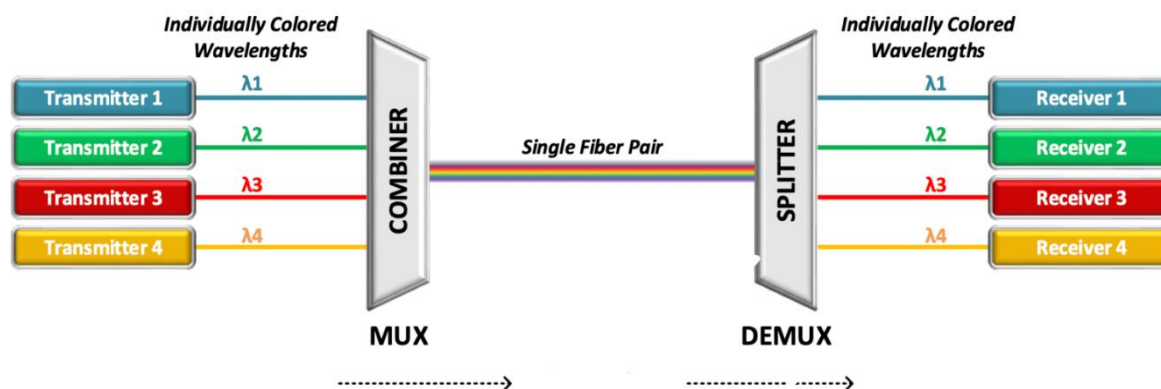


Figure II.3: Principe du multiplexage WDM [20].

## Chapitre II : Techniques de multiplexage et modulation optique

---

Le fonctionnement du multiplexage par répartition en longueur d'onde est similaire au multiplexage par répartition en fréquence. La seule différence réside dans le fait que les signaux optiques de multiplexage par répartition en longueur d'onde sont utilisés à la place des signaux électriques. Dans le multiplexage par répartition en longueur d'onde, les signaux optiques sont transmis via des câbles à fibres optiques.

### II.2.2.1 Avantages et inconvénients du WDM

Parmi les avantages de cette technique nous citons :

- répond aux besoins de débits et de taux de partage dans le réseau d'accès.
- permet de supporter différents types de clients notamment le FTTx (*Fiber To The Home, Building, Cube, ...x*), xDSL, Wireless, Ethernet, ...etc.

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

On rencontre deux principales variantes du WDM : le DWDM (Dense Wavelength –Division Multiplexing) et le CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing).

### II.2.3 Multiplexage CWDM (*Coarse-WDM*)

Le Coarse WDM utilise des longueurs d'ondes multiples espacées de 20 nm. L'ITU (International Télécommunication Union) spécifie 18 longueurs d'ondes CWDM allant de 1271 nm à 1611 nm [21]. Les émetteurs, les multiplexeurs optiques et démultiplexeurs sont définis à ces longueurs d'ondes. Ils ne nécessitent pas un contrôle étroit en longueur d'onde, ce qui explique leur coût moins élevé par rapport aux équipements DWDM

#### II.2.3.1 Avantages et inconvénients du CWDM

Parmi les avantages de cette technique nous citons :

- coût réduit des composants notamment les amplificateurs, les lasers, ...etc.
- consommation moins d'énergie parce qu'il utilise des lasers à faible coût.
- Utilisé dans les réseaux locaux (LAN), les réseaux d'entreprise et métropolitains (MAN).

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

- Nombre de canaux limité.
- Utilisation pour les courtes distances.
- Domaine d'application de ce système n'est pas aussi vaste.



## Chapitre II : Techniques de multiplexage et modulation optique

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

### II.2.4 Multiplexage DWDM (*Dense-WDM*)

Le dense WDM utilise plusieurs longueurs d'ondes faiblement espacées comparées à la solution CWDM, et elles sont habituellement localisées dans la gamme de longueur d'onde située entre 1530 nm et 1565 nm. L'ITU spécifie le centre des longueurs d'ondes du DWDM.

Pratiquement, dans les déploiements de DWDM observés à ce jour, les fréquences sont espacées de 100 GHz (soit approximativement 0.8 nm), ce qui autorise 40 longueurs d'onde. Le DWDM requiert des émetteurs optiques, des multiplexeurs/démultiplexeurs qui ont un contrôle strict sur la température et donc sur la longueur d'onde. Les longueurs d'ondes peuvent être amplifiées pour compenser les pertes dues à la longue distance de transmission des fibres ou /et les pertes passives élevées (pertes du coupleur, du multiplexeur, etc....).

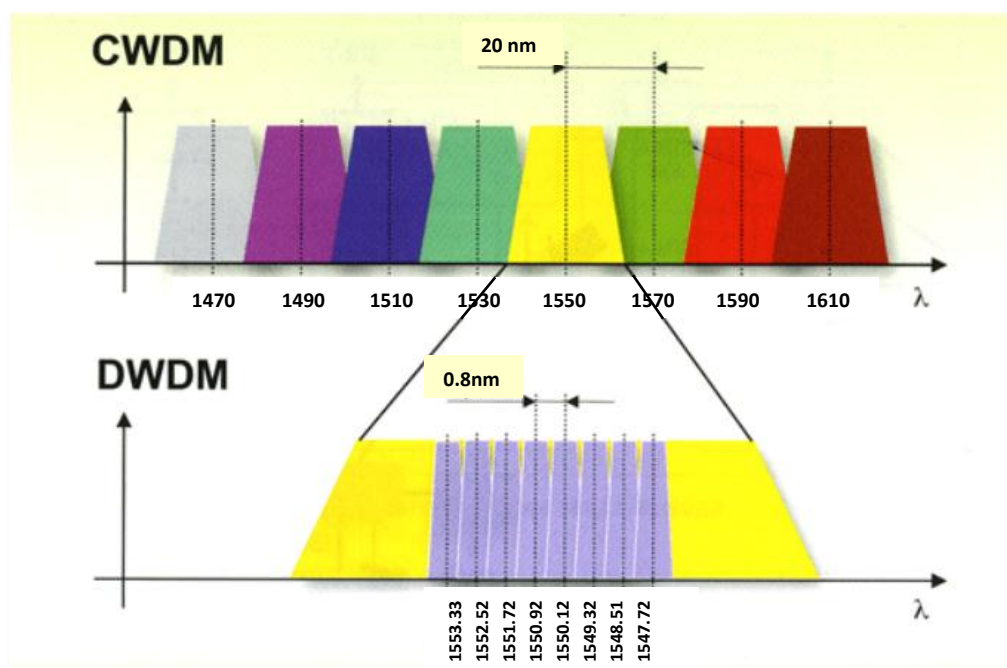


Figure II.4: plage longueurs d'ondes (CWDM et DWDM) [21].

### II.2.4.1 Avantages et inconvénients du DWDM

- la bande passante largement exploitée à cause du petit espacement entre les canaux (0.4, 0.2, 0.1 nm).
- circulation de plusieurs longueurs d'ondes jusqu'à atteindre 160 canaux.
- Minimise l'implantation des composants plus encombrants comme les répéteurs et les régénérateurs.

Cette technologie présente des inconvénients, entre autres :

- La diaphonie entre les canaux à cause des petits espacements.
- Les effets non-linéaires.
- Les longues distances qui exigent plusieurs amplificateurs optiques en ligne tel que l'EDFA qui coûte cher.
- La gestion de la dispersion, ...etc.

On trouve plusieurs applications de ce type de multiplexage notamment l'utilisation dans le domaine sous-marin (*longue distance*), les réseaux WAN ainsi que le réseau dorsal (*backbone*).

### II.2.5 Multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage temporel (TDM : *Time Division Multiplexing*) est une technique de multiplexage numérique dans laquelle plusieurs signaux sont combinés et transmis les uns après les autres sur le même canal de communication (*voix, données et vidéo*). L'avantage du système TDM est de combiner de nombreuses données optiques au bas débit dans le domaine temporel pour obtenir un débit associé plus élevé [22].

Cependant, les signaux fonctionnent avec la même fréquence à des moments différents (*c'est l'inverse avec le FDM*), c.à.d. dans le multiplexage FDM, le partage d'un canal se fait sur la base de la fréquence. Mais dans le multiplexage TDM, le partage d'un canal se fait sur la base du temps.

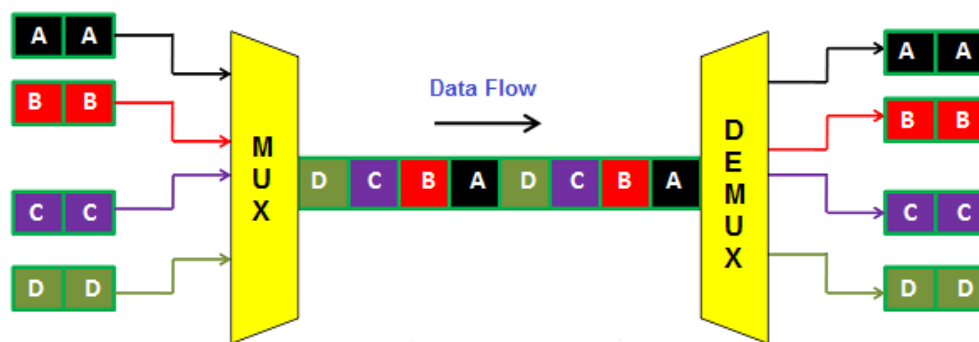


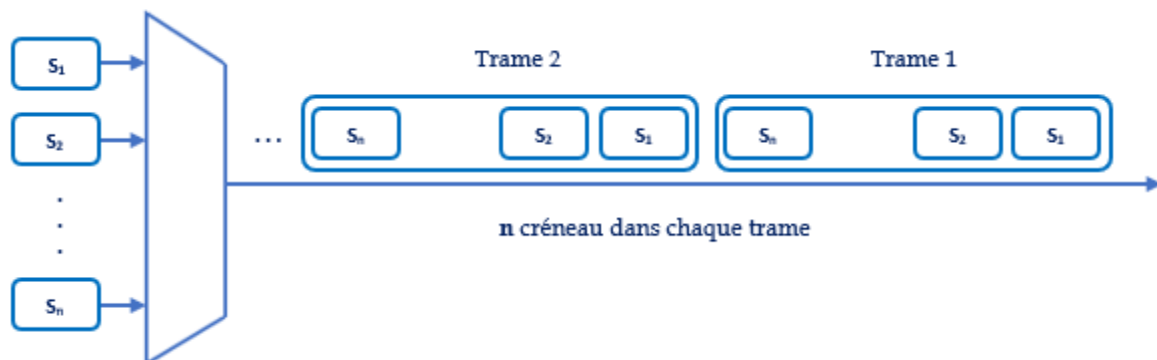
Figure II.5: multiplexage temporel (TDM) [22].

Côté récepteur, les signaux sont séparés et reçus. Chaque signal est reçu par un utilisateur à un moment différent. Au lieu de cela, ils sont transmis les uns après les autres. Par exemple, comme le montre la figure ci-dessus, dans un premier temps, nous envoyons le signal A. Puis après le deuxième signal B, puis après le troisième signal C et enfin, nous envoyons le dernier signal D. Ainsi, chaque utilisateur occupe une bande passante entière pendant une courte période de temps.

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

### II.2.5.1 Le multiplexage TDM synchrone

En TDM synchrone, la synchronisation signifie que le multiplexeur alloue exactement le même intervalle de temps à chaque émetteur à tout moment, Si l'émetteur n'a pas de données à envoyer alors son créneau horaire (time slot) reste vide. Comme le montre la figure ci-dessous, les différentes tranches de temps sont organisées en trames et chaque trame se compose d'une ou plusieurs tranches de temps dédiées à chaque (émetteur)



**Figure II.6:** principe du TDM synchrone [22].

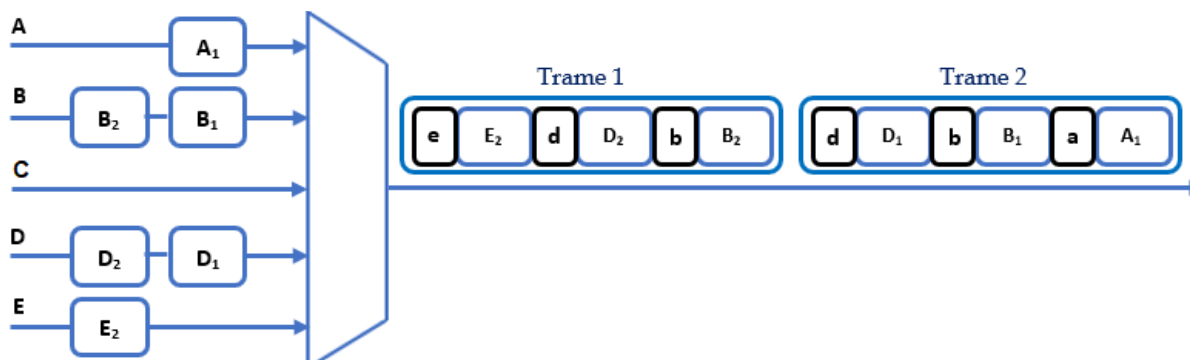
Par exemple, s'il y a 3 émetteurs, il y aura 3 emplacements dans chaque trame. De même, s'il y a 5 émetteurs, il y aura 5 emplacements dans chaque trame.

Le principal inconvénient du multiplexage temporel synchrone est que la capacité du canal n'est pas pleinement utilisée. Par conséquent, la bande passante est gaspillée.

### II.2.5.2 Le multiplexage TDM asynchrone (STDM)

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

La figure II.7, montre le principe du TDM asynchrone.



**Figure II.7:** Principe du TDM asynchrone [22].

### II.2.5.3 Avantages et inconvénients du TDM

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

- Plus flexible que le multiplexage par répartition en fréquence (FDM).
- Les circuits ne sont pas complexes.
- Pas de diaphonie.

Parmi les inconvénients du multiplexage temporel :

- La synchronisation est nécessaire dans ce multiplexage.

### II.2.5.4 Applications du TDM

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

- Réseau Téléphonique Public Commuté.
- Satellites.

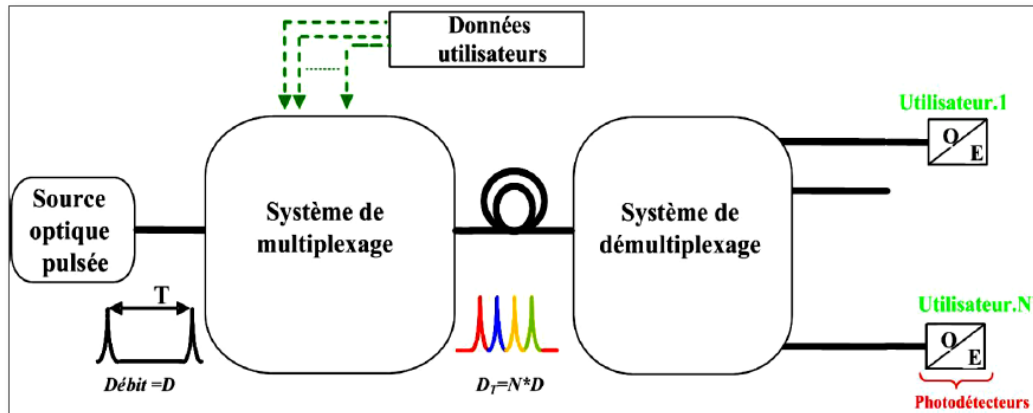
### II.2.6 Multiplexage optique par répartition en temps (OTDM)

Le multiplexage OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*) est une solution pour surmonter les effets non linéaires associés au système WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). C'est un outil robuste qui surmonte la limitation de la bande passante des composants électroniques et optoélectroniques et augmente le débit binaire du signal transmis.

L'avantage du système OTDM est de combiner de nombreuses données optiques au bas débit dans le domaine temporel pour obtenir un débit associé plus élevé ( $N \times B$ ), où  $N$  est le nombre de canaux [23].

Dans ce système, chacun des flux de données en bande de base reçoit une série d'intervalles de temps sur le canal multiplexé nommé aussi « time slots », un multiplexeur (MUX) est chargé d'assembler le train de bits à débit élevé de plusieurs flux en bande de base, tandis qu'un démultiplexeur (DEMUX) effectue le travail opposé pour reconstruire

une réplique de flux à un débit inférieur en séparant les bits du système OTDM, comme illustré dans la figure suivante :



**Figure II.8:** multiplexage OTDM [23].

Pour multiplexer un signal optique de période  $T$  ( $ps$ ) pour le canal  $N$ , le retard requis pour chaque trajet est :

$$\Delta t_i = i \times \frac{T}{N} (ps), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N - 1. \quad [24]$$

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

À la réception, un système de démultiplexage, restitue les données respectives des utilisateurs, en isolant temporellement les impulsions optiques, représentant les données de chaque utilisateur.

### II.2.6.1 Avantages et inconvénients de l'OTDM

Parmi les avantages de cette technique nous citons :

- possibilité d'intégration dans le système WDM.
- Bande passante flexible.
- Surmonte l'effet non linéaire associé au WDM.
- Le système est très simple à mettre en œuvre.

L'inconvénient majeur de ce multiplexage est la dispersion qui est liée à la distance de transmission des signaux OTDM.

### II.2.6.2 Applications de l'OTDM

Le système OTDM est utilisé généralement dans le réseau PON (*Passive Optical Network*).

En particulier dans le système hybride assemblé avec le système WDM (*OTDM/WDM*) afin de minimiser les effets non-linéaires.

## Chapitre II : Techniques de multiplexage et modulation optique

---

**Tableau II.1** : Récapitulatif des différents types de multiplexages.

| Type de multiplexage | Caractéristique  |
|----------------------|--|
| <b>TDM</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Multiplexage analogique et numérique.</li> <li>- Circuit plus simple.</li> <li>- Interférence faible ou négligeable.</li> <li>- Utilisé pour le RTPC (<i>Réseau Téléphonique Public Commuté</i>).</li> <li>- Chaque canal possède la totalité de la BP.</li> </ul>  |
| <b>OTDM</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Très simple à mettre en œuvre.</li> <li>- Bande passante flexible.</li> </ul> <p>Surmonte l'effet non linéaire associé au WDM. Utilisé dans les réseaux PON (Passive Optical Network).</p>  |
| <b>FDM</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Multiplexage analogique.</li> <li>- Plusieurs signaux sont transmis simultanément.</li> <li>- Besoin d'un canal à large bande passante.</li> <li>- Utilisé dans la radiodiffusion FM et AM.</li> </ul>  |
| <b>WDM</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Exploite la totalité de la bande passante.</li> <li>- Augmente la capacité du réseau.</li> <li>- Existence des interférences entre les canaux adjacents dues au petit espacement entre les canaux.</li> <li>- Supporte différents types de clients notamment le FTTx (Fiber To The Home, Building, Cube, ...x), xDSL, Wireless, Ethernet, SONET, ...etc.</li> </ul> |
| <b>CWDM</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Multiplexage analogique.</li> <li>- Fournit des hauts débits : 2,5 Gbps – 5 Gbps.</li> <li>- Couvre 18 canaux optiques (en pratique 8 canaux).</li> <li>- Utilisé dans les réseaux locaux (LAN), les réseaux d'entreprise et métropolitains (MAN).</li> </ul>   |
| <b>DWDM</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Multiplexage analogique.</li> <li>- Supporte jusqu'aux 160 longueurs d'ondes.</li> <li>- Problème de la gestion de la dispersion.</li> <li>- Utilisé dans le domaine sous-marin (longue distance).</li> </ul>   |

### II.3 Les différentes techniques de modulation optique

#### II.3.1 Principe de la modulation optique

La propagation d'information binaire « 0 » et « 1 » dans une fibre optique nécessite un code permettant de traduire ces signaux par une modulation adéquate d'un signal optique continu. Le code utilisé pour la traduction en optique des signaux binaires est appelé format de modulation.

La méthode de modulation la plus simple consiste à coder l'information de la manière suivante: (0)= pas de lumière transmise, ou à faible puissance et (1)= puissance plus forte. C'est le principe du codage en intensité, appelé OOK (pour On/Off Keying).

Une onde lumineuse se propageant dans une fibre optique subit des effets de propagation, comme nous l'avons vu précédemment (atténuation, dispersion, effets non-linéaires, ...). Les formats de modulation vont donc réagir à ces effets.

Les formats de modulation d'amplitude ont gagné du terrain sur les autres, pour le réseau d'accès, grâce à leur simplicité et leur coût réduit au niveau de l'émetteur et du récepteur [25]. De ce fait, les formats NRZ (Non Return To Zero), RZ (Return To Zero) se sont imposés comme les principaux formats de base de toutes les générations de systèmes WDM [26].

