

# Table des matières

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| Remerciements.....          | i   |
| Table des matières.....     | ii  |
| Sigles et abréviation ..... | iii |
| Liste des figures .....     | iv  |

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Introduction Générale..... | 2 |
|----------------------------|---|

## Chapitre I : chaine de transmission optique

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                                   | 5  |
| I. Généralité sur les transmissions optiques.....                   | 5  |
| I.1. Le bloc émetteur .....                                         | 5  |
| I.1.1. La source optique.....                                       | 6  |
| a. La diode DEL.....                                                | 6  |
| b. La diode laser .....                                             | 7  |
| I.1.2. Le modulateur.....                                           | 8  |
| a. Modulation directe .....                                         | 8  |
| b. Modulation externe .....                                         | 9  |
| ➤ Le modulateur Mach zehnder .....                                  | 10 |
| ➤ Le modulateur électro-absorbant (MEA).....                        | 11 |
| ➤ conclusion .....                                                  | 11 |
| I.2. Le bloc récepteur .....                                        | 12 |
| I.2.1. Photodiode PIN .....                                         | 12 |
| I.2.2. Photodiode APD (avalanche photo diode).....                  | 13 |
| I.3. Généralité sur la fibre optique .....                          | 13 |
| I.3.1 Définition d'une fibre optique .....                          | 14 |
| I.3.2 Mode de guidage dans une fibre optique .....                  | 14 |
| I.3.3. Les différents types de fibre optique.....                   | 15 |
| a. Les fibres optiques monomodes .....                              | 15 |
| b. Les fibres optiques multimodes.....                              | 16 |
| ➤ La fibre a saut d'indice.....                                     | 16 |
| ➤ La fibre a gradient d'indice.....                                 | 16 |
| I.3.4. Les limitations physique liée à la fibre .....               | 17 |
| a. Affaiblissements dans les fibres optiques.....                   | 17 |
| b. La dispersion dans la fibre optique.....                         | 18 |
| 1. La dispersion intermodale .....                                  | 18 |
| ➤ La dispersion intermodale dans la fibre monomode.....             | 18 |
| ➤ La dispersion intermodale dans la fibre a saut d'indice .....     | 18 |
| ➤ La dispersion intermodale dans la fibre a gradient d'indice ..... | 18 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2. La dispersion chromatique .....                                                | 18 |
| I.3.5. Les avantages et les inconvénients de la fibre optique .....               | 19 |
| a. Les avantages .....                                                            | 19 |
| b. Les inconvénients.....                                                         | 19 |
| I.3.6. Les amplificateurs optiques.....                                           | 20 |
| a. Amplificateur optique a semi-conducteur (AOSC).....                            | 20 |
| b. Amplificateur optique a fibre dopée (EDFA, Erbium doped fiber amplifieur)..... | 21 |
| c. Amplificateur Raman .....                                                      | 21 |
| I.3.7. Les fibres de compensation .....                                           | 22 |
| Conclusion .....                                                                  | 22 |

## **Chapitre II : Les lasers à semi conducteur**

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                                                | 24 |
| II.1 Historique .....                                                            | 24 |
| II.2 Principe de base d'un laser a S-C .....                                     | 25 |
| II.2.1 Résonateur optique .....                                                  | 25 |
| II.2.2 Emission laser : étude du milieu actif des lasers a semi-conducteur ..... | 26 |
| II.2.2.1 Fonctionnement du milieu actif des lasers a semi-conducteur.....        | 26 |
| II.2.2.2 L'effet photoélectrique dans un semi-conducteur.....                    | 27 |
| a. Absorption.....                                                               | 27 |
| b. Emission spontanée.....                                                       | 28 |
| c. Emission stimule .....                                                        | 28 |
| d. Inversion de population .....                                                 | 29 |
| II.2.3 La source de pompage .....                                                | 30 |
| II.3. Différents type lasers SC .....                                            | 31 |
| II.3.1 Lasers a hétérojonctions double (DHS) .....                               | 31 |
| II.3.2 Laser SC homojonctions .....                                              | 31 |
| II.3.3 Laser Fabry-pérot .....                                                   | 32 |
| II.3.4 Laser DFB .....                                                           | 33 |
| II.3.5 Laser DBR .....                                                           | 34 |
| II.4 Application des lasers SC dans le domaine de télécommunications... ..       | 34 |
| II.4.1 Liaison optique long distance .....                                       | 34 |
| II.5 Gain d'un laser a semi-conducteur .....                                     | 36 |
| II.5.1 Puissance émise d'un laser à semi-conducteur.....                         | 36 |
| II.5.2 Rendement quantique d'un laser à semi-conducteur .....                    | 37 |
| II.6 Débit de la transmission long distance .....                                | 38 |
| Conclusion .....                                                                 | 38 |