#### II.3.2 Codages en intensité (OOK)

##### II.3.2.1 Le format NRZ (Non Return-to-Zero)

C'est le format le plus simple qui existe, Pour le générer au moyen d'un modulateur Mach-Zehnder on utilise Un générateur de bit pour générer un message aléatoire où un message définit par l'utilisateur qui est ensuite codé en NRZ. Puis ce signal électrique sera injecté avec un signal optique obtenu par le laser dans un modulateur mach Zehnder. Un signal optique obtenu à la sortie du mach Zehnder donc le signal peut propager sur la fibre optique, comme le montre la figure II.9

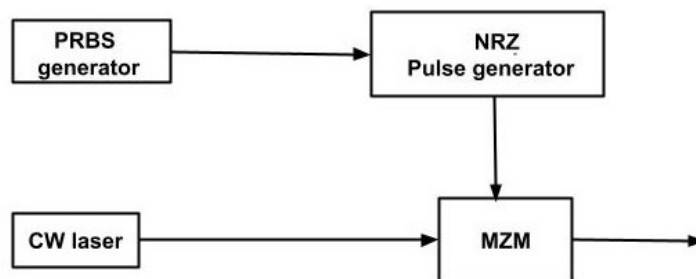
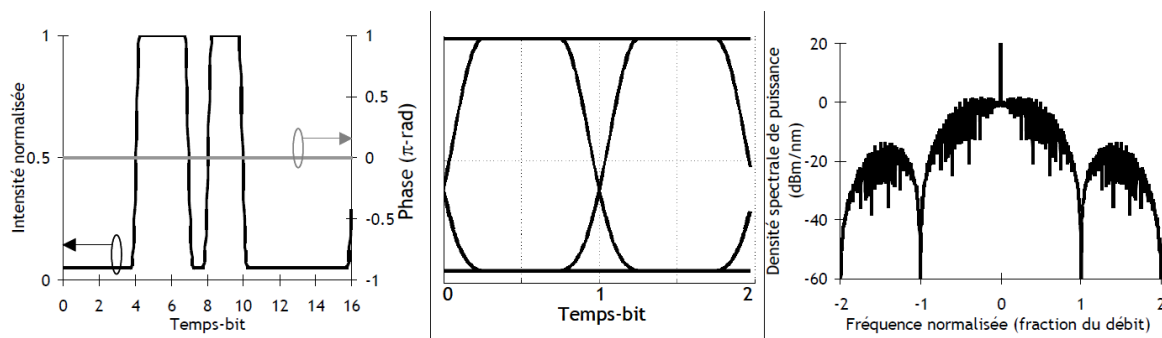


Figure II.9 : bloc diagramme du format de modulation NRZ [24].

Un signal optique modulé en NRZ est la copie du signal binaire électrique : un « 0 » est codé par un signal à faible puissance (idéalement nulle), et un « 1 » par un signal à forte puissance. La figure II.10 montre un exemple de trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format NRZ.

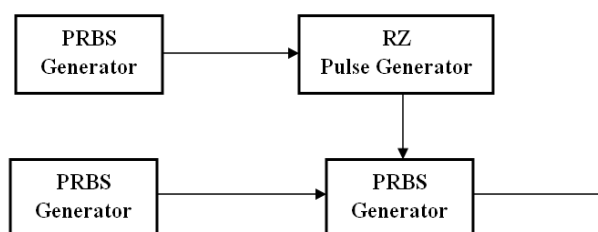


**Figure II.10 :** trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format NRZ [25].

Le spectre de ce format contient un lobe principal et des lobes secondaires deux fois plus étroits.

### II.3.2.2 Le format RZ (Return-to-Zero)

Le format RZ est un autre format dérivé du format NRZ la génération de ce signal est montrée dans la figure II.11. À chaque temps-bit, un retour à zéro systématique. Ainsi le symbole codant un « 0 » en RZ sera similaire à celui codant un « 0 » d'un format NRZ, c'est-à dire un signal à faible puissance, mais le symbole codant un « 1 » en RZ sera une impulsion lumineuse de durée totale 1 temps-bit. Ainsi, une succession de « 1 » sera codée, en RZ, par une succession d'impulsions.

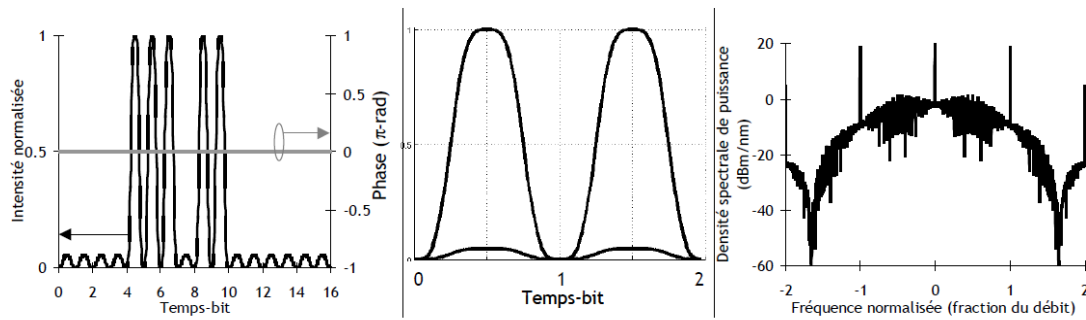


**Figure II.11 :** bloc diagramme du format de modulation RZ.

De plus, les différentes impulsions d'un signal RZ ont moins de chevauchements et à interférences entre elles, que les différents symboles d'un signal NRZ affectés par la même dispersion. Les performances du format RZ en termes de sensibilité et de tolérance aux effets non-linéaires s'en trouvent ainsi améliorées par rapport à celles du format NRZ [25].



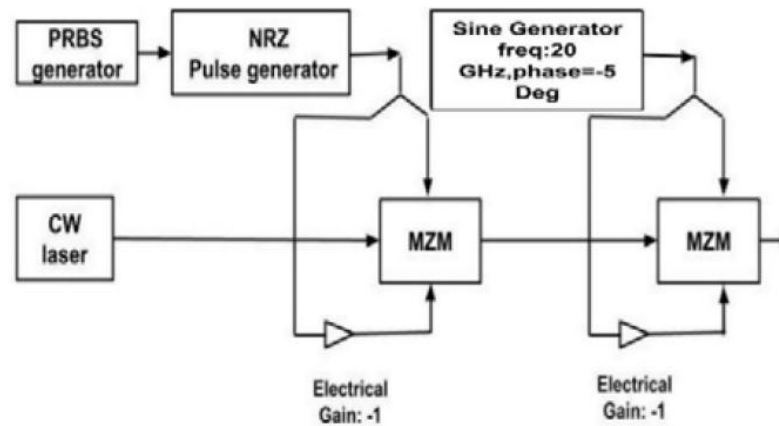
La Figure II.12 montre un exemple de trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format RZ.



**Figure II.12:** trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format RZ [25].  
Le lobe principal du spectre du format RZ est plus large que celui du spectre NRZ.

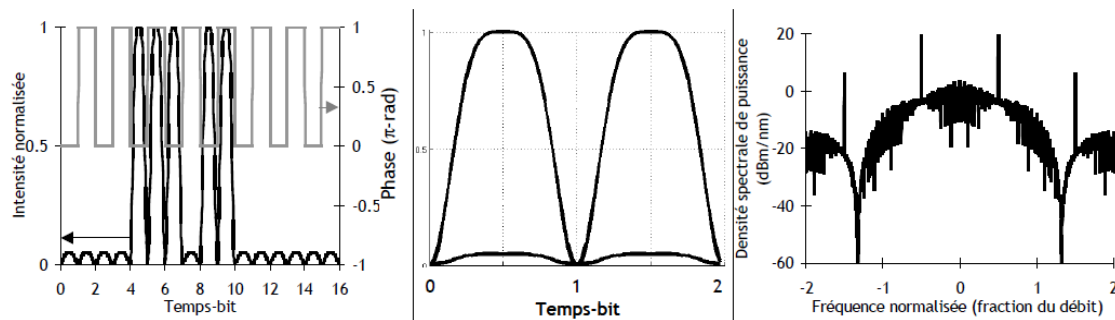
### II.3.2.3 Le format CSRZ (Carrier Suppressed Return-to-Zero)

Le format CSRZ est une variante du format RZ, la fréquence est égale à la moitié de la fréquence d'information, le schéma du format CSRZ continu. Les mêmes éléments qui sont mis dans la modulation NRZ ainsi qu'un générateur de sinus, Comme le montre la figure II.13.



**Figure II.13 :** bloc diagramme du format de modulation CSRZ.

Le format CSRZ ainsi généré à un spectre plus étroit il est destiné à réduire les dégradations non linéaires de l'optique canal.



**Figure II.14:** la trace temporelle en amplitude et en phase, le diagramme de l'œil et le spectre du format CSRZ [25].

### II.3.3 Codages duo-binaires

Dans les formats duo-binaires, l'information est détectée en intensité au moyen d'un récepteur OOK conventionnel, mais la phase intervient également dans la modulation du signal, en changeant, par exemple, à chaque fois qu'un symbole « 0 » est codé. Un symbole « 1 » peut ainsi présenter une phase de 0 ou de  $\pi$ . Ce codage mixte amplitude-phase a pour principal intérêt de diminuer la largeur spectrale du signal.

#### II.3.3.1 Le format duo-binaire (DB)

Pour générer le format duo-binaire on crée d'abord un signal duo-binaire NRZ à l'aide d'un pré-codeur et d'un générateur d'impulsions duo-binaire. Le générateur pilote le premier MZM, puis concatène ce modulateur avec un deuxième modulateur qui est piloté par un signal électrique sinusoïdal à la fréquence de 10 GHz.

Le pré-codeur duo-binaire utilisé ici était composé d'une porte OU exclusif avec un chemin de retard. Comme le montre la figure II.15.

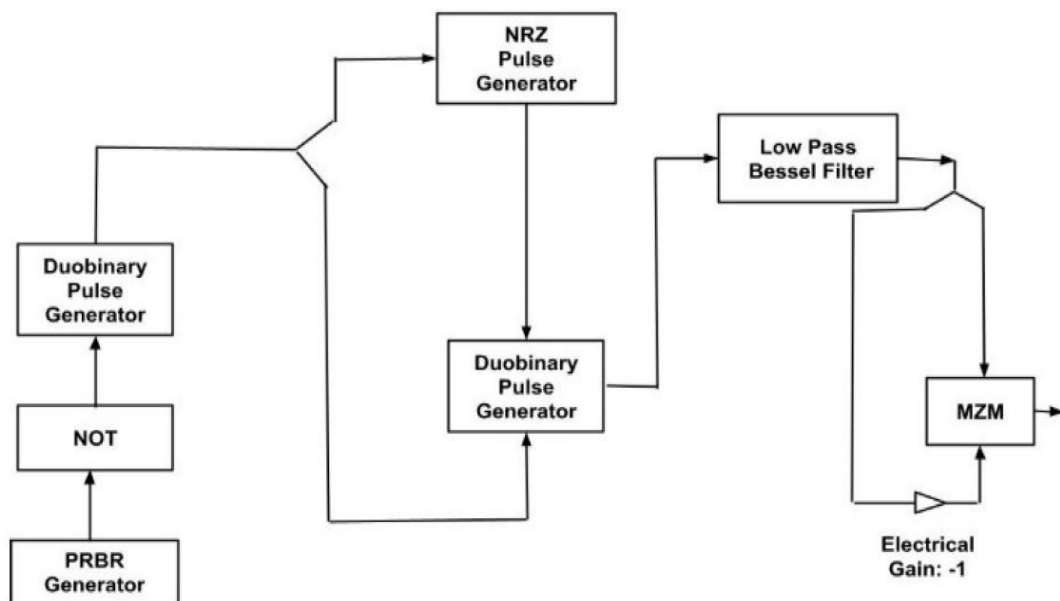


Figure II.15 : bloc diagramme du format de modulation DB.

#### II.3.3.2. Le format duo-binaire (MODB)

Pour générer le format duo-binaire on crée d'abord un signal duo-binaire NRZ à l'aide d'un circuit de retard et de soustraction qui pilote le premier MZM, puis en concaténant ce modulateur avec un deuxième modulateur qui est piloté par un signal électrique sinusoïdal avec la fréquence de 2.5GHz.

## Chapitre II : Techniques de multiplexage et modulation optique

Le pré-codeur duo-binaire utilisé ici était composé d'une porte OU exclusif avec un chemin de retard. . Comme le montre la figure II.16.

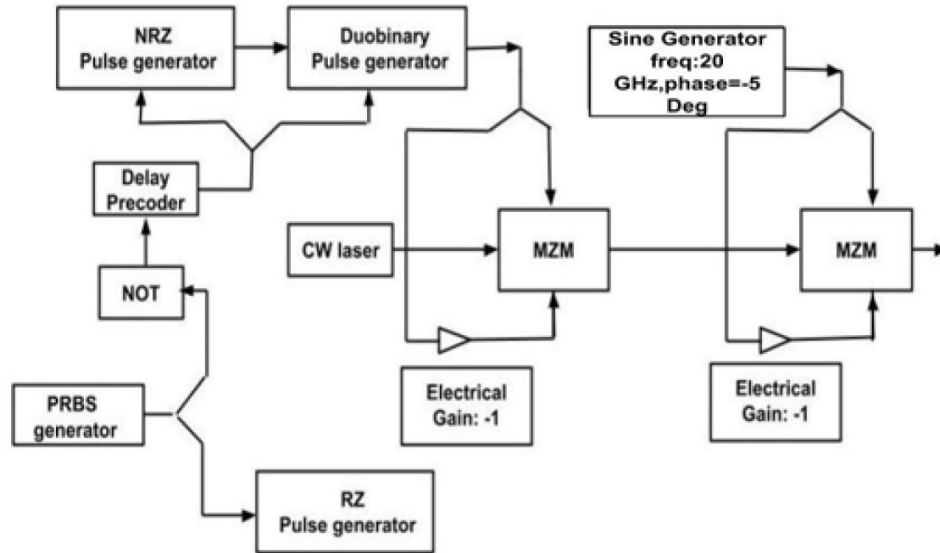


Figure II.16 : bloc diagramme du format de modulation MODB.

### II.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a introduit les techniques faites avant l'émission d'information via la fibre optique. En premier lieu, on a abordé les différentes techniques de multiplexage, les principaux techniques utilisé sont le multiplexage temporel (*TDM*) et en longueur d'onde (*WDM*) employés dans les transmissions optique et le multiplexage (*FDM*) qui est utilisé dans la radiodiffusion FM et AM, puis, en deuxième lieu, on a fait un récapitulatif des types de multiplexage cités.

Enfin, on a abordé les formats de modulation avec lequel nous avons effectués nos simulations.

# ***Chapitre III***

---

***Les réseaux PON et Les  
Réseaux FTTH***

### III.1 Introduction

Un réseau optique passif (PON) est un réseau qui fournit une variété de services à large bande aux utilisateurs utilisant un accès par fibre optique. Un réseau PON permet la suppression de tous les composants actifs du réseau entre le serveur et le client. En raison de l'utilisation de composants inefficaces dans le réseau, cela entraîne un faible coût et est donc très approprié et adapté pour une utilisation dans les réseaux FTTH.

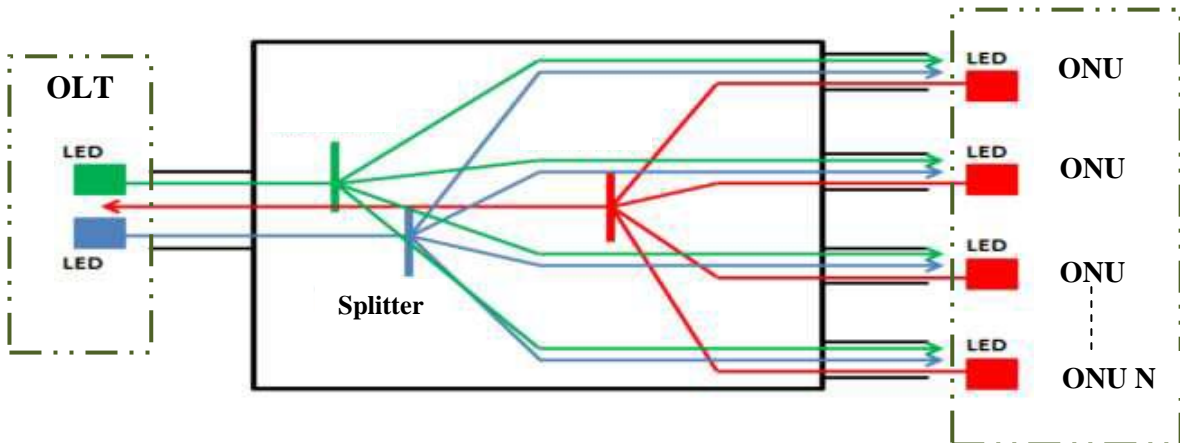
En passant du central à l'utilisateur final, on peut dire que le réseau PON se compose d'un terminal de ligne optique (OLT) situé dans le bureau central du fournisseur de services, d'unités de réseau optique, d'ONU à proximité de l'utilisateur final ainsi que d'un splitter. L'une des choses les plus importantes à laquelle il faut prêter attention est que le réseau fonctionne avec deux canaux (deux liens), le premier dans le sens de l'OLT à l'ONU et appelé la liaison descendante, et l'autre dans le sens de l'ONU à l'OLT. C'est ce qu'on appelle la liaison montante. Les deux canaux fonctionnent en même temps de manière symétrique ou asymétrique sur la même fibre optique, des longueurs d'onde différentes sont donc attribuées à chaque lien.

### III.2 Les réseaux optiques passifs (PON)

Le réseau optique passif (PON) est apparu depuis 25 ans. C'est un réseau qui transporte des données dans le domaine optique entre l'OLT et l'ONU où le chemin de transport du signal optique est passif. Afin de permettre une bonne compréhension du réseau d'accès [26]. Ci-dessous, nous définissons quelques terminologies pour le réseau PON qui seront utilisées par la suite :

- ❖ **OLT (Optical Line Terminal)** : C'est un équipement de terminaison situé au bureau central (*Central Office : CO*) qui assure l'interface avec la fibre optique et qui gère les flux de trafic vers les abonnés ou en provenant de ceux-ci. L'OLT est le point d'extrémité en amont du réseau d'accès.
- ❖ **ONU (Optical Network Unit)** : C'est un équipement optique situé chez les abonnés qui assure la fonction d'émission/réception des signaux optiques vers l'OLT situé dans le réseau où la fibre ne pénètre pas jusque chez les abonnés.
- ❖ **Splitter** : Ce sont des diviseurs de puissance passifs qui permettent la communication entre l'OLT et les ONU qui les desservent et ont une seule entrée et plusieurs sorties. Le séparateur divise le signal entrant à l'entrée (le signal de liaison descendante) et le divise par les multiples sorties.

La figure ci-dessous montre ses composants.



**Figure III.1** : Quelques composants dans le réseau PON.

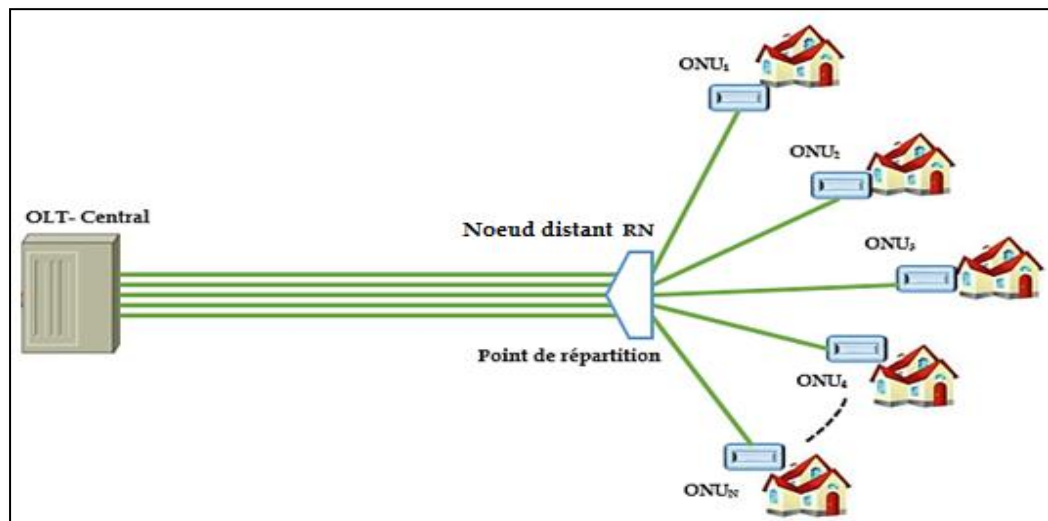
Nous décrivons dans cette section, les différentes architectures du réseau PON.

On distingue trois architectures fréquemment utilisées dans le réseau d'accès, il s'agit de :

- L'architecture point à point (P2P).
- L'architecture point à multipoint active (P2M).
- L'architecture point à multipoint passive (P2M-PON).

### III.2.1 Architecture point-à-point (P2P)

L'architecture point à point est une technique qui permet de raccorder abonnés (*c.à.d.*  $N$  ONU) avec fibres optiques reliant le central OLT. Chaque abonné est dédié d'une fibre optique provenant du central. Cette architecture est appelée aussi « *home run* » [24].