## **Chapitre IV : Résultats et Interprétations**

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                 | 40 |
| III.1 Présentation de logiciel optisystem .....   | 40 |
| III.2 Application du logiciel optisystem .....    | 41 |
| III.3 Avantage du logiciel optisystem.....        | 41 |
| III.4 Critères de qualité d'une transmission..... | 41 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| III.4.1 Le taux d'erreur binaire.....                               | 41 |
| III.4.2 Le facteur de qualité.....                                  | 42 |
| III.4.3 Le diagramme de l'œil .....                                 | 42 |
| III.5 Présentation de la liaison.....                               | 42 |
| III.5.1 Module d'émission.....                                      | 43 |
| III.5.1.1 Générateur binaire .....                                  | 43 |
| III.5.1.2 Générateur NRZ .....                                      | 43 |
| III.5.1.3 Le laser (CW laser).....                                  | 43 |
| III.5.1.4 Le modulateur externe .....                               | 43 |
| III.5.2 Support de transmission .....                               | 44 |
| III.5.3 Module de réception.....                                    | 44 |
| III.5.3.1 Amplificateur EDFA .....                                  | 44 |
| III.5.3.2 Le Photodiode PIN .....                                   | 44 |
| III.5.3.3 Filtre de Bessel passe bas .....                          | 44 |
| III.6 Résultats et interprétations .....                            | 44 |
| III.6.1 Effet de variation de la puissance émise par le laser.....  | 45 |
| III.6.2 Effet de variation de la longueur de la fibre monomode..... | 46 |
| III.6.3 Effet du laser dans la liaison optique .....                | 47 |
| Conclusion .....                                                    | 48 |
| Conclusion Générale .....                                           | 49 |
| Bibliographie.....                                                  | 50 |

---

**Sigles et abréviations****A**

|             |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>APD</b>  | <b>A</b> valanche <b>P</b> hotodiode.                                    |
| <b>ATM</b>  | <b>A</b> synchronous <b>T</b> ransfer <b>M</b> ode.                      |
| <b>AOSC</b> | <b>A</b> mplificateur <b>O</b> ptique à <b>S</b> emi- <b>C</b> onducteur |
| <b>ASE</b>  | <b>A</b> mplifier <b>S</b> pontaneous <b>E</b> mission.                  |

**B**

|            |                                         |
|------------|-----------------------------------------|
| <b>BER</b> | <b>B</b> it <b>E</b> rror <b>R</b> ate. |
|------------|-----------------------------------------|

**C**

|             |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>CWDM</b> | <b>C</b> oarse <b>W</b> avelength <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing. |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|

**D**

|            |                                                                         |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>DCF</b> | <b>D</b> ispersion <b>C</b> ompensating <b>F</b> iber.                  |
| <b>DEL</b> | <b>D</b> iode <b>E</b> lectroluminescent.                               |
| <b>DFB</b> | <b>D</b> istributed <b>F</b> eed- <b>B</b> ack.                         |
| <b>DBR</b> |                                                                         |
| <b>DL</b>  | <b>D</b> iode <b>L</b> aser.                                            |
| <b>DSF</b> | <b>D</b> ispersion <b>S</b> hifted <b>F</b> iber.                       |
| <b>DSF</b> | <b>D</b> ense <b>W</b> avelength <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing. |
| <b>DHS</b> | <b>H</b> étéro-jonctions double                                         |
| <b>DDP</b> | <b>D</b> ifférence <b>D</b> e <b>P</b> otentiel                         |

**E**

|             |                                                                        |
|-------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>EDFA</b> | <b>E</b> rbium <b>D</b> oped <b>F</b> iber <b>A</b> mplifier.          |
| <b>ETDM</b> | <b>E</b> lectronic <b>T</b> ime <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing. |

**I**

|            |                                                                |
|------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>ITU</b> | <b>I</b> nternational <b>T</b> elecommunication <b>U</b> nion. |
|------------|----------------------------------------------------------------|

**N**

|           |                               |
|-----------|-------------------------------|
| <b>NF</b> | <b>N</b> oise <b>F</b> igure. |
|-----------|-------------------------------|