**Figure III.2** : Architecture point à point d'un réseau d'accès optique [26].

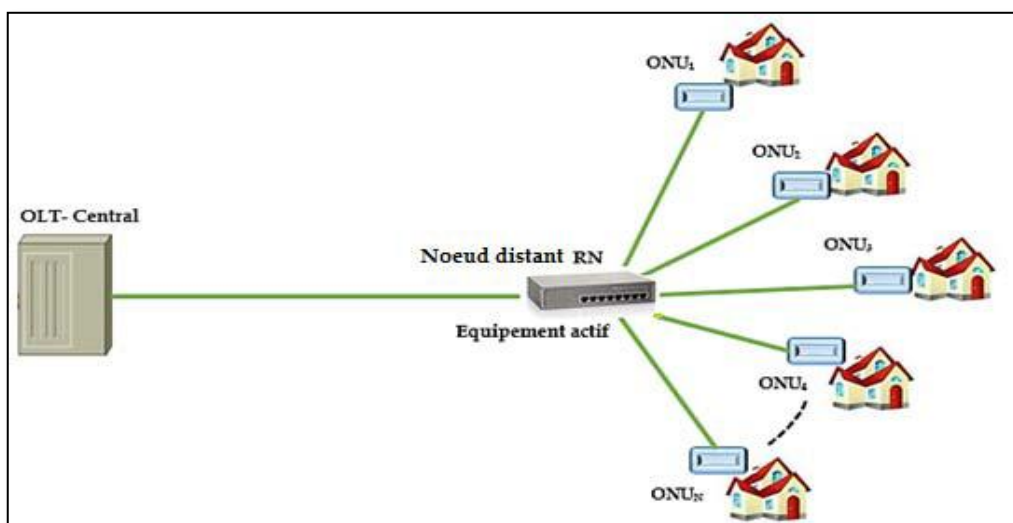
L'avantage de cette architecture est la possibilité de monter le débit et aussi d'éviter la complexité liée aux techniques de multiplexage (*en temps ou en longueur d'onde*).

Dans ce type de réseau, il n'y a pas de partage des ressources matérielles en termes de fibres et d'émetteurs-récepteurs à l'OLT, elle assure une meilleure sécurité de données car la communication entre chaque abonné avec l'OLT est indépendante d'un utilisateur à un autre. L'inconvénient de cette architecture est qu'elle demande un très grand nombre de fibres optiques et d'émetteurs-récepteurs optiques au niveau de l'OLT, ce qui engendre un coût très important.

### III.2.2 Architecture point à multipoint active (P2M)

L'architecture point à multipoint active est une technique qui dépend d'un équipement Ethernet actif situé au RN (*Remote Node*) qui permet l'association des trafics provenant de plusieurs abonnés. La fibre optique entre le point de répartition RN et l'OLT est mutualisée entre plusieurs abonnés (*voir figure III.3*).

L'utilisation de cette architecture point à multipoint active est intéressante en raison de la bande passante disponible et de la portée qui peuvent être augmentées. Les interfaces Ethernet qui sont déjà standardisées permettent un grand choix des équipements [26].



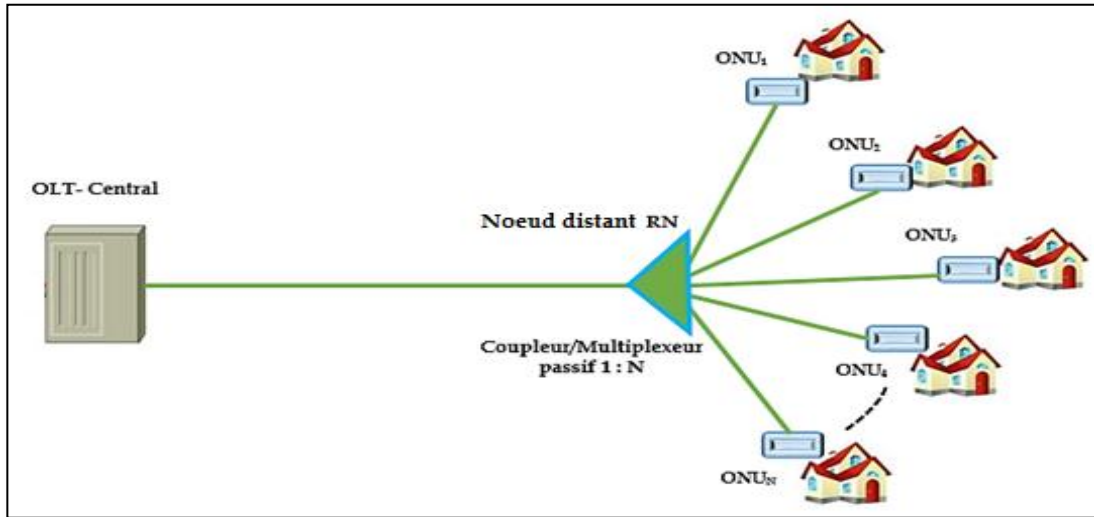
**Figure III.3** : Architecture point à multipoint actif d'un réseau d'accès optique [26].

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

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

Dans cette architecture, la fibre optique entre l'OLT et le point de répartition RN est mutualisée entre plusieurs abonnés dont le partage se fait par des techniques de

multiplexage optique (*en temps, en longueur d'onde, ou encodage, ... etc.*) ou bien des coupleurs optiques de à 1 N (1 : N), celles-ci donnent le nom passif à cette architecture [27].



**Figure III.4 :** Architecture point à multipoint passif (P2M-PON) d'un réseau d'accès optique [26].

Parmi les avantages de cette architecture, cette dernière est moins coûteuse du point de vue matériels par rapport à l'architecture active. Elle évite toutes les complexités liées au fonctionnement d'un équipement actif dans le réseau d'accès. L'inconvénient de l'architecture PON est la complexité des techniques de multiplexage (en temps, en longueurs d'onde, en code ...etc.) ainsi que l'atténuation et la perte qui sont produites par des composants optiques passifs, et qui limitent donc la portée du réseau.

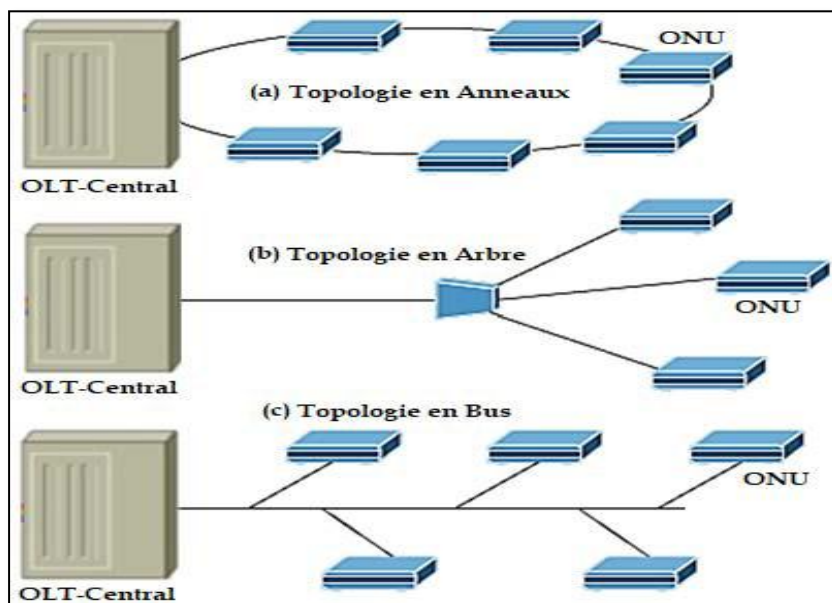
### III.3 Différentes topologies du réseau PON

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

L'inconvénient de cette dernière est que si une station ONU tombe en panne, le réseau est complètement coupé (voir la figure III.5). Donc la solution est de mettre un réseau à double anneau. Dans la topologie en bus, toutes les stations sont reliées à un support commun.



L'inconvénient majeur de cette topologie c'est le problème de partage du support physique (Fibre optique) [28].



**Figure III.5** : Les topologies d'un réseau PON [28].

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

### III.4 Les réseaux FTTH (fibre to the X)

La famille de réseaux FTTH peut être définie comme des réseaux à fibre optique à large bande qui ont la capacité de transmettre des données à des vitesses de transmission élevées vers un point très proche de l'utilisateur final. La famille FTTH comprend un groupe de technologies adoptées dans la transmission de signaux numériques sur fibres optiques, et les technologies diffèrent entre elles en fonction du degré de proximité des fibres optiques avec l'utilisateur final, ce qui entraîne un coût différent pour réaliser ces systèmes.

Les réseaux FTTX peuvent être classés en [28 - 29] :

- **FTTB (Fiber To The Building (Fibre jusqu'à bâtiment)) :**

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

- **FTTN (Fiber To the Node/Neighborhood (Fibre jusqu'à répartiteur/quartier))**

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

- **FTTC (Fiber To The Curb (Fibre jusqu'au trottoir)) :**

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

- **FTTP (Fiber To The Premises (Fibre jusqu'aux locaux)) :**

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

- **FTTO (Fiber To The Office (Fibre jusqu'à bureau)) :**

Très similaire au réseau FTTB, le chemin optique parcourt tout le chemin entre le central téléphonique et l'utilisateur.

- **FTTH (Fibre To The Home (Fibre jusqu'à domicile)):**

En 2010, les réseaux FTTH existent déjà en milieu urbain en Asie du Sud-est et aux États-Unis, ainsi que dans quelques agglomérations européennes. En Algérie le FTTH est lancé officiellement 01 janvier 2018 par l'entreprise Algérie Télécom. L'augmentation rapide du nombre d'utilisateurs d'internet a ouvert la porte à la technologie de la fibre optique en termes de ce que l'on appelle le réseau de distribution. Le FTTH ainsi que FTTN, FTTB, FTTC...Etc. consiste à amener la fibre optique au plus près du client afin de disposer d'un grand débit et des nouveaux services comme la vidéo à la demande, la télévision à haute définition et de nombreux autres services exigeant le haut débit.

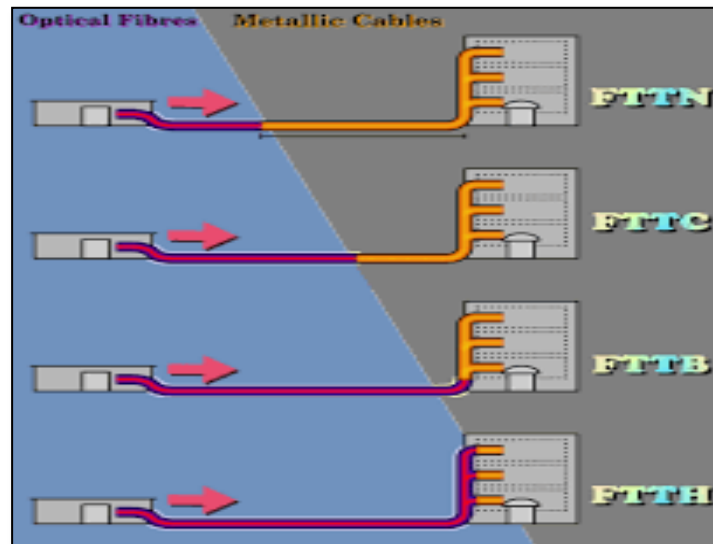
Les récents développements de la technologie de la fibre optique ont considérablement réduit les coûts et rendu la technologie de la fibre optique plus attrayante pour les opérateurs.

- **Principe de FTTH**

Est de relier directement le client particulier (maison de foyer) aux infrastructures de l'opérateur par une fibre optique partagée ou dédiée au client.

Il utilise la technologie GPON (Gigabit-PON). Cette technologie offre de très haut débits, supérieurs à ceux de l'ADSL, permettant ainsi l'élimination de la saturation de la connexion en heures de pointe.

L'inconvénient de cette technique est que le développement de celle-ci est extrêmement coûteux et nécessite énormément de travaux de génie civil, surtout dans les zones rurales et éparses [30].



**Figure III.6 :** Comparaison entre FTTH et autres technologies.

- **Architecture de réseau FTTH**

L'architecture de ce réseau se propose de déployer la fibre de bout en bout du réseau, jusqu'au domicile même de l'utilisateur final.

Elle ne fait appel à aucune autre technologie intermédiaire. C'est la technologie la plus intéressante en termes de débit pour l'abonné (pas de partage) et de sécurité de transfert (les données des différents utilisateurs sont séparées), mais la plus onéreuse en termes de coût de déploiement pour l'opérateur [31].

La figure suivante montre les différents types de réseau FTTx.

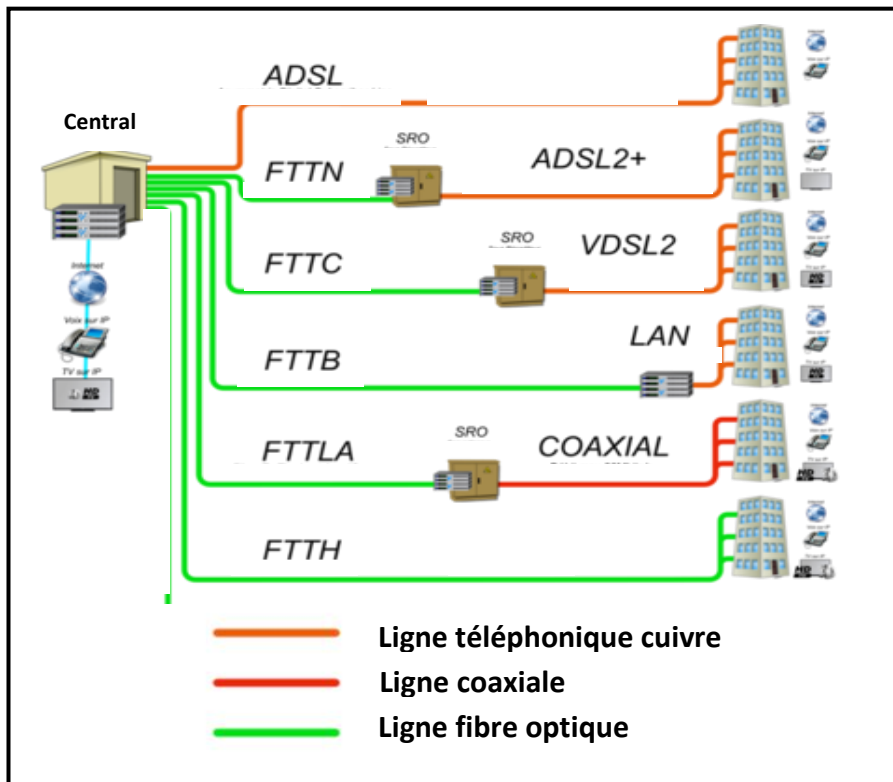


Figure III.7 : Les différents types de réseau FTTx [31].

### III.5 Technologies des réseaux PON

Les réseaux PON peuvent être classés selon la méthode de multiplexage des données en :WDM (Wavelength Division Multiplexing).

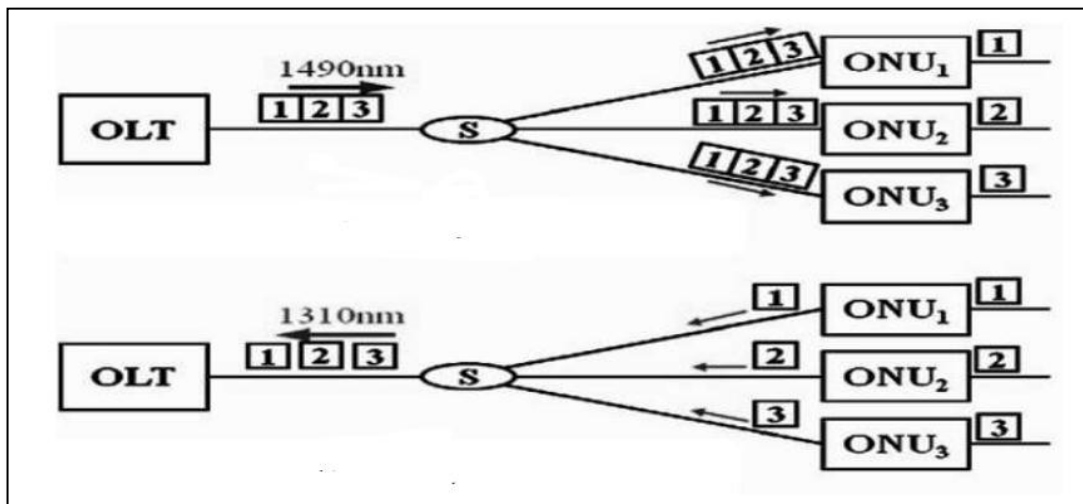
- TDM (Time Division Multiplexing).
- TWDM (Time and Wavelength Division Multiplexing).

Parmi ces classes, TDM est la technologie de multiplexage utilisée dans toutes les normes de réseau PON publiées à ce jour. Bien qu'il existe de nombreuses études et préoccupations concernant d'autres réseaux en tant que bonnes technologies pour les futures générations de réseaux PON, ce qui suit est une explication des technologies précédentes et des forces et faiblesses de chacune [32].

#### III.5.1 TDM-PON

Le TDM-PON est une technique du multiplexage temporel synchrone intégrée dans les réseaux optiques passifs (PON). Pour la transmission des données et des voix, il utilise une longueur d'onde de 1310 nm en amont (upstream) c.à.d. de l'ONU vers les OLT et une longueur de 1490 nm en aval (downstream) c.à.d. de l'OLT vers les ONU, dans une fibre optique bidirectionnelle ou en mode duplex.

TDM-PON collecte des informations vers et depuis plusieurs ONU en combinant des signaux selon la technologie TDM, et la paire de longueurs d'onde utilisées pour la transmission et la réception est unique. TDM partage le temps alloué pour transmettre des informations d'une source avec d'autres sources d'informations. La combinaison est décrite comme un commutateur rotatif qui tourne très rapidement afin que chaque information soit transmise au canal de communication pendant une période de temps spécifiée, ce processus est inversé au niveau du récepteur à l'aide d'un démultiplexeur. Une fois toutes les ressources partagées connectées à la compilation, le processus est redémarré, et le cycle complet de l'assembleur est défini par la trame, dont le début et la fin doivent être définie pour les synchronisations d'entrée et sortie



**Figure III.8 :** Le principe de fonctionnement du TDM PON [24].

La quantité d'informations transmises à l'aide de cette technique est déterminée en multipliant le débit de transmission d'un seul canal par le nombre de canaux utilisés, qui ne doit pas dépasser la capacité du canal (fibre optique) utilisé pour la transmission.

Les fournisseurs de services ont généralement tendance à utiliser TDM-PON car il est peu coûteux en termes de maintenance et très fiable. Cependant, la bande passante fournie est partagée par toutes les unités ONU connectées au réseau. Des réseaux optiques passifs avec TDM-PON ont été proposés pour augmenter la capacité de liaison descendante dans XG-PON1 de 10 Gbps à 40 Gbps, mais pour atteindre cette vitesse, il est nécessaire de développer le terminal de ligne optique (OLT) avec des électroniques pour transférer des données à très haut débit.

## Chapitre III : Les réseaux PON et les réseaux FTTH

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

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

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

### III.5.1.1 APON (ATM-PON)

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

La figure III.9, montre le principe de fonctionnement du BPON (Broadband PON) basé sur l'ATM [33].

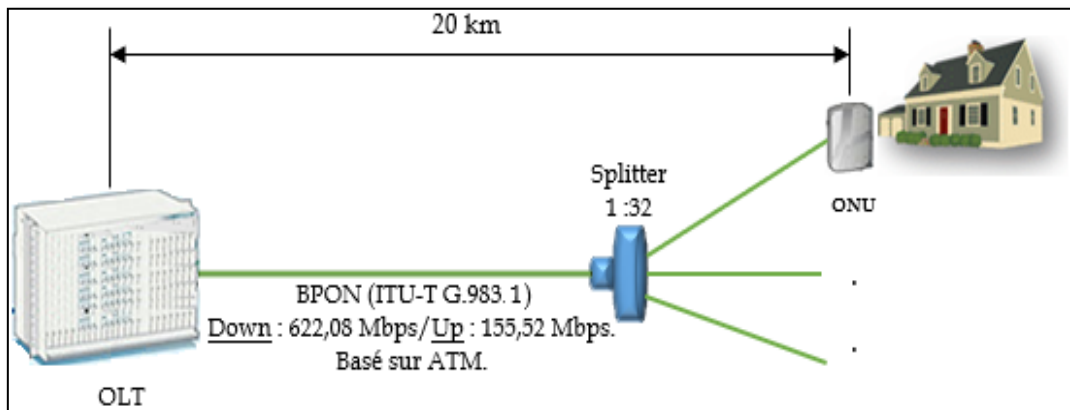


Figure III.9 : Le principe du BPON [26].

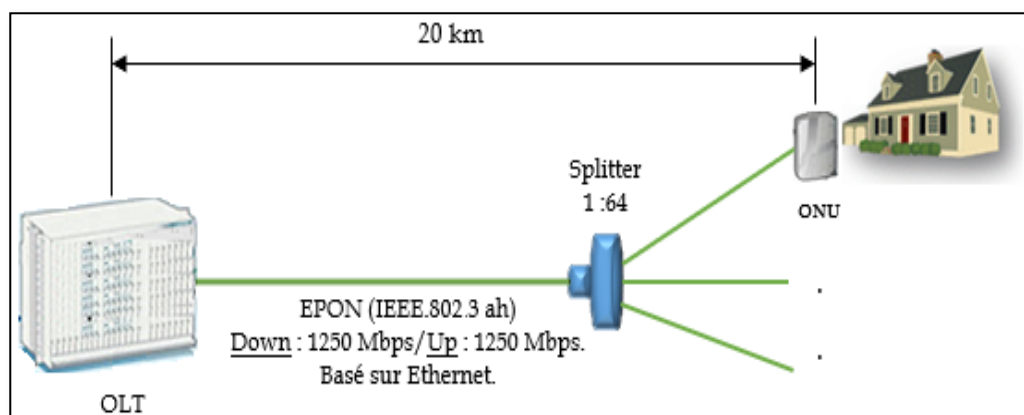
### III.5.1.2 EPON (Ethernet PON)

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

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

Il utilise une longueur d'onde en aval (downstream) de 1490 nm et en amont (upstream) de 1310 nm pour transmettre les données. Pour la distribution de la télévision (uniquement dans le sens aval), une longueur d'onde de 1550 nm est utilisée. Il est constitué d'un OLT, un ONU et un splitter (Séparateur) de 1:64 au maximum c.à.d. il peut atteindre au max 64 ONUs [34].

La figure III.10, montre le principe de fonctionnement de l'EPON (Ethernet PON) basé sur l'Ethernet.



**Figure III.10** : Le principe de l'EPON [34].

### III.5.1.3 GPON (Gigabit PON)

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

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

Le GPON pratique généralement le multiplexage en longueur d'onde (WDM), il est constitué d'un OLT, un ONU et un splitter (Séparateur) de 1:128 au maximum c.à.d. il peut atteindre au max 128 ONUs. Il pratique le protocole TDMA (Time Division Multiple Access) dans le sens amont (upstream) de l'ONU vers l'OLT afin d'éviter ce qu'on appelle « les collisions entre les transmissions » [35].

La figure III.11, montre le principe de fonctionnement du GPON basé sur l'Ethernet et/ou le TDM.

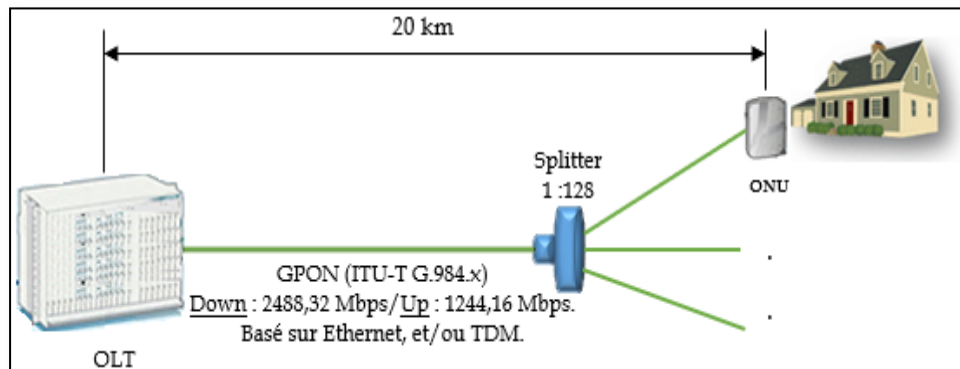


Figure III.11 : Le principe du GPON [24].

### III.5.1.3.1 Avantages du G-PON

- La structure est passive car elle est à base de coupleurs optiques.
- Le génie civil est optimisé et le coût réduit.
- Infrastructure partiellement partagée (économie sur la fibre).
- L'OLT est partagé (un duplexeur au central pour 32 clients).
- L'architecture est favorable à la diffusion [36].

### III.5.1.3.2 Inconvénients du G-PON

- Le budget optique est limité par le coupleur dont les pertes sont proportionnelles au nombre de ports.
- Le débit étant partagé, il est donc limité.
- La synchronisation est complexe pour le sens montant.
- La sécurité des données en réception n'est pas optimale car l'ensemble des utilisateurs reçoit l'ensemble du flux émis par le central.
- L'ONU doit fonctionner au débit agrégé (2,5 Gbit/s par exemple), qui est très supérieur au débit utile [36].



### III.5.2 WDM PON

Le WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network) est un type de multiplexage optique utilisé dans les réseaux d'accès optiques. Il offre une bande passante plus élevée, il s'agit d'une solution prétendant pour les systèmes PON de prochaine génération en concurrence avec les systèmes 10 G-EPON et XG-PON.

L'architecture WDM-PON présente divers avantages par rapport aux systèmes traditionnels TDM-PON. Tout d'abord, le WDM-PON permet à chaque utilisateur d'être dédié avec une ou plusieurs longueurs d'onde, permettant à chaque abonné d'accéder à toute la bande passante adaptée aux longueurs d'ondes.

Cette architecture offre généralement une sécurité et une évolutivité accrues car chaque abonné ne reçoit que sa propre longueur d'onde [37].

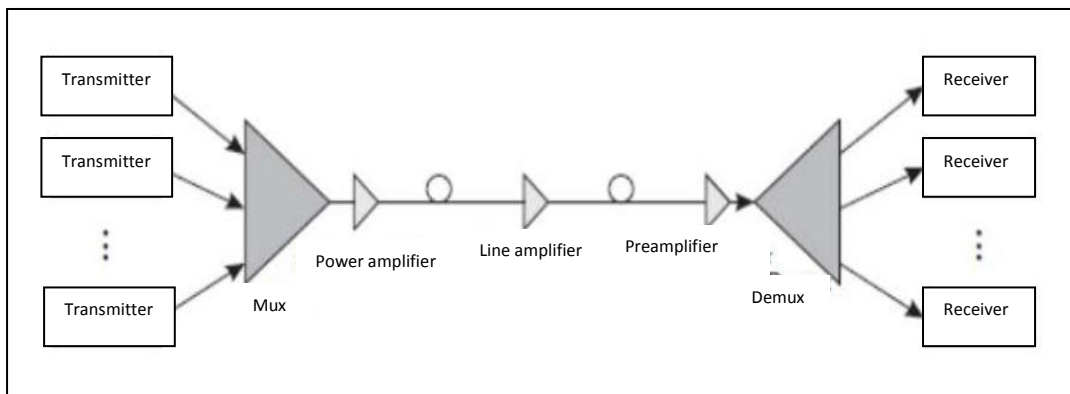


Figure III.12 : Composants de base d'un WDM [37].

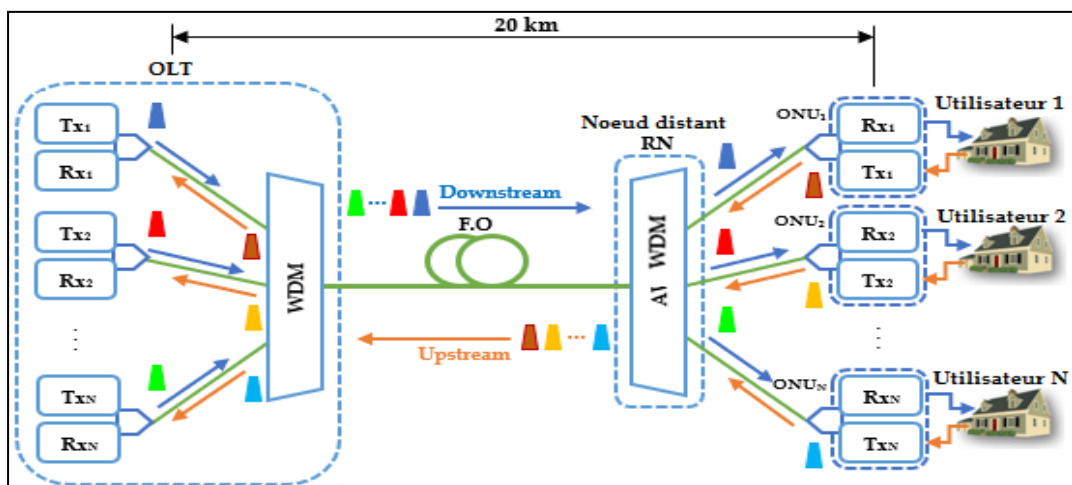


Figure III.13 : Architecture typique du WDM PON [24].

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

Le WDM-PON est utilisé pour les réseaux FTTC, FTTB et les FTTH afin de fournir différents services de type vidéo, voix ou données. Il répond aux besoins en bande passante pour les réseaux mobiles 3G et 4G. Ce type de multiplexage est capable de prendre en charge l'extension de la portée pour les réseaux EPON existants.

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

### III.6 Les techniques du multiplexage hybride

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

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

#### III.6.1 Le système hybride TWDM-PON

Les réseaux optiques passifs TWDM-PON reposent sur la combinaison des caractéristiques de TDM-PON et de WDM-PON, offrant un débit de transmission de données élevé de 40 Gbps et une distance d'au moins 40 km sans aucune modification sur les deux terminaux de ligne optique OLT ou ONU.

La figure III.14 montre l'architecture principale du réseau TWDM-PON, de sorte que la conception se compose essentiellement composé de quatre paires de longueurs d'onde différentes (liaison montante et descendante) et les quatre longueurs d'onde sont combinées à l'aide d'un multiplexeur WDM, puis les données sont distribuées selon TDM en utilisant un SPLITTER pour atteindre un nombre spécifié d'ONU [37].

La structure illustrée à la figure III.14 montre qu'il y a 64 ONU, avec chacune 16 ONU affectées à une paire de longueurs d'onde de liaison montante et de liaison descendante.

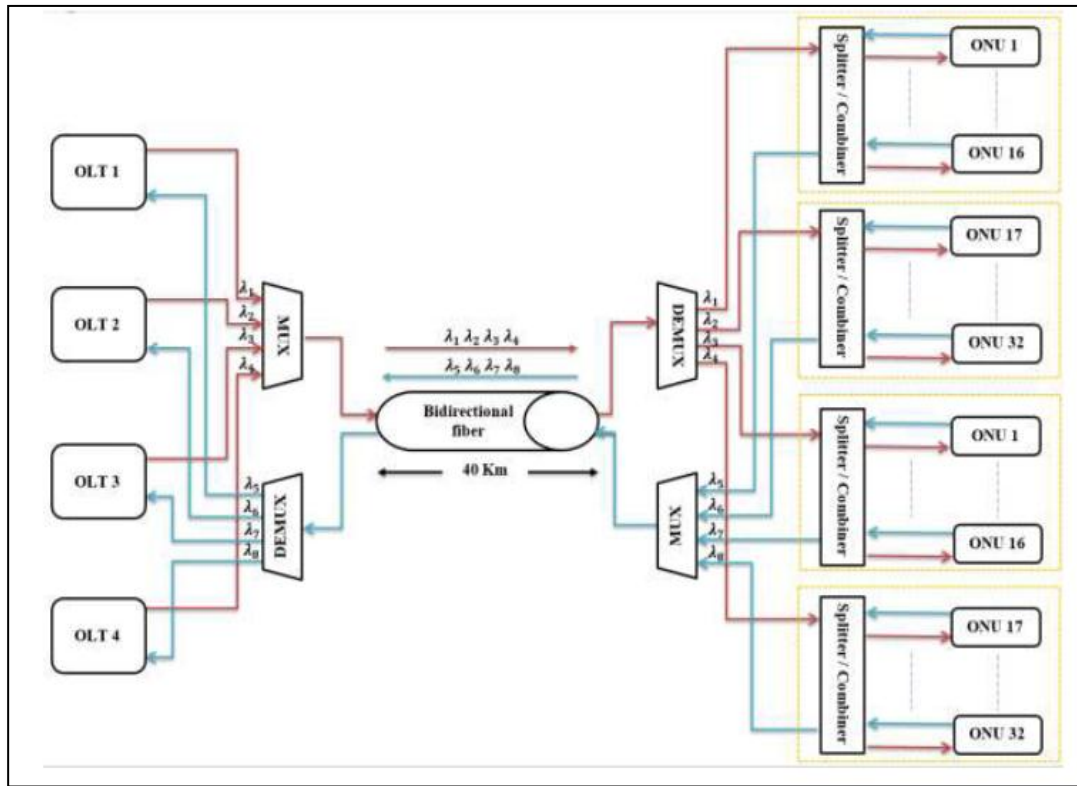


Figure III.14: architecture d'un TWDM [24].

La figure III.15 montre les domaines spectraux utilisés pour réseaux optiques passifs [20].

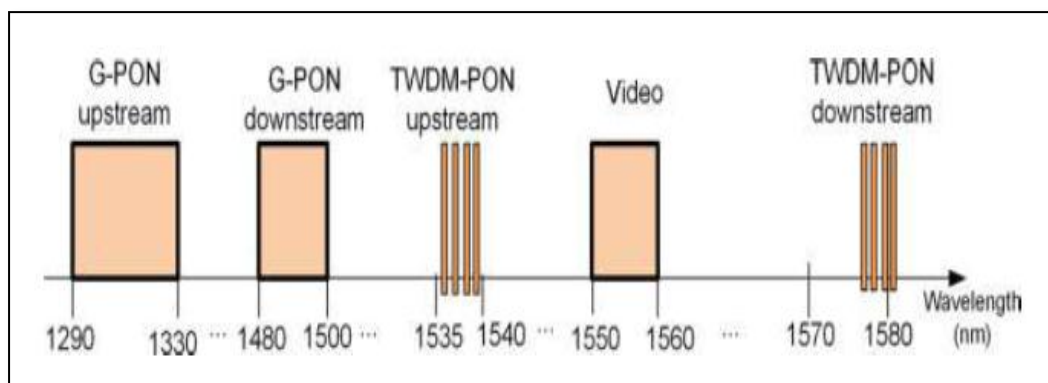


Figure III.15 : Diagramme de longueur d'onde optique passif [24].

### III.6.1.1 Avantages WDM-TDM PON

- Cette architecture WDM-TDM PON a pour intérêt de réutiliser l'infrastructure et les ressources déjà existantes comme :
  - Les coupleurs.
  - La photodiode large bande qui opèrent aussi bien à 1,3  $\mu\text{m}$  qu'à 1,55  $\mu\text{m}$ .
  - Les modules électroniques de synchronisation pour le TDM dans le sens descendant.
- Pour ce système hybride, nous retrouvons les avantages de deux technologies PON discutées précédemment. Premièrement, la bande-passante totale disponible est très élevée grâce à la technologie WDM, et deuxièmement il est possible de partager de manière flexible et efficace, le débit porté par une longueur d'onde entre K abonnés dans une branche, grâce à la technologie TDM.
- Cette technologie hybride permet d'augmenter considérablement le nombre d'abonnés servis par un réseau PON [32].

### III.6.1.2 Inconvénients WDM-TDM PON

- Le principal inconvénient est lié à la complexité de la mise en œuvre des récepteurs en mode rafale (mode « Burst » en anglais) pour le TDM et des émetteurs-récepteurs WDM pour le multiplexage en longueur d'onde.
- Comme cette architecture hybride est une cascade de WDM-PON et TDM-PON, les pertes optiques totales du système comprenant celles des coupleurs sont élevées.
- Par la suite des composants émetteurs-récepteurs WDM de très hautes performances sont requises pour pouvoir supporter un budget optique important [32].

### III.7 Caractéristiques de système hybride TWDM-PON

- Ce système améliore la capacité globale des données.
- La mise à niveau du débit binaire vers un seul canal.
- Il crée des signaux à grande vitesse avec des sources optiques à faible vitesse.
- Il fonctionne sur une longue portée.
- Il rend le partage de la bande passante totale plus flexible et efficace entre plusieurs abonnés.
- Il permet de surmonter les effets non linéaires associés au système.
- La mise en œuvre et le coût sont peu compliqués [26].

### III.8 Conclusion

La demande en bande passante augmente et les débits offerts aux clients stagnent, ce qui signifie que de plus en plus de hauts débits doivent être réalisés à un coût égal ou inférieur à la solution G-PON actuelle. L'ITU prévoit de normaliser les solutions NG-PON2 qui regroupent les systèmes pouvant offrir un débit dans le sens descendant de 1 Gbit/s par client.

En d'autres termes, un débit supérieur ou égal à 40 Gbit/s serait visé. La superposition des longueurs d'onde via la technologie WDM est la meilleure approche pour atteindre cet objectif. Il s'agit alors de superposer des canaux de longueurs d'onde à 10 Gbit/s chacun. Les frais élevés associés au déploiement des réseaux WDM à 10 Gbit/s font que de tels systèmes ne sont pas bénéfiques.

L'idée du PON hybride ou WDM-TDM PON est d'utiliser à la fois les avantages de l'allocation dynamique de la bande passante dans le TDM et la capacité du WDM pour augmenter le nombre de clients par PON.

Malgré toutes les technologies précédentes proposées comme technologie d'assemblage en NG-PON2, le TWDM-PON a été choisi comme la meilleure technologie pour répondre aux exigences de cette étape car il s'agit d'une technologie mature compatible avec ses technologies précédentes et à faible coût.

# ***Chapitre IV***

---

*Simulations et Résultats*

### IV.1 Introduction

Ce chapitre présente des différentes simulations dans le but de faire une étude comparative entre différents formats de modulations qui sont le format non-retour à zéro (*NRZ-OOK*), Retour à zéro avec suppression de la porteuse (*CS-RZ*), **Duo-Binaire (*DB*)** et Duo-Binaire modifié (*MODB*) dans un réseau optique passif de multiplexage en temps et en longueur d'onde (*TWDM-PON*) afin de trouver la modulation la plus adéquate. La performance a été analysée par rapport à des distances de transmission et des débits binaires variables sous différents espacements de canaux.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons évaluer les performances du système *TWDM-PON* avec un espacement de 100GHZ entre deux canaux adjacent pour les quatre modulations.

Dans la deuxième partie, nous allons faire le même travail avec un espacement de 25GHZ entre deux canaux adjacent.

Le système a été évalué en termes de taux d'erreur binaire minimum *TEB* (ou *BER*), et le facteur de qualité (*Q*) sans appliquer aucune technique de compensation de dispersion, ni aucun amplificateur optique. Le logiciel Optisystem a été utilisé pour cette simulation.

On a pu résumer le plan de travail selon les schémas bloc cité ci-dessous.

Ce schéma explique notre travail :

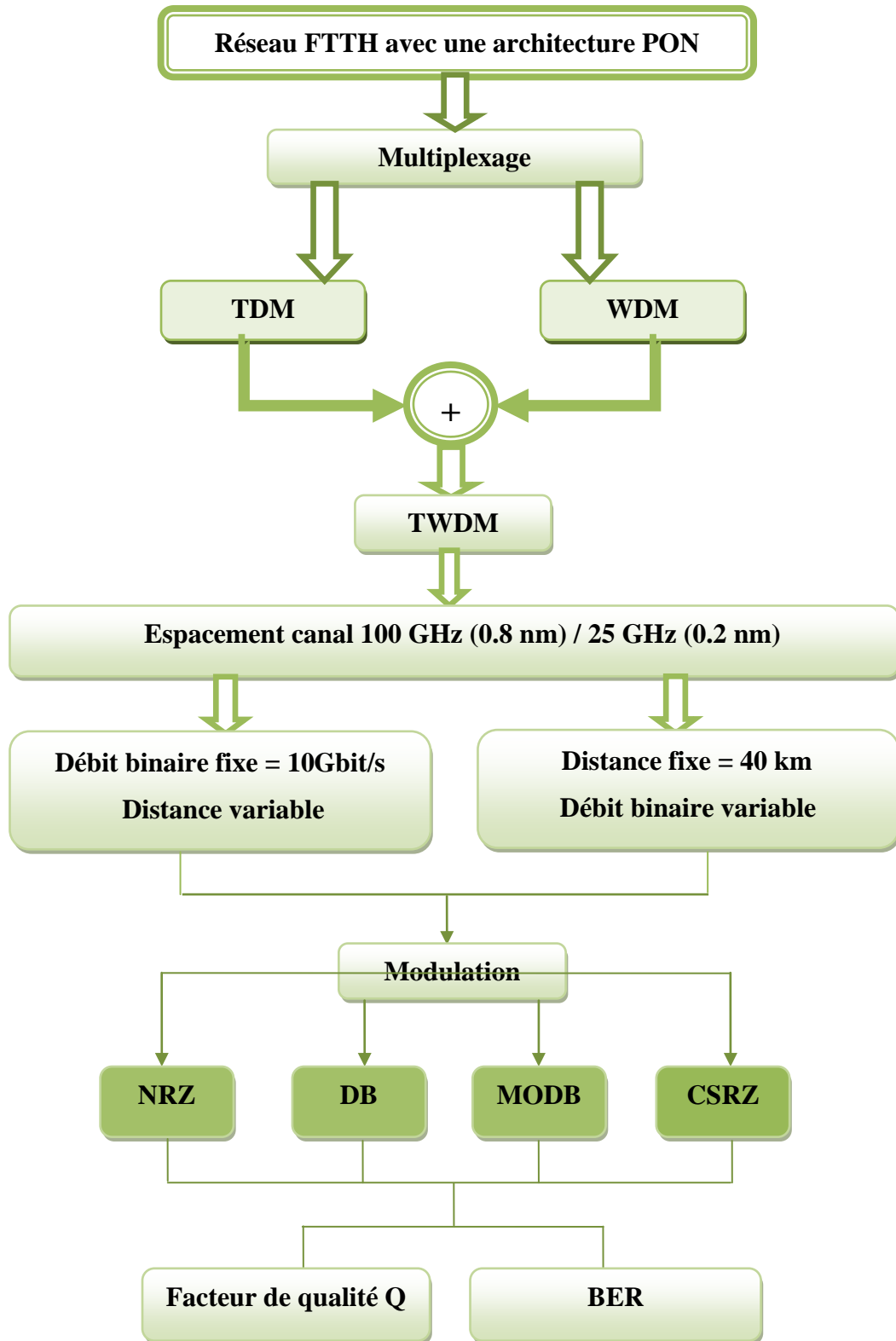


Figure IV.1 : Schéma descriptif de notre travail.



### IV.2 Description du logiciel Optisystem

Le logiciel Optisystem est un outil de simulation qui permet de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication. Optisystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes est une interface utilisateur conviviale.

L'interface graphique Optisystem, montrée sur la figure IV2, englobe :

- **Fenêtre Project Layout:** c'est la zone de travail principale dans laquelle on insère des composants, modifier leurs paramètres et créez des connexions entre eux.
- **Fenêtre Components Library :** c'est la fenêtre contenant la librairie des composants utilisés pour créer le système désiré.
- **Status Bar:** située en bas de la fenêtre Project Layout, cette barre affiche les informations utiles sur l'utilisation du logiciel Optisystem.

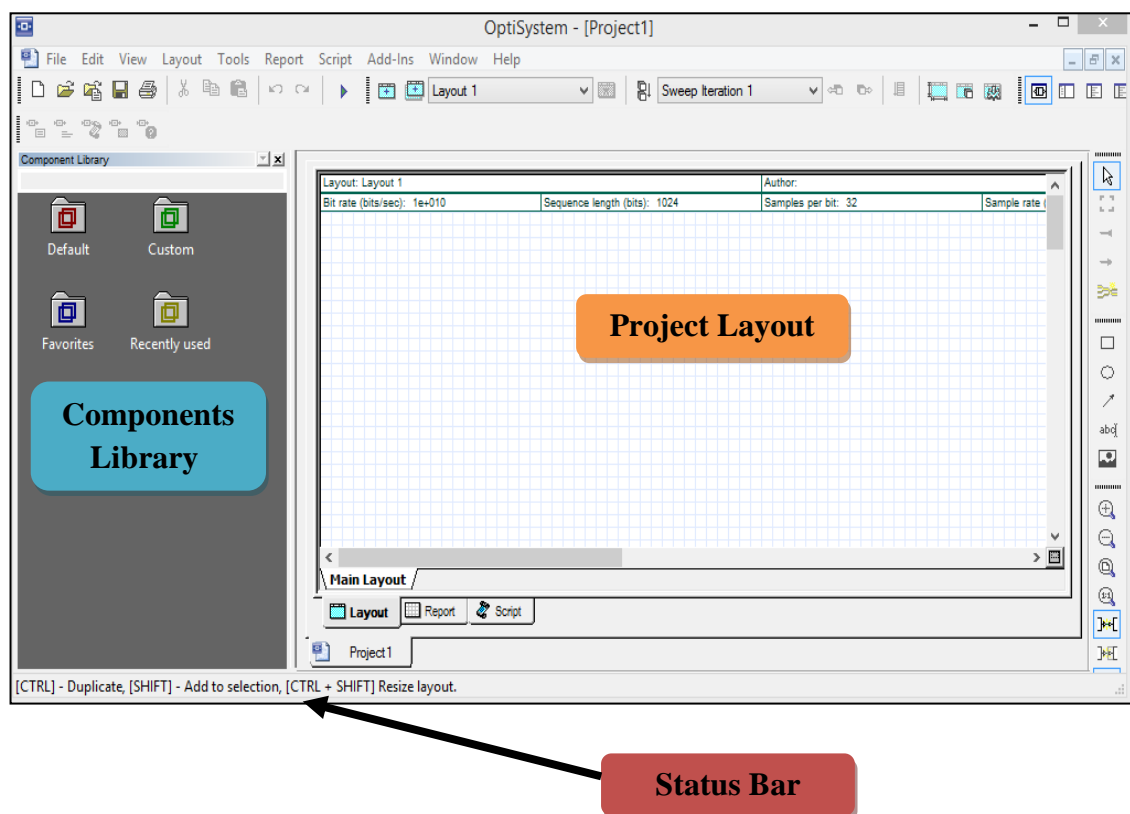


Figure IV.2 : L'interface graphique Optisystem.

### IV.2.1 Les applications de l'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.
- La conception des réseaux TDM/WDM et optiques passifs (PON).
- La conception d'anneau SONET/SDH.
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

La figure IV.3 Représente une fenêtre du logiciel « Optisystem » pour les paramètres de l'éditeur du projet comme le débit de transmission.

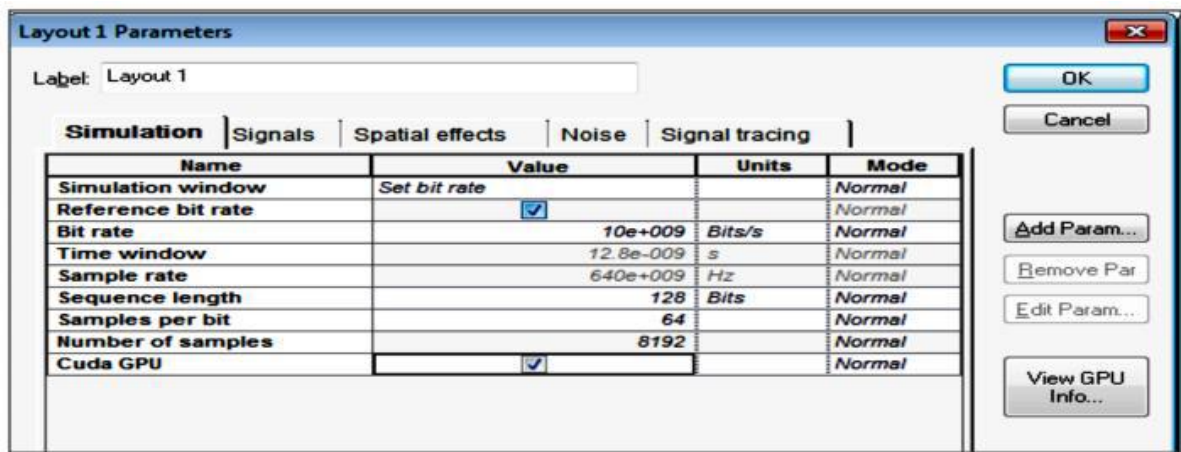


Figure IV.3 : Paramètre de dialogue des paramètres de simulation.

### IV.2.2 Avantages du logiciel Optisystem

Les avantages du logiciel Optisystem sont :

- Obtenir un aperçu de performances du système à fibre optique
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation du système.
- Présentation virtuelle des options de conceptions.

### IV.2.3 Paramètres de qualité d'une liaison optique

Pour mesurer la qualité de transmission optique afin d'évaluer le bon fonctionnement d'un système, il existe plusieurs métriques tel que : le facteur de qualité, le BER.

### A. Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise pour estimer la qualité d'une manière visuelle.

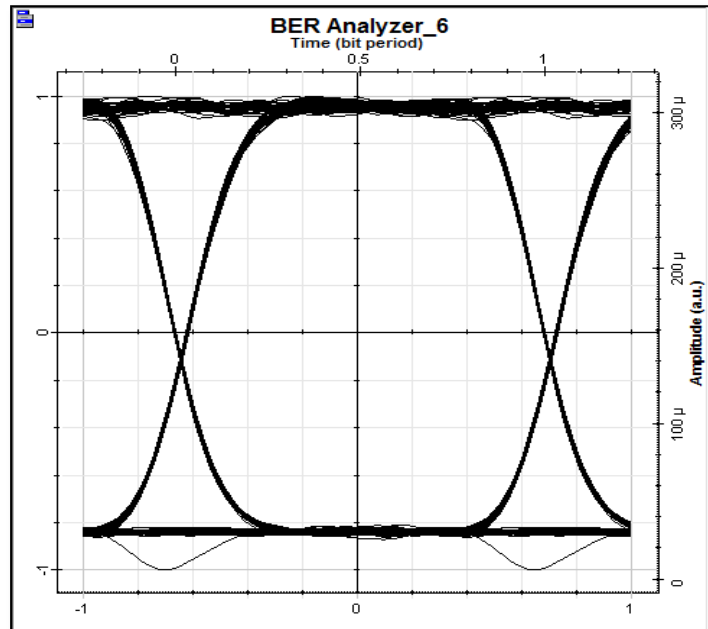


Figure IV.4: diagramme de l'œil.

Ce diagramme est caractérisé par :

L'élargissement temporel des impulsions du signal dû à la dispersion chromatique par les interfaces entre les symboles.

### B. Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q

Le facteur Q, ou facteur de qualité, est un autre critère de qualité d'un signal optique. Il est obtenu à partir des statistiques de bruit (moyennes et écarts-types) des niveaux « 1 » et « 0 » du signal à détecter.

Il est défini par la relation suivante :

$$Q = \frac{I_1 - I_2}{\delta_1 - \delta_2} \quad \dots \text{IV.1}$$

$I_1$  et  $I_0$  désignent les tensions moyennes des symboles « 1 » et « 0 »

$\delta_1$  et  $\delta_0$  désignent leurs écarts-types respectifs « 1 » et « 0 ».

**C. Le taux d'erreur binaire BER**

Le BER est le rapport du nombre d'erreurs de transmission, c'est-à-dire le nombre de fois où un « 1 » a été détecté à la place d'un « 0 » ou vice-versa, sur le nombre total de bits transmis.

$$\text{BER} = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits transmis}}$$

Un système est généralement considéré sans erreur si ce BER est inférieur à une valeur d'au plus  $10^{-9}$ , voire de  $10^{-12}$  ou  $10^{-15}$  suivant les systèmes.

**IV.3 paramètres de la simulation**

Dans ce travail on a fait une Analyse et une comparaison d'une architecture TWDM-PON pour différents formats de modulation (CSRZ, DB, MODB, NRZ) avec différentes distances de transmission et différents débits binaire pour un espacement entre canaux de 100 GHZ (0.8nm) et 25 GHZ (0.2nm).

L'architecture TWDM-PON utilise le multiplexage en longueur d'onde dans le sens descendant en combinant la lumière de quatre lasers OLT, la lumière est ensuite attribué à chaque ONU avec un multiplexeur adapté qui ne transmet que la longueur d'onde descendante souhaitée à son récepteur. Dans le sens montant un multiplexage en temps a été effectué.

Le tableau VI.1 présente les paramètres présent en considération dans cette simulation pour l'architecture TWDM-PON :

| Paramètre                               | Valeur                       |                              |
|---|------------------------------|------------------------------|
|   | Espacement 0.8nm             | Espacement 0.2nm             |
| Longueurs d'ondes<br>(voie montante)    | 1524, 1524.8, 1525.6, 1526.4 | 1524, 1524.2, 1524.4, 1524.6 |
| Longueurs d'ondes<br>(voie descendante) | 1596, 1596.8, 1597.6, 1598.4 | 1596, 1596.2, 1596.4, 1596.6 |
| Débit binaire                           | De 2.5Gbit/s à 20Gbit/s      | De 2.5Gbit/s à 17Gbit/s      |
| Distance de transmission                | de 40Km à 96 Km              | de 40Km à 96 Km              |
| Puissance du lasser                     | 10 dB                        | 10 dB                        |
| Atténuation de la fibre                 | 0.2dB/Km                     | 0.2dB/Km                     |

**Tableau IV.1 : les paramètres de la simulation.**

### IV.4 Description des architectures réaliser en simulation

Dans ce système, on trouve quatre étages à savoir l'étage de l'émetteur (*OLT*), le support de transmission ( *fibre bidirectionnelle*) le splitter (*RN*) ainsi que l'étage de la réception (*ONU*). Ce système est un réseau PON, il dispose de deux sens de communications, il s'agit du sens descendant (*downstream*) et du sens montant (*upstream*).

Nous allons évaluer les performances dans le sens descendant en étudiant l'impact de la distance de transmission, débit et du type du format de modulation sur le système TWDM-PON.

La figure IV.5, montre la configuration des émetteur TWDM-PON (*OLT : Optical Line Terminal*) et des récepteur TWDM-PON c'est ce que l'on appelle l'ONU (*Optical Network Unit : Unité de Réseau Optique*).

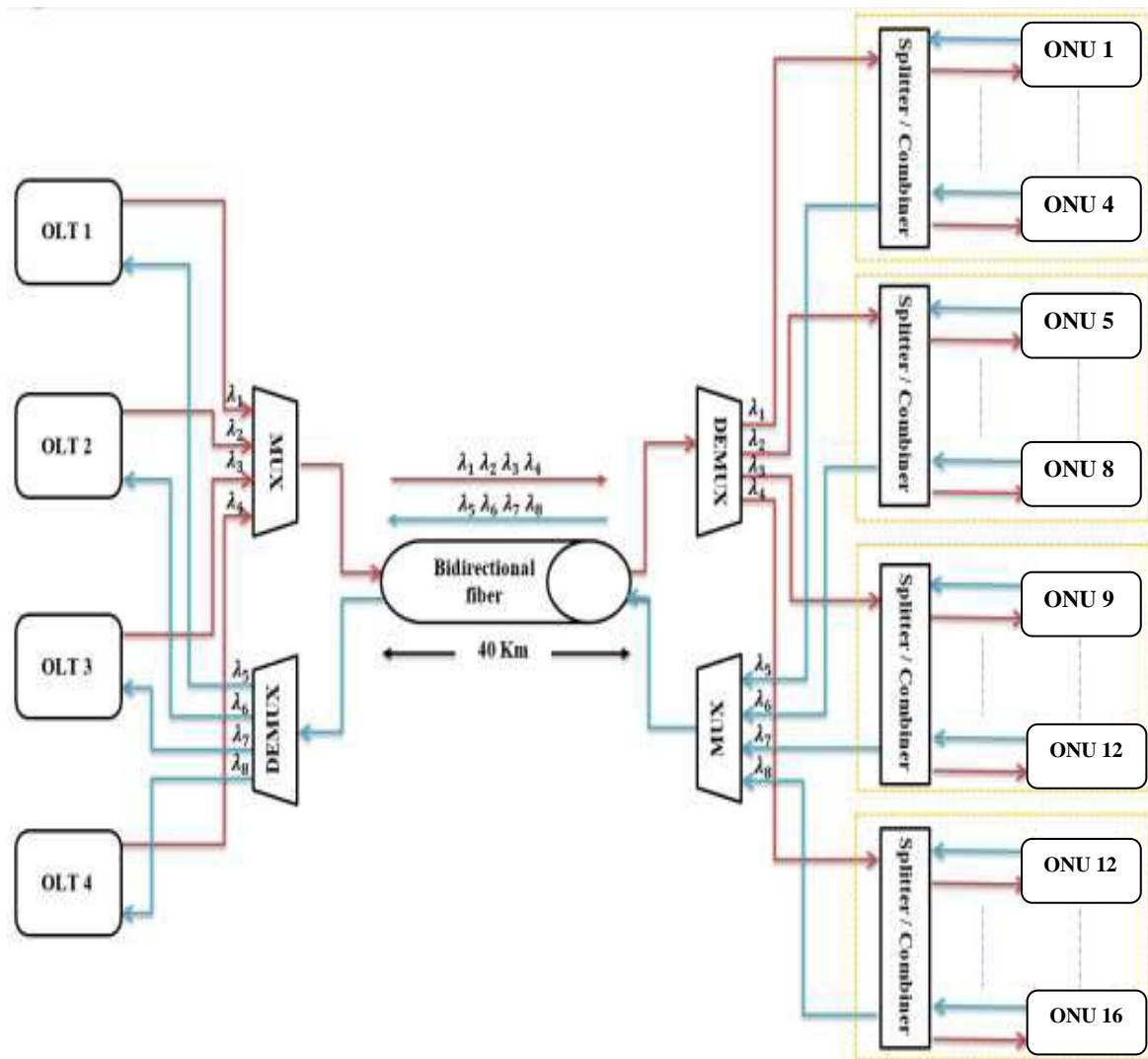
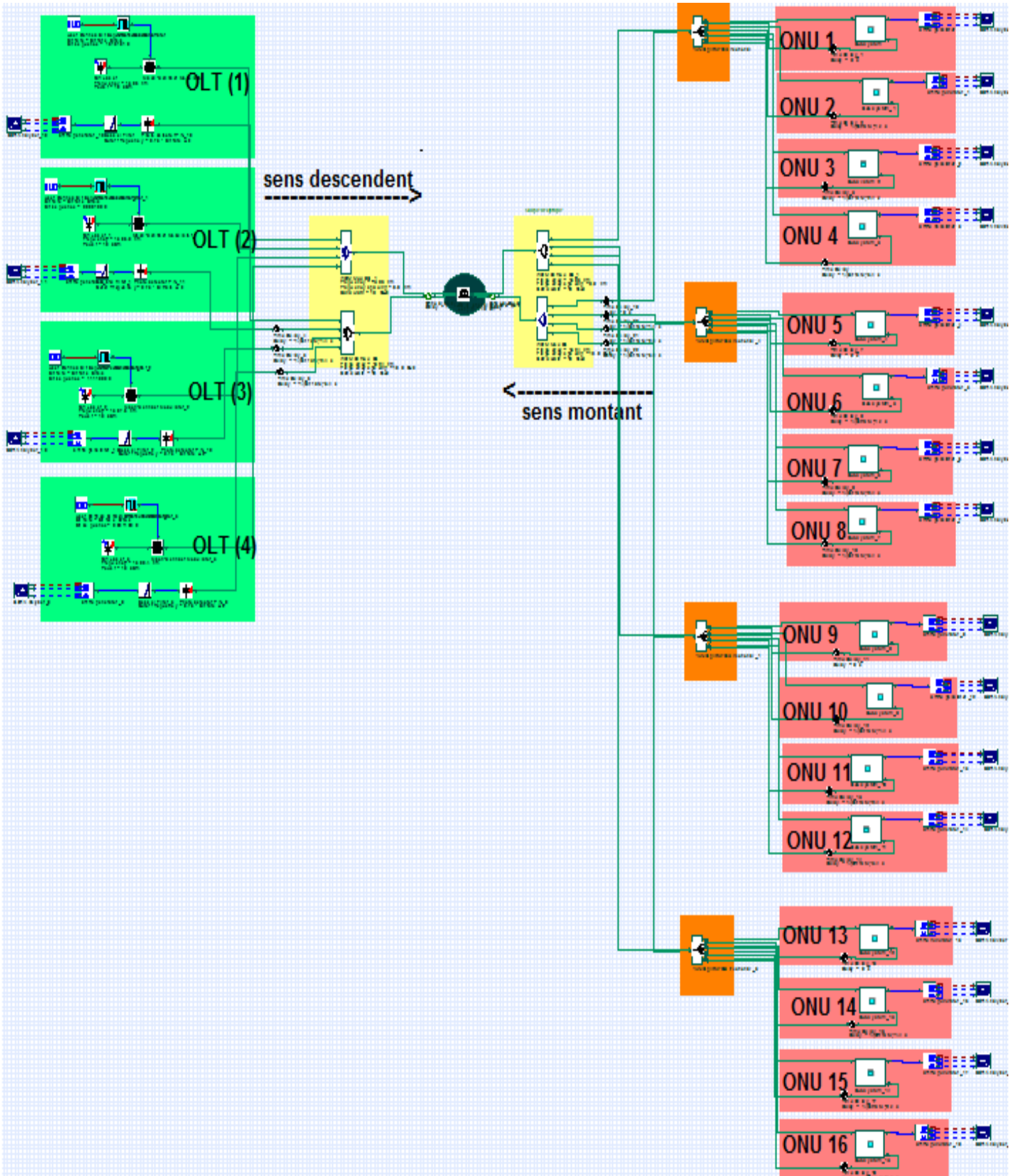


Figure IV.5 : Architecture TWDM-PON.



**Figure IV.6** Schéma bloc de simulation de la FTTH selon l'architecture TWDM-PON avec Optisystem.

### IV.4.1 Description des éléments de la chaîne de transmission

Dans ce qui suit on va décrire en détails les composants de la chaîne de transmission.

#### IV.4.1.1 Description du circuit d'émission OLT (Optical Line Termination)

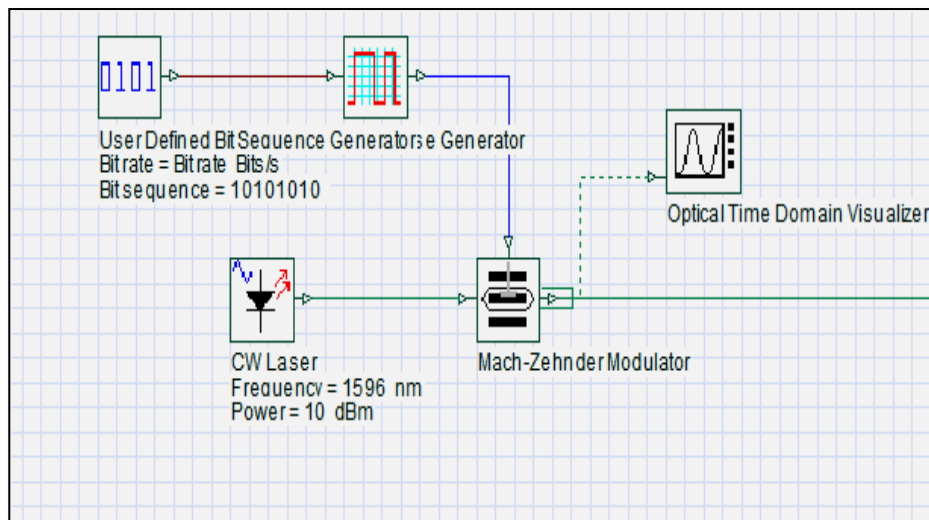
Appelé aussi Optical Line Terminal, est l'équipement de terminaison, côté réseau, assurant l'interface avec les fibres dans les réseaux FTTH en fibres optiques.

Cet équipement assure la modulation du signal. Dans notre cas on a simulé les quatre types de modulation cité en dessous :

- Modulation NRZ (No-Return-To-Zero).
- Modulation CS-RZ (Carrier-Suppressed Return-To-Zero).
- Modulation DB (**Duo-Binary**).
- Modulation MODB (Modified Duo-Binary).

##### IV.4.1.1.1 Modulation NRZ (No-Return-To-Zero)

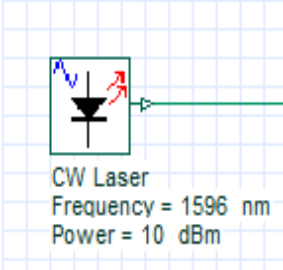
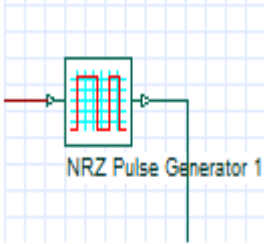
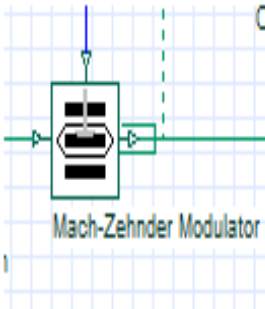
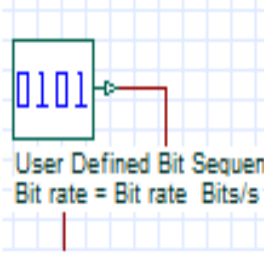
Pour générer les signaux optiques, nous avons utilisé une source laser CW, un modulateur externe (Mach-Zehnder Modulator : MZM), et un générateur d'impulsions NRZ. La figure IV.7 nous montre le schéma de simulation du circuit d'émission pour la modulation NRZ.



**Figure IV.7** : Schéma bloc de la modulation NRZ.

## Chapitre IV : Simulations et résultats

**Tableau IV.2** : Description des éléments selon la modulation NRZ.

| Le nom d'élément        | Bloc en Optisystem  | Description  |
|-------------------------|---|--|
| Laser à onde continue   |    | Génère le signal lumineux continu.                         |
| Générateur de pulse NRZ |   | Génère un signal codé sans retour à zéro (NRZ).            |
| Modulateur Mach-Zehnder |  | Convertisseur d'un signal électrique en un signal optique. |
| Générateur de bits      |  | Générateur de séquence de bits défini par l'utilisateur    |



IV.4.1.1.2 Modulation CSRZ (Carrier-Suppressed Return-To-Zero)

Le signal CSRZ est généré de manière similaire au format RZ. Cependant, la fréquence du signal électrique sinusoïdal appliquée dans le second MZM a la moitié du débit binaire.

Le deuxième MZM a été polarisé de manière à fournir des phases optiques alternées entre 0 et  $\pi$ . La figure suivante nous montre le schéma de simulation du circuit d'émission pour la modulation CSRZ.

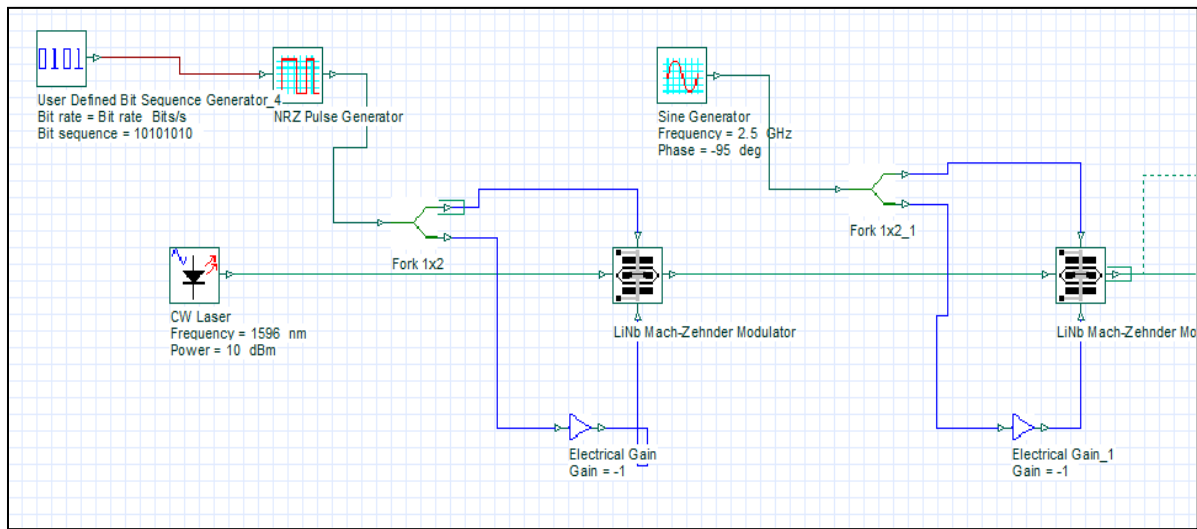
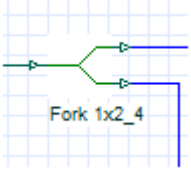
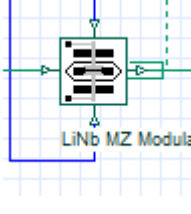
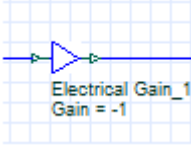


Figure IV.8 : Schéma du circuit d'émission (Modulation CSRZ).

Tableau IV.3 : Description des éléments selon la modulation CSRZ.

| Le nom d'élément | Bloc en Optisystem  | Description  |
|------------------|---|--|
| Fork             |  | dupliquer les ports de sortie des composants.        |
| modulateur       |  | Convertit un signal électrique en un signal optique. |
| Electrique Gain  |  | Élément de gain idéal.                               |

## Chapitre IV : Simulations et résultats

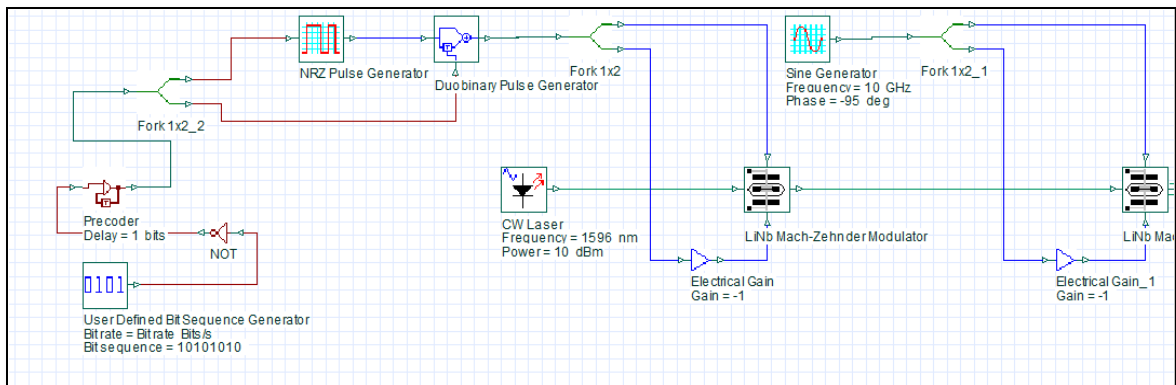
### IV.4.1.1.3 Modulation DB (Duo-Binary)

Pour générer les signaux optiques, nous avons utilisé une source laser CW, des modulateurs externe (*Mach-Zehnder Modulator: MZM*), un générateur de modèle d'impulsion NRZ et un générateur de signal électrique sinusoïdal.

Le duo-binaire a été généré en créant d'abord un signal duo-binaire NRZ à l'aide d'un pré-codeur et d'un générateur d'impulsions duo-binaire. Le générateur pilote le premier MZM, puis concatène ce modulateur avec un deuxième modulateur qui est piloté par un signal électrique sinusoïdal à la fréquence de 10 GHz.

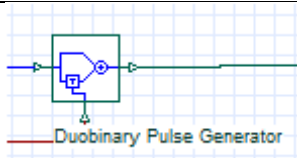
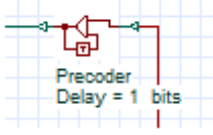
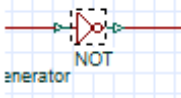
Le pré-codeur duo-binaire utilisé ici était composé d'une porte OU exclusif avec un chemin de retard.

La figure suivante nous montre le schéma de simulation du circuit d'émission pour la modulation DB.



**Figure IV.9** : Schéma du circuit d'émission (Modulation DB).

**Tableau IV.4** : Description des éléments selon la modulation DB.

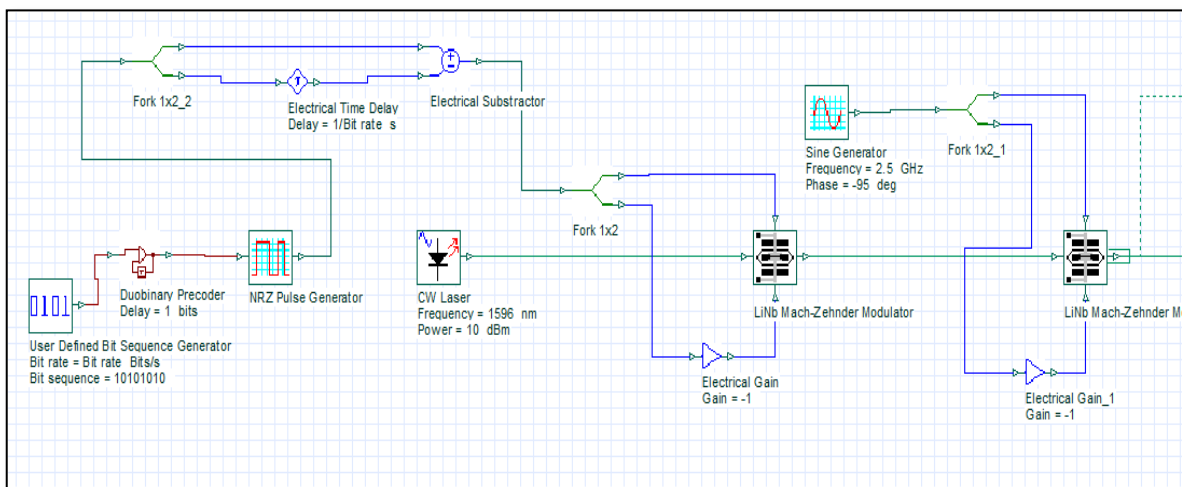
| Nom d'élément                   | Bloc en Optisystem  | Description   |
|---------------------------------|---|---|
| Générateur de pulse duo-binaire |  | Il est équivalent à un sous-système basé sur un retard électrique et un additionneur. |
| Pré-codeur duo-binaire          |  | Simule un pré-codeur généralement utilisé dans une modulation duo-binaire.            |
| NON logique                     |  | Opérateur NON logique.  |

## Chapitre IV : Simulations et résultats

### IV.4.1.1.4 Modulation MODB (Modified Duo-Binary)

Le MODB a été généré en créant d'abord un signal duo-binaire NRZ à l'aide d'un circuit de retard et de soustraction qui pilote le premier MZM, puis en concaténant ce modulateur avec un deuxième modulateur qui est piloté par un signal électrique sinusoïdal avec la fréquence de 2.5GHz.

Le pré-codeur duo-binaire utilisé ici était composé d'une porte OU exclusif avec un chemin de retard. La figure suivante nous montre le schéma de simulation du circuit d'émission pour la modulation MODB.



**Figure IV.10 :** Schéma du circuit d'émission (Modulation MODB).

**Tableau IV.5 :** Description des éléments selon la modulation MODB.

| Le nom d'élément        | Bloc en Optisystem  | Description   |
|-------------------------|---|---|
| Soustracteur Electrique | <p style="text-align: center;">Electrical Subtractor</p>                          | Soustracteur des signaux électriques d'entrées.               |
| Retard électrique       | <p style="text-align: center;">Electrical Time Delay<br/>Delay = 1/Bit rate s</p> | L' Ajout d'une temporisation à l'entrée du signal électrique. |

### IV.4.1.2 Multiplexage et démultiplexage

La transmission des signaux de l'OLT vers la fibre optique dans notre cas nécessite d'abord un multiplexeur en longueur d'onde (*WDM-Mux*) car chaque signal a une longueur d'onde spécifique ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ), le Multiplexeur fait la combinaison de ces signaux avec un espacement entre canaux pour ne pas interférer entre eux, les signaux multiplexés seront transportés par la suite via la fibre optique. La figure IV.11 montre le multiplexage des quatre signaux.

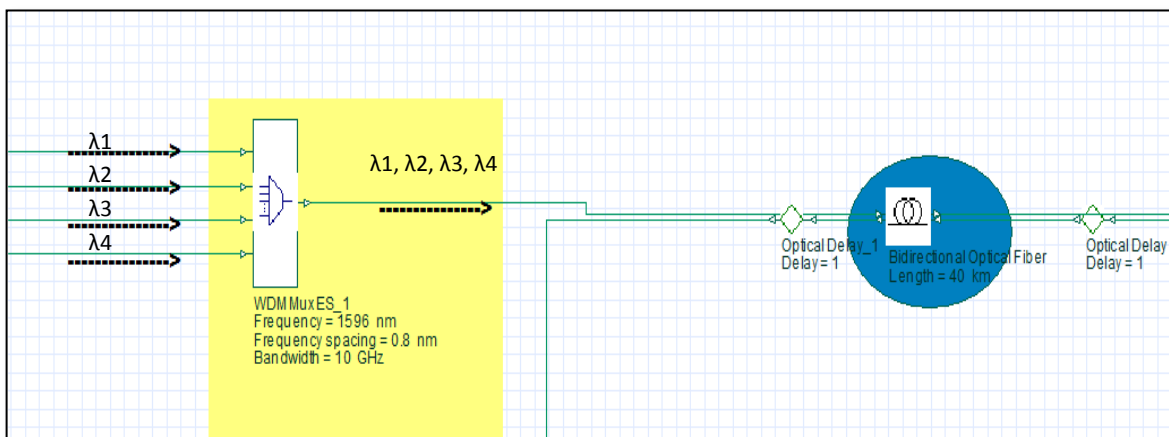


Figure IV.11 : Le multiplexage des signaux.

À la réception des signaux, un démultiplexeur en longueur d'onde fait une distribution, chaque signal va à sa destination (*UNO*). La figure IV.12 montre le démultiplexage des quatre signaux.

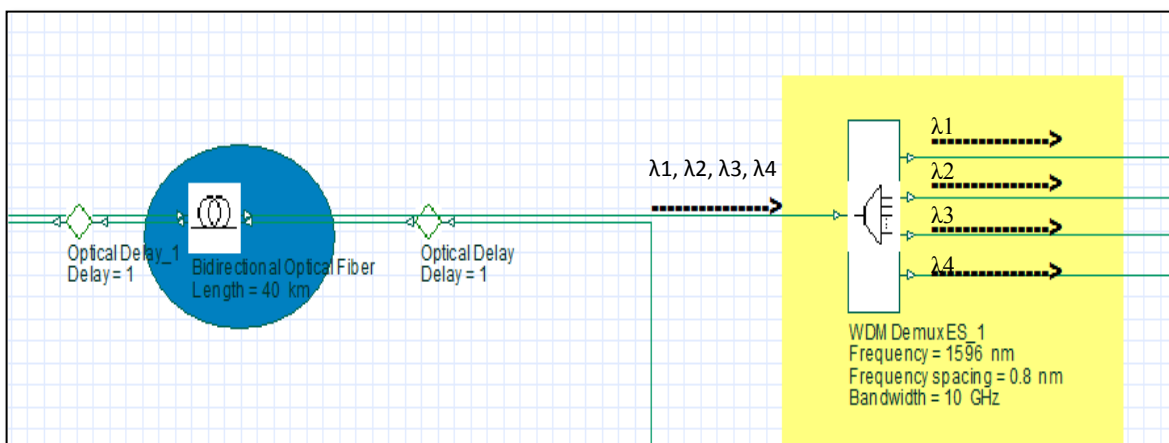


Figure IV.12: Le démultiplexage des signaux.

IV.4.1.3. Description du circuit de réception

La figure ci-dessous nous montre un endroit constitué de 4 ONU.

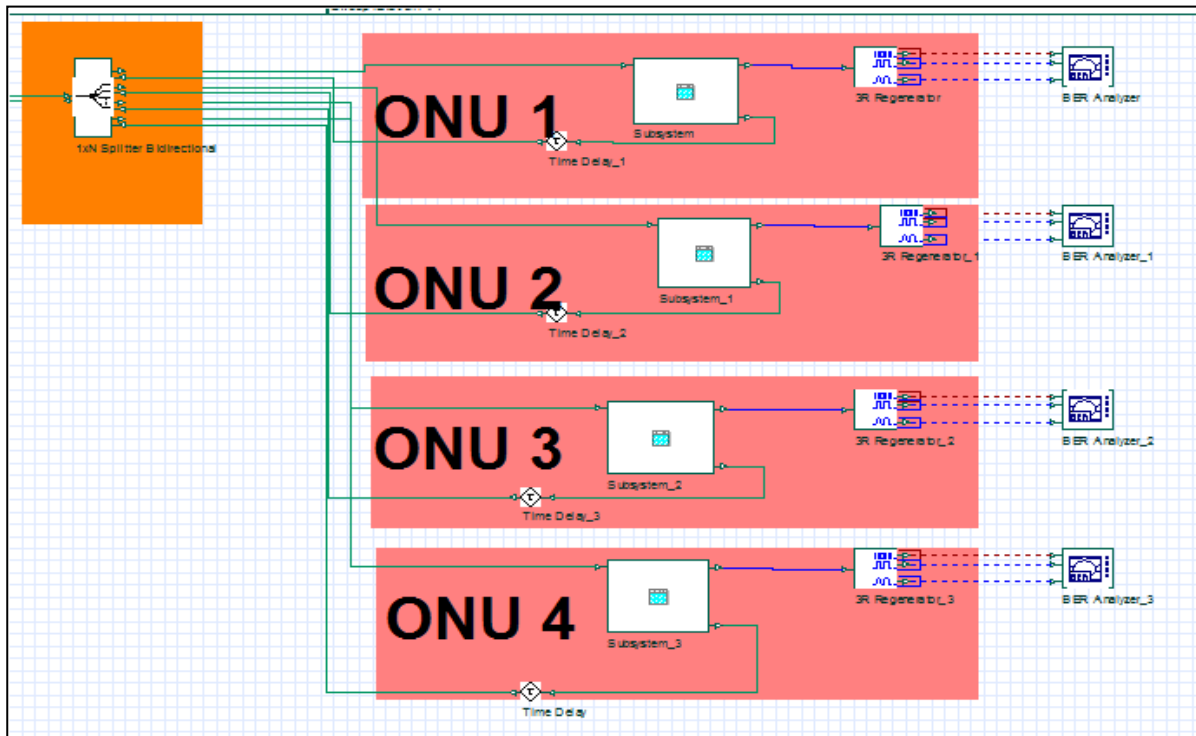
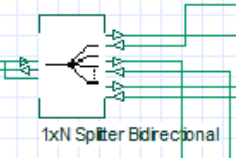
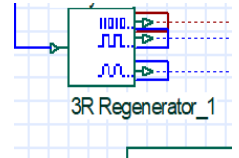
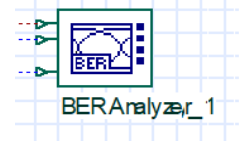


Figure IV.13 : Description de plusieurs ONU à la réception.

Au niveau de chaque endroit on trouve les éléments mentionné dans le tableau suivant :

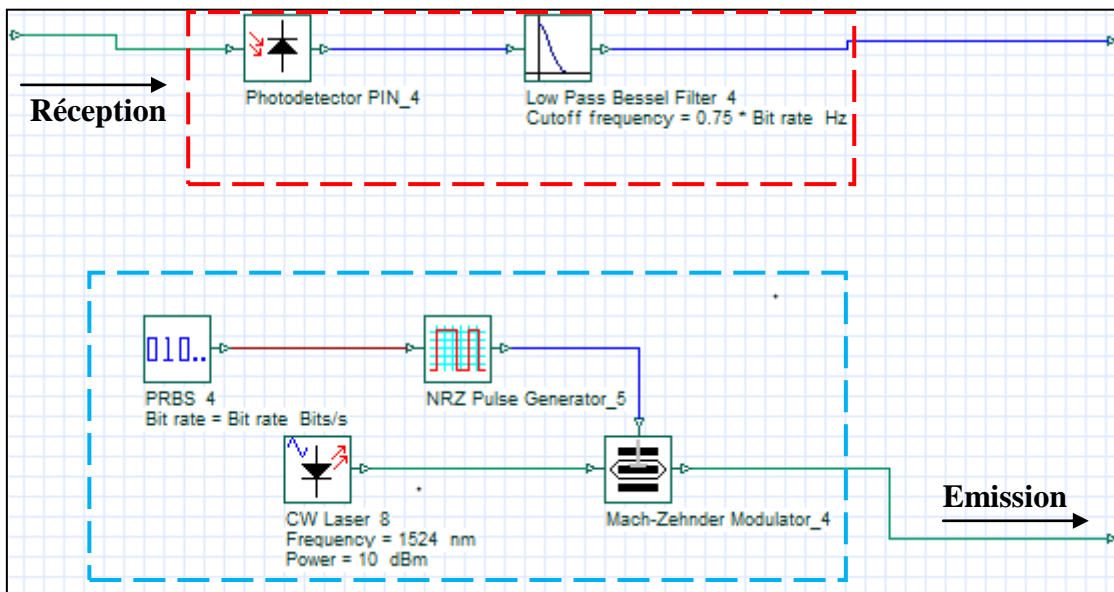
Tableau IV. 6 : Description des éléments d'un endroit.

| Le nom d'élément  | Description  | Composants  |
|---|--|---|
| <b>Splitter bidirectionnel</b>                              | Ce composant est un répartiteur et combineur de puissance avec un nombre arbitraire de ports d'entrée. dans notre cas on a utilisé 4 ports.                                    |  |
| <b>Régénérateur 3R</b>                                      | C'est un répéteur de type 3R. son rôle est de resynchronisé le signal optique.   |  |
| <b>BER Analyser (Un analyseur du Taux d'Erreur Binaire)</b> | c'est la méthode utilisée pour évaluer les performances d'un système, et comparer les bits envoyés avec les bits reçus, grâce à cet outil, on visualise le diagramme de l'œil. |  |

### IV.4.1.4 Schéma bloc de l'ONU (Optical Network Unit)

C'est l'unité de réseau **optique (ONU)** ; c'est-à-dire l'abonné est représenté par ONU dans la structure FTTH, composé d'une partie émission et d'une partie réception où on trouve des composants tels que le photo-détecteur et le filtre de Bessel (Figure IV.14). Chaque ONU est reliée à un répéteur qui assure les fonctions de régénération, remise en forme et resynchronisation du signal. Quelque que soit le type de modulation utilisée (*NRZ-OOK*, *CSRZ*, *DB*, *MODB*), l'ONU est constitué avec les mêmes composants.

La figure ci-dessous illustre schéma bloc de l'ONU.



. Figure IV.14 : Bloc ONU

La figure ci-dessous nous montre l'équipement réel de l'ONU.

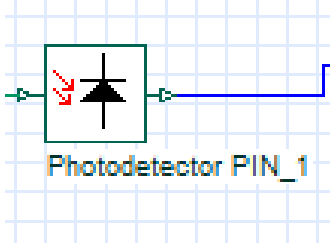
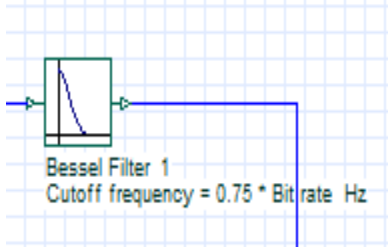


Figure IV.15 : Equipement réel de l'ONU.

## Chapitre IV : Simulations et résultats

Dans le tableau ci-dessous on montre en détails les éléments constitutifs de l'ONU :

**Tableau IV.7** : Description des éléments constituant l'ONU.

| Nom                               | Description  | Bloc en Optisystem   |
|-----------------------------------|--|--|
| <b>Récepteur optique</b>          | Photodiode PIN, transformant le signal optique en un signal électrique, qui permet d'adapter le seuil de décision en fonction des paquets de données reçues. |   |
| <b>Filtre passe bas de Bessel</b> | Le filtre Bessel permettant d'extraire l'information utile, sa fréquence de coupure est $0.75 \times \text{Débit binaire}$ .                                 |  |

### IV.5 Présentation des résultats de la simulation

L'objectif de notre travail a été de simuler les quatre formats de modulations dans un réseau TWDM-PON avec deux différents espacements de canal 100GHz (0.8nm) et 25GHz (0.2nm) en fonction de la variation de la distance de transmission et du débit binaire. Les quatre formats de modulations utilisés dans cette simulation sont le format non-retour à zéro (NRZ), Retour à zéro avec suppression de la porteuse (CS-RZ), Duo-Binaire (DB) et Duo-Binaire modifié (MODB).

#### IV.5.1 Espacement 100 GHz entre deux canaux adjacents

Dans cette première partie nous allons étudier et simuler le réseau TWDM-PON avec un espacement 100GHz (0.8nm) entre deux canaux adjacents pour les quatre modulations citées ci-dessus.

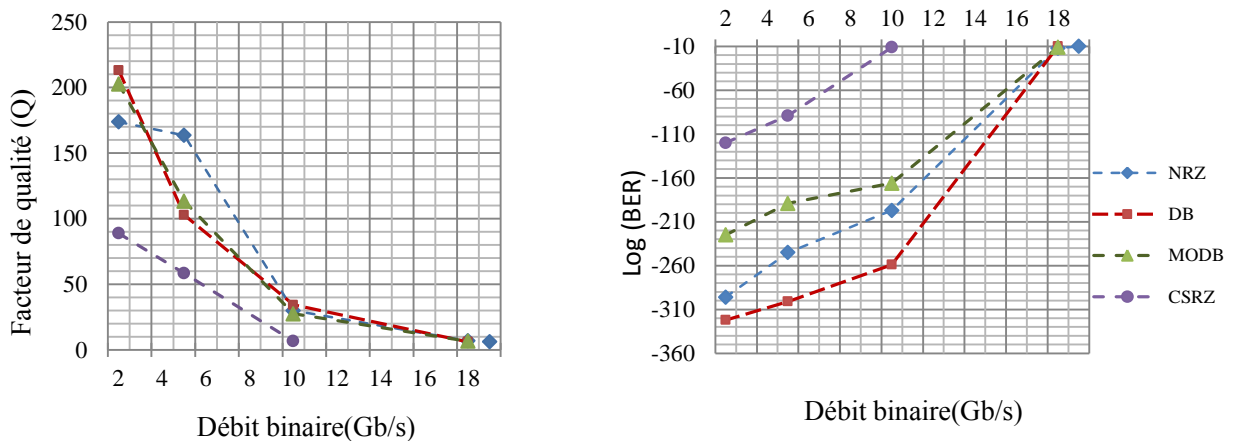
- Premièrement on varie le débit binaire et on fixe la distance de transmission.
- deuxièmement on varie la distance de transmission et on fixe le débit binaire.

IV.5.1.1 Etude de l'impact de variation du débit binaire sur le système

On considère que la distance de transmission est fixée à 40Km et le débit binaire varie de 2.5 Gbit/s à 20 Gbit/s. Le tableau ci-dessous nous montre le résultat de calcul du facteur de qualité et du Log (BER).

**Tableau IV.8:** l'impact du débit binaire variable avec une distance de transmission fixe pour les quatre formats de modulations.

| Débit →<br>(Gbit/s)<br>Modulation ↓ | 2,5       |     | 5         |     | 10        |    | 18        |   | 20        |   |
|-------------------------------------|-----------|-----|-----------|-----|-----------|----|-----------|---|-----------|---|
|                                     | Log (BER) | Q   | Log (BER) | Q   | Log (BER) | Q  | Log (BER) | Q | Log (BER) | Q |
| NRZ                                 | -234      | 174 | -210      | 163 | -197      | 29 | -12       | 7 | -10       | 6 |
| DB                                  | -321      | 213 | -285      | 102 | -259      | 34 | -10       | 6 | -5        | 0 |
| MODB                                | -225      | 202 | -196      | 113 | -166      | 27 | -11       | 6 | -8        | 2 |
| CSRZ                                | -65       | 89  | -40       | 58  | -11       | 6  | -6        | 4 | 0         | 0 |



**Figure IV.16:** Facteur Q et log BER en fonction du Débit binaire pour une distance fixe et débit binaire variable.

D'après le tableau IV.8 et la figure IV.16, nous constatons que pour un débit binaire de 2.5 Gbit/s toutes les modulations ont un  $\log(BER)$  très faible, puis lorsqu'on augmente le débit binaire nous observons que le format NRZ fonctionne jusqu'à 20 Gbit/s sans utiliser aucun amplificateurs, donc on peut dire que c'est le format de modulation préféré dans ce cas sans négliger les deux autres formats MODB et DB qui ont eux également une bonne résistance aux effets non linéaires car avec ces deux formats de modulations on peut atteindre des débits jusqu'à 18 Gbit/s. Le format CSRZ peut desservir seulement 10 Gbit/s c'est le pire des cas.



## Chapitre IV : Simulations et résultats

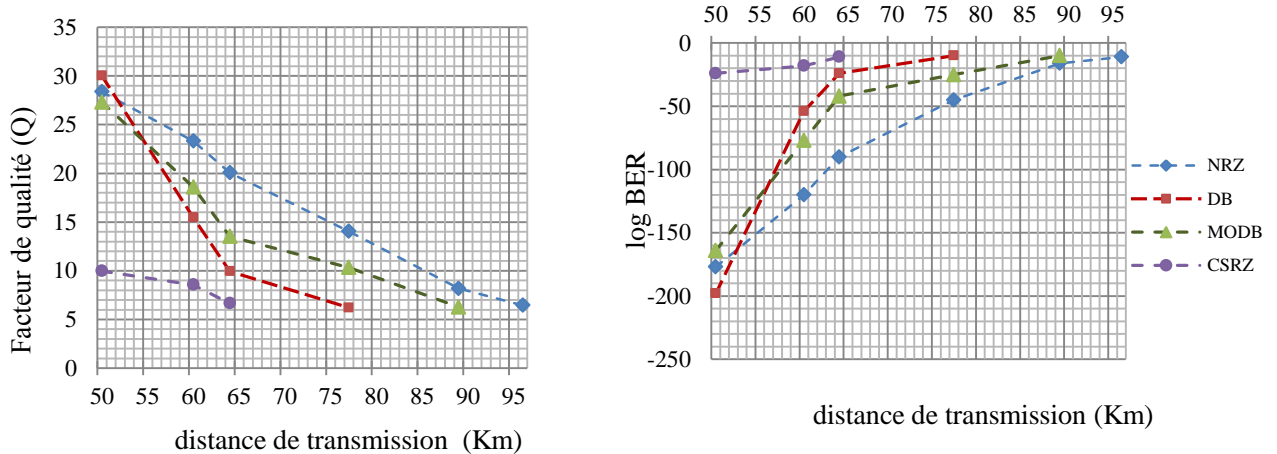
### IV.5.1.2 Etude de l'impact de la distance de transmission sur le système

Dans cette simulation on a considéré que le débit binaire est égal à 10 Gbit/s (fixe) et la distance de transmission variable de 20 km à 96 km. Le tableau ci dessous nous montre les performances de la liaison.

**Tableau IV.9 :** l'impact de la distance de transmission variable avec un débit fixe pour les quatre formats de modulations.

| Distance (Km) →<br>Modulation ↓ | 50       |    | 60       |    | 64       |    | 77       |    | 89       |   | 96       |   |
|---------------------------------|----------|----|----------|----|----------|----|----------|----|----------|---|----------|---|
|                                 | Log(BER) | Q  | Log(BER) | Q  | Log(BER) | Q  | Log(BER) | Q  | Log(BER) | Q | Log(BER) | Q |
| NRZ                             | -177     | 28 | -120     | 23 | -90      | 20 | -45      | 14 | -16      | 8 | -11      | 6 |
| DB                              | -198     | 30 | -54      | 15 | -24      | 9  | -10      | 6  | -4       | 3 | 0        | 0 |
| MODB                            | -164     | 27 | -77      | 18 | -42      | 13 | -25      | 10 | -10      | 6 | -5       | 1 |
| CSRZ                            | -24      | 9  | -18      | 8  | -11      | 6  | -9       | 2  | 0        | 0 | 0        | 0 |

La figure IV.17 présentes les différentes courbes de variation du facteur de qualité et le log(BER) en fonction de la distance de transmission pour les quatre formats de modulation.



**Figure IV.17:** Facteur Q et log BER en fonction de la distance pour un débit binaire fixe 10Gbit/s.

D'après le tableau IV.9 et la figure IV.17, nous constatons que pour une distance de 20km toute les modulations ont un log (BER) très faible, puis lorsqu'on augmente la distance nous observons que le format NRZ est le meilleur dans ces condition jusqu'à 96 km sans utiliser aucun amplificateurs. Le MODB et le DB sont également préférable en deuxième position pour des distance 89 km et 77Km respectivement. Pour le format CSRZ on peut dire qu'il peut servir jusqu'à 64 km seulement.

## Chapitre IV : Simulations et résultats

On remarque que pour une distance de 50Km le format de modulation DB est préférable dans ce cas (facteur (Q=30)), c'est-à-dire qu'il peut servir dans les petites distances pour aboutir à une bonne qualité de transmission.

### IV.5.2 Espacement 25 GHz (0.2nm) entre deux canaux adjacents

En deuxième lieu, nous abordons les mêmes démarches que précédemment sauf que l'espacement utilisé entre deux canaux adjacents est 25GHz (0.2nm).

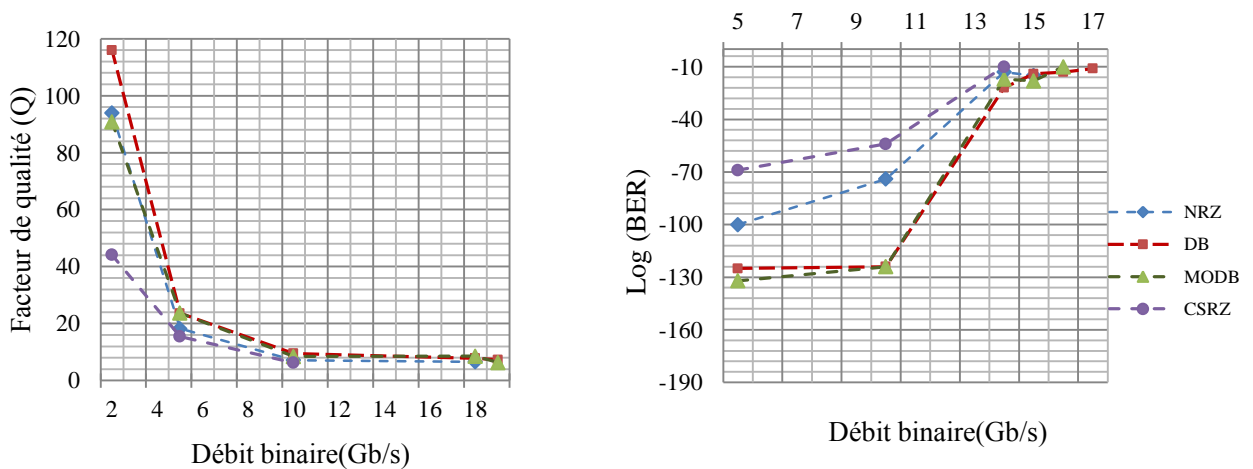
#### IV.5.2.1 Etude de l'impact du débit binaire sur le système

Dans ce cas on a fixé la distance de transmission à 40Km et varié le débit binaire de 5 Gbit/s à 17 Gbit/s. Après la simulation on a abouti aux résultats mentionné dans le tableau ci dessous.

**Tableau IV.10:** l'impact du débit binaire variable avec une distance de transmission fixe pour les quatre formats de modulations.

| Débit (Gbit/s) \ Modulation | 5        |     | 10       |    | 14       |   | 15       |   | 16       |   | 17       |   |
|-----------------------------|----------|-----|----------|----|----------|---|----------|---|----------|---|----------|---|
|                             | Log(BER) | Q   | Log(BER) | Q  | Log(BER) | Q | Log(BER) | Q | Log(BER) | Q | Log(BER) | Q |
| NRZ                         | -100     | 93  | -74      | 18 | -13      | 7 | -15      | 6 | -9       | 2 | -4       | 0 |
| DB                          | -125     | 116 | -124     | 23 | -22      | 9 | -14      | 7 | -13      | 7 | -11      | 6 |
| MODB                        | -132     | 90  | -124     | 23 | -17      | 8 | -18      | 8 | -10      | 6 | -7       | 1 |
| CSRZ                        | -69      | 44  | -54      | 15 | -10      | 6 | -9       | 2 | 0        | 0 | 0        | 0 |

La figure IV.18 présentes les différentes courbes de variation du facteur de qualité et le log(BER) en fonction du débit binaire pour les quatre formats de modulation.



**Figure IV.18 :** Facteur (Q) et log BER en fonction du débit binaire pour une distance de transmission fixe 40Km.

## Chapitre IV : Simulations et résultats

D'après le tableau IV.10 et la figure IV.18, nous constatons que pour un débit binaire de 5 Gbit/s toutes les modulations ont un  $\log(BER)$  très faible, puis lorsqu'on augmente le débit binaire nous observons que le format DB est préférable pour un débit allant jusqu'à 17 Gbit/s sans utiliser aucun amplificateurs dans ce cas sans négliger les deux autres formats MODB et NRZ qui sont mieux utilisés pour des débits atteignant jusqu'à 16 Gbit/s et 15 Gbit/s respectivement par contre le format CSRZ peut être utilisé seulement pour un débit de 14 Gbit/s.

**Remarque :** On remarque d'après les résultats du tableau qu'avec l'utilisation des quatre formats de modulations on a abouti à des débits binaires très proches.

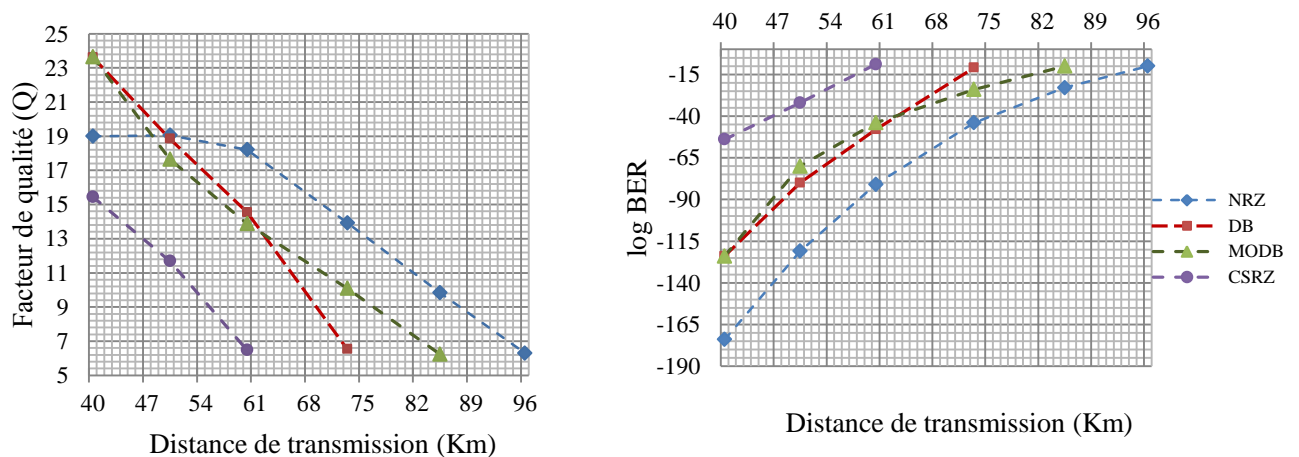
### IV.5.2.2 Etude de l'impact de la distance de transmission sur le système

Dans cette dernière simulation on a fixé le débit binaire à 10 Gbit/s et varié la distance de transmission de 40 km à 96 km comme le montre le tableau ci dessous.

**Tableau IV.11:** l'impact de la distance variable avec un débit fixe pour les quatre formats de modulations.

| Distance (Km) \ Modulation | 40       |    | 50       |    | 60       |    | 73       |    | 85       |   | 96       |   |
|----------------------------|----------|----|----------|----|----------|----|----------|----|----------|---|----------|---|
|                            | Log(BER) | Q  | Log(BER) | Q  | Log(BER) | Q  | Log(BER) | Q  | Log(BER) | Q | Log(BER) | Q |
| NRZ                        | -174     | 23 | -121     | 19 | -81      | 18 | -44      | 13 | -23      | 9 | -10      | 6 |
| DB                         | -124     | 23 | -80      | 18 | -48      | 14 | -11      | 6  | -7       | 1 | -3       | 0 |
| MODB                       | -124     | 23 | -70      | 17 | -44      | 13 | -24      | 10 | -10      | 6 | -8       | 2 |
| CSRZ                       | -54      | 15 | -32      | 16 | -9       | 6  | -6       | 1  | 0        | 0 | 0        | 0 |

La figure IV.19 présente les différentes courbes de variation du facteur de qualité et le  $\log(BER)$  en fonction de la distance de transmission pour les quatre formats de modulation.



**Figure IV.19:** Facteur Q et log BER en fonction de la distance pour un débit binaire fixe 10 Gbit/s.

## Chapitre IV : Simulations et résultats

---

D'après le tableau IV.11 et la figure IV.19, nous remarquons que toute les modulations ont un  $\log(\text{BER})$  très petit pour une distance de 40Km par contre lorsque la distance a augmenté on a observé que seul le format NRZ qui a servi bien jusqu'à 96 km sans utiliser aucun amplificateurs. La modulation MODB et DB ont également aussi donné des bons résultats en transmission jusqu'à 85 km et 73Km, respectivement. Sinon le format CSRZ peut être utilisé pour des distances allant jusqu'à 60 km.

**Remarque :** D'après le tableau ci-dessus on remarque que les formats de modulations NRZ, DB et MODB ont la même valeur du facteur (Q) pour une distance de 40Km, donc ces modulations peuvent servir dans les petites distances avec une bonne qualité de transmission.

### IV.5.3 Résultats récapitulatifs

Finalement, on a regroupé tous les résultats présentés précédemment dans deux tableaux récapitulatifs IV.12 et IV.13 pour faire la comparaison entre l'utilisation d'un espacement de 100GHz (0.8nm) et 25GHz (0.2nm) pour chaque format de modulation et de tirer l'architecture de transmission préférée dans chaque cas.

La comparaison est faite en fonction de la variation de la distance de transmission et le débit binaire.

**Remarque :** Les performances ont été évaluées en termes de minimum de BER et de Q maximum.

#### IV.5.3.1 Distance de transmission maximale

Nous avons vu que lorsque le débit binaire est fixe et que la distance de transmission augmente, les performances de la liaison se dégradent, donc on peut dire que chaque format de modulation peut être utilisé pour une distance maximale définie dans le tableau IV.12.

**Tableau IV.12 :** Distances maximales de transmission trouvées pour chaque format de modulation.

| Format de Modulation | Espacement 100GHZ                      | Espacement 25GHZ |
|----------------------|--|------------------|
|                      | Distance de transmission maximale (Km) |                  |
| NRZ                  | 96                                     | 96               |
| DB                   | 77                                     | 73               |
| MODB                 | 89                                     | 85               |
| CSRZ                 | 64                                     | 60               |

Sur le tableau on voit que le format NRZ peut être utilisé à des distances allant jusqu'à 96 Km pour les deux espacements entre canaux. Par contre les trois formats restants sont favorables en utilisant un espacement 100GHz.

De cela on peut dire que les meilleures distances de transmission sont atteintes avec l'utilisation d'un espacement 100GHz (0.8nm) car les canaux sont plus éloignés entre eux par rapport à l'espacement 25GHz (0.2 nm) qui est plus sensible à la dispersion et la dégradation à cause des interférences entre deux canaux adjacents.

### IV.5.3.2 Débits binaire maximum

Dans cette deuxième partie de comparaison où la distance de transmission est fixe et le débit binaire est variable comme le montre le tableau IV.12.

**Tableau IV.13 :** Débit binaire maximal trouvées pour chaque format de modulation.

| Format de Modulation | Espacement 100GHZ            | Espacement 25GHZ |
|----------------------|------------------------------|------------------|
|                      | Debit binaire maximal (Gbps) |                  |
| NRZ                  | 20                           | 15               |
| DB                   | 18                           | 17               |
| MODB                 | 18                           | 16               |
| CSRZ                 | 10                           | 14               |

D'après le tableau on remarque que le débit binaire maximal est obtenu toujours avec l'espacement 100GHz qui est égal à 20Gbit/s avec le format NRZ tandis que Les modulations DB et MODB ont presque le même débit pour les deux espacements.

Par contre avec l'utilisation de la modulation CSRZ on peut aboutir à un débit plus élevé pour l'espacement 25GHz.

### IV.6 Conclusion

Un réseau FTTH avec une architecture TWDM-PON a été conçu et simulé à l'aide du logiciel Optisystem et ses paramètres tels que le facteur Q et le BER dont les simulations effectuées tiennent compte de l'impact des facteurs impliqués dans cette étude notamment la longueur de la liaison, le débit binaire et le type de format de modulation.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons évalué les performances de l'architecture avec un espacement 100GHZ (0.8nm) entre deux canaux adjacents pour les quatre formats de modulation, on a pu aboutir à des distances de transmission maximale (96Km) et un meilleur débit binaire (20Gbit/s) en utilisant la modulation NRZ, par la suite on a pu atteindre des résultats aussi favorables avec les autres modulations.

Dans la deuxième partie, nous avons fait le même travail avec un espacement de 25GHZ (0.2nm) entre deux canaux adjacents dans ce cas on a abouti à un débit qui est égal à 17Gbps par la modulation DB.

D'après les résultats trouvés on peut dire que le meilleur format de modulation pour un espacement 100GHz c'est le format NRZ, et pour l'espacement 25GHz le format de modulation DB est le meilleur.

### Conclusion générale et perspectives

On conclue que la fibre optique permet la transmission d'informations numériques avec un très haut débit alors on peut dire que c'est le meilleur support de transmission parmi toutes les solutions existantes. D'autre part, la transmission de plusieurs signaux de « couleurs » différentes (ou canaux) s'effectue par une seule fibre optique dans les réseaux FTTH (PON) ce qui permet d'économiser et d'éviter les coûts exceptionnel.

Au cours de ce travail nous avons utilisé différents format de modulation dans le système de transmission optique TWDM-PON en utilisant deux espacements différents entre canaux pour en tirer le meilleur choix entre ces paramètres et garantir une bonne transmission avec des longues distance et un haut débit.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les notions de base sur la fibre optique en général et en particulier leur usage en transmission.

Dans le second chapitre, nous avons mis en évidence les différents types de multiplexages utilisés dans les systèmes optiques notamment le WDM et le TDM et d'autre ainsi qu'on a exposé les différents formats de modulation tel que le format *NRZ-OOK* (non-retour-à-zéro), le *CS-RZ* (Retour-à-zéro avec suppression de la porteuse), le *DB* (Duo-Binaire) et le *MODB* (Duo-Binaire modifié).

Dans le troisième chapitre, nous sommes concentrés d'abord sur l'étude des différentes architectures et standards du réseau PON dans les réseaux FTTH et leurs différentes architectures. Par la suite on a décrit l'architecture hybride TWDM-PON qui a été utilisé dans notre travail.

Dans le dernier chapitre on a exposé les résultats de simulation obtenu avec le système TWDM-PON. Les simulations effectuées tiennent compte de l'impact de plusieurs facteurs impliqués dans notre travail tel que l'espacement entre canaux, les types de format de modulation (*NRZ-OOK*, *CS-RZ*, *DB* et *MODB*), la longueur de la liaison (longueur fibre optique), le débit binaire ainsi que les différentes limitations telles que les effets non-linéaires et la dispersion chromatique.

La comparaison a été faite pour mettre en valeur l'espacement entre canaux 25GHz et 100GHz afin de choisir le meilleur espacement et le format de modulation le plus favorable pour une contribution efficace dans le réseau PON.

D'après nos simulations et les résultats trouvés, nous avons constaté que le système peut aboutir a des distances de transmission maximale 96Km et des meilleurs

## Conclusion générale et perspectives

---

débits binaire jusqu'à 20Gbit/s en utilisant un espacement de 100GHz avec une modulation NRZ.

Les résultats des autres modulations sont aussi favorable. On conclu que notre architecture s'adapte mieux avec l'espacement 100GHZ (0.8nm) parce qu'il permet de surmonter les effets non-linéaires par rapport à l'espacement 25GHz (0.2 nm) qui présente un espacement plus serré entre les canaux ainsi qu'une sensibilité à la dispersion et les effets non linéaire.

Le travail fait dans ce mémoire constitue un point de départ pour n'importe quel travail en future dans un réseau FTTH et dans ce cas plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour les futurs travaux telle que l'étude comparative entre le système hybride TWDM-PON utilisé dans notre mémoire et les autres systèmes hybrides existant tel que l'OCDMA/WDM-PON, l'OTDM/OCDMA-PON afin de sécuriser le réseau PON, d'augmenter le nombre d'utilisateurs.



## Références bibliographiques

- [1] Alain COZANNET, Henri MAITR, Jacques FLEURET, Michel ROUSSEAU, « Optique et télécommunication », Eyrolles, paris 1983.
- [2] Maxime Blondet , « Tout savoir sur la fibre optique en 10 questions », France, 2022.
- [3] G. Rimal, « Transmissions des télécommunications ».
- [4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre\\_optique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique).
- [5] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fibra\\_optica.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fibra_optica.svg).
- [6] H Lee, GP Agrawal, « Optics Express », 2003.
- [7] T.H. Maiman, « Stimulated optical radiation in ruby ».
- [8] C Headley, GP Agrawal, « Raman amplification in Fiber Optical communication systems », 2005.
- [9] Revue de école nationale des postes et télécommunication « Technologie de la fibre optique », Département Télécommunication - laboratoire de transmission Mars 2004.
- [10] Pierre-André, Bélanger, « Les Fibres Optiques–Supplément d’électromagnétisme appliqué », Université Laval - Canada.
- [11] F.BRIK, Support de cours : « Optoélectronique », 2017.
- [12] Tout savoir sur la fibre optique et ses composants – Azenn. <https://www.azenn.com>.
  
- [13] Govind P Agrawal, « Application of Fiber Optics », Academic press, 2001.
- [14] H.Apithy, Y.Bouslimani et H.Hamam « Communication à fibre optiques : limitation causés la dispersion et les effets non linéaires », Opt. Communication IEEE canadian review– Summer/Été, 2004.
- [15] <http://igm.univ-mlv.fr>
  
- [16] Pierre LECOY, « Télécom Sur Fibres Optiques. (2<sup>ème</sup> Édition revue et augmentée) », Paris, 1992, 1997.
  
- [18] Mme. ARRIBI Meriem, Melle. ELMAHI Aicha, «La technique WDM en télécoms optiques avancées», 2015.
  
- [17] Z.SIDI ALI MEBAREK, «Télécommunications optiques (sources, fibres et détecteurs)».

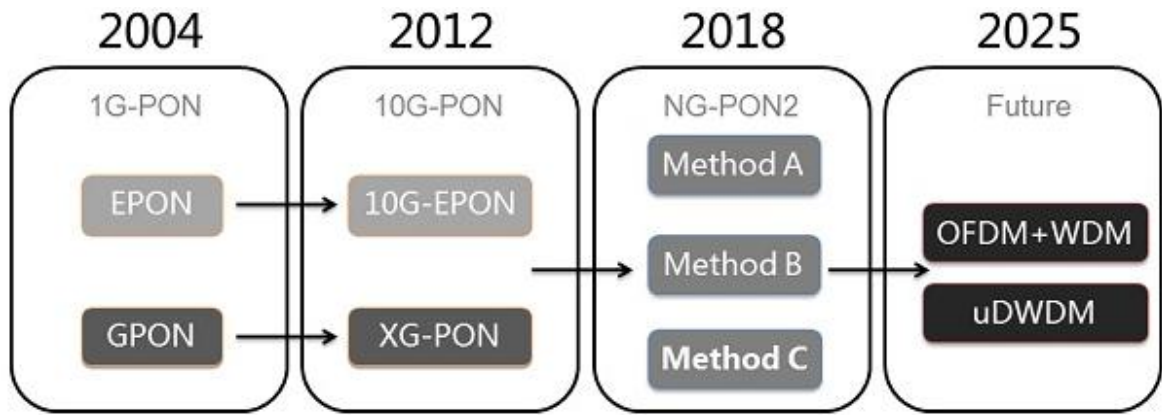
- [19] MERZOUK. K, « Etude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage temporel », Institut Polytechnique de Grenoble
- [20] Asif shaik « multiplexing-definition-types of multiplexing FDM-WDM-TDM ».
- [21] Worton « Technologie WDM de base : CWDM et DWDM » Oct.12, 2021.
- [22] K. Uchiyama, H. Takara, K. Mori, and T. Morioka, «160 Gbit/s all optical time-division demultiplexing utilising modified multiple-output OTDM demultiplexer (MOXIC)», Lett, Sep. 2002.
- [23] Hoshida takeshi, Choudhary seemant, Vassilieva olga, J. stalford Terry, « SYSTEME ET PROCEDE DE MULTIPLEXAGE TEMPOREL OPTIQUE (OTDM) A HAUT DEBIT», 18.03.2004.
- [24] A. Fayad, Q. Alqazaly, T. Cinkler « Time and Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network Comparative Analysis: Modulation Formats and Channel Spacings », International Journal of Electronics and Communication Engineering.
- [25] Mathieu le François « étude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s », Université paris sud - paris xi, Français, 2007.
- [26] Oriol Bertran-Pardo, « On coherent detection for optical transmissions at 40 Gb/s and 100 Gb/s », 2010.
- [27] Sunita P. Ugale, V. Mishra, « Modeling and characterization of fiber Bragg grating for maximum reflectivity », Optic, 1990 – 1993.
- [28] Keiser, John Wiley & Sons, « FTTX concepts and applications, 2006.
- [29] Sarah Benameur « La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable », 2015.
- [30] Cédric WARE, « Conception, fabrication et évaluation de modulateurs déportés pour les réseaux d'accès et radio sur fibre », 07.oct. 2011.
- [31] L. Beygi, « Coded Modulation Techniques in Fiber Optical communication », 2010.
- [32] L Djogbe, MMC Agossou, P Sotindjo, « Modélisation et simulation d'un PON (passive

Optical Network) base sur la technologie hybride WDM/TDM », 2015.

- [33] D. Nessel, « NG-PON2 Technology and Standards », J. Light. Techno, 2015.
- [34] « EPON: Design and Analysis of an Optical Access Network », University of California, 2000.
- [35] Kramer, Glen; Mukherjee, Biswanath; Pesavento, Gerry, « Ethernet PON ».
- [36] Monroy, E Tangdionga « Crosstalk in WDM communication networks », 2002.
- [37] Worton, « WDM-PON vs GPON vs XG-PON », 12.oct.2021.

**Annexe : Évaluation FTTH – XPON**

L'illustration suivante présente l'évaluation XPON.



Le tableau suivant explique différentes méthodes d'évaluation XPON.

|           | <b>Mode multiplex</b> | <b>Technologie typique</b> |          |
|-----------|-----------------------|----------------------------|----------|
| Méthode A | TDM                   | 40G TDM PON                | OFDM PON |
| Méthode b | WDM                   | PtP WDM                    |          |
| Méthode c | TDM + WDM             | 40G TWDM PON               | NG-EPON  |

Après le développement de GPON, FSAAN et ITU-T ont commencé à travailler sur NG-PON avec les fonctionnalités suivantes:

- Produit à faible coût.
- Grande capacité.
- Large couverture.
- Rétrocompatibilité.

Les réseaux NG-PON sont divisés en deux phases par la FSAN en fonction de la demande actuelle en applications et de la technologie NG PON1 - NGPON1 est rétro-compatible avec les ODN GPON hérités. NG-PON1 possède un système 10G asymétrique avec une vitesse de téléchargement / amont de 10G et une vitesse de téléchargement / amont de 2,5G. Ce NG PON1 est un système TDM PON amélioré de GPON.

## Annexe

---

NG PON2 - NGPON2 est une évaluation à long terme des PON, qui peut prendre en charge et être déployée sur les nouveaux ODN.

Il existe de nombreuses façons de développer NG-PON2, contrairement à NG-PON1, pour améliorer le débit de bande passante de 10G à 40G -

Utilisation de la technologie TDM identique à celle utilisée pour NG-PON1.

WDM PON (utilisant le multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière (CWDM) ou le multiplexage par répartition en longueur d'onde dense (DWDM).

PON ODSM (TDMA + WDMA).

OCDMA PON (utilisant la technologie CDMA).

O-OFDMA PON (utilisant la technologie FDMA).

## Annexe

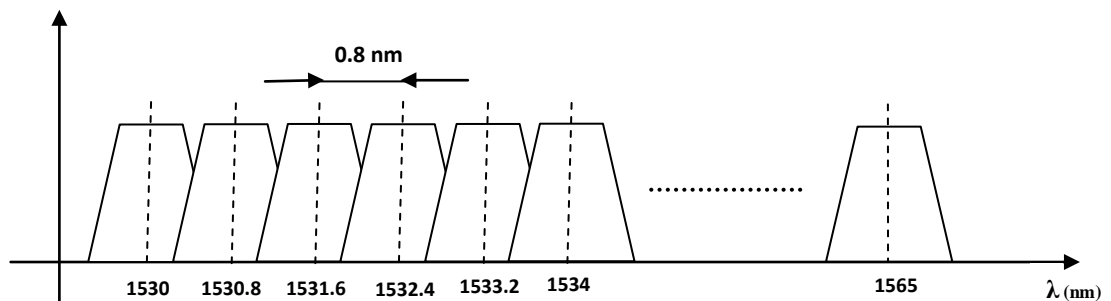
L'ITU (International Télécommunication Union) spécifie 40 longueurs d'ondes DWDM allant de 1530 nm à 1565 nm où (196 GHz à 192 GHz). Les fréquences sont espacées de 100 GHz (soit approximativement 0.8 nm), et dans le Ultra-WDM les fréquences sont espacées de 25GHz où (0.2nm) ce qui autorise 250 longueurs d'onde dans la bande 1625–1675 nm.

Théoriquement l'espacement est obtenue par le calcul ci-dessous :

### **Multiplexage DWDM (*Dense-WDM*) :**

Largeur de la bande = 1565 – 1530 = 35 nm.

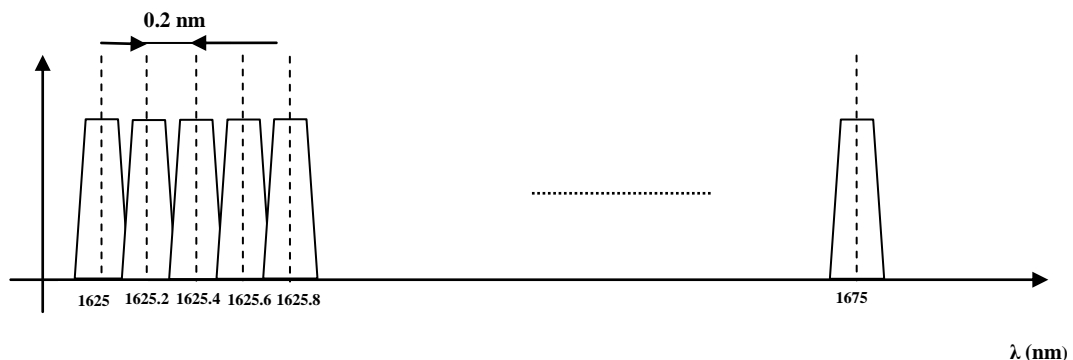
$$\text{Espacement} = \frac{35}{40} = 0.8 \text{ nm.}$$



### **Multiplexage Ultra-WDM:**

Largeur de la bande = 1675 – 1625 = 50 nm.

$$\text{Espacement} = \frac{50}{250} = 0.2 \text{ nm.}$$



On peut faire le même travail en fréquence.