---

|            |                                          |
|------------|------------------------------------------|
| <b>NRZ</b> | <b>Non Return to Zero.</b>               |
| <br>       |                                          |
| <b>M</b>   |                                          |
| MZM        | Modulateur Mach-Zehnder                  |
| MEA        | Modulateur Electro-Absorbant             |
| <br>       |                                          |
| <b>O</b>   |                                          |
| OTDM       | Optical Time-Division Multiplexing.      |
| OSNR       | Optical Signal-to-Noise Ratio.           |
| <br>       |                                          |
| <b>P</b>   |                                          |
| PIN        | Positive Intrinsic Negative Photodiodes. |
| PDA        | Photo Diode Avalanche                    |
| PMD        | Polarization Mode Dispersion.            |
| PN         | Positive Negative Photodiodes.           |
| <br>       |                                          |
| <b>S</b>   |                                          |
| SCOA       | Semi-Conductor Optical Amplifier.        |
| SDH        | Synchronous Digital Hierarchy.           |
| SMF        | Single Mode Fiber.                       |
| SPM        | Self Phase Modulation.                   |
| <br>       |                                          |
| <b>T</b>   |                                          |
| TDM        | Time Division Multiple.                  |
| TEB        | Taux d'Erreur Binaire                    |
| <br>       |                                          |
| <b>V</b>   |                                          |
| VCSEL      | Vertical Cavity Surface Emitting Laser.  |
| <br>       |                                          |
| <b>W</b>   |                                          |
| WDM        | Wavelength Division Multiplexing.        |

# Liste des Figures

## Chapitre I

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.1. Synoptique général d'un système de communications par fibre optique ..... | 5  |
| Figure 1.2. Principe de la diode électroluminescente .....                            | 6  |
| Figure 1.3. Spectre d'émission d'un DL .....                                          | 7  |
| Figure 1.4. Schémas de principe de laser .....                                        | 8  |
| Figure 1.5. Modulation directe. ....                                                  | 9  |
| Figure 1.6. Modulation externe .....                                                  | 9  |
| Figure 1.7. Interféromètre mach-zehnder.....                                          | 10 |
| Figure 1.8. Photodiode PIN. ....                                                      | 12 |
| Figure 1.9. Photodiode APD.....                                                       | 13 |
| Figure 1.10. Structure de la fibre.....                                               | 14 |
| Figure 1.11. Transmission d'une fibre optique.....                                    | 14 |
| Figure 1.12. Ouverture numérique d'une fibre optique .....                            | 15 |
| Figure 1.13. La fibre monomode.....                                                   | 15 |
| Figure 1.14. Fibres multimodes à saut d'indice.....                                   | 16 |
| Figure 1.15. Fibre à gradient d'indice.....                                           | 16 |
| Figure 1.16. L'affaiblissement d'une fibre optique.....                               | 17 |
| Figure 1.17. Les différentes causes de l'affaiblissement .....                        | 17 |
| Figure 1.18. Schéma d'un amplificateur semi-conducteur.....                           | 20 |
| Figure 1.19. Exemple d'un amplificateur optique a fibre dopée erbium.....             | 21 |

## Chapitre II

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.1. Principe de fonctionnement de laser.....                                                               | 25 |
| Figure II.2. Type de cavité .....                                                                                   | 26 |
| Figure II.3. La jonction P-N dans un laser .....                                                                    | 27 |
| Figure II.4. Représentation schématique des transitions électroniques possibles dans un modèle à deux niveaux ..... | 29 |
| Figure II.5. Inversion de population.....                                                                           | 30 |
| Figure II.6. Niveaux d'énergie des ions Er Dans la Silice.....                                                      | 31 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.7. Structure de DHS .....                                                 | 31 |
| Figure II.8. Structure de laser homojonctions .....                                 | 32 |
| Figure II.9. Structure d'une diode laser à une cavité de résonance Fabry-Pérot..... | 32 |
| Figure II.10. Structure des lasers DFB, DBR.....                                    | 34 |
| Figure II.11. Propagation optique ou électrique de l'information ? .....            | 35 |
| Figure II.12 application du laser aux télécommunications optique.....               | 36 |
| Figure II.13 caractéristique de spectre de gain .....                               | 36 |

## Chapitre III

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III.1. Schéma de l'interface optisystem .....                                               | 40 |
| Figure III.2. Schéma d'une liaison optique point à point .....                                     | 43 |
| Figure III.3. Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance émise par laser .....    | 45 |
| Figure III.4. Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance émise par le laser..  | 46 |
| Figure III.5. Variation de facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre .....         | 46 |
| Figure III.6. Variation de taux d'erreur binaire en fonction de la longueur de la fibre .....      | 47 |
| Figure III.7. Variation de facteur de qualité en fonction de la puissance émise par le laser ..... | 47 |
| Figure III.8. Variation de taux d'erreur en fonction de la puissance émise par le laser .....      | 48 |

Il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à un débit de 270 Mbits/s, le câble coaxial était parfaitement à même de remplir son rôle de support de transmission. Mais avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, et une alternative au câble coaxial était à trouver : pertes trop élevées, courtes distances de propagation, performances limitées.

La fibre optique remplit très bien ce rôle de support de transmission. Son utilisation est désormais courante dans les réseaux de télécommunications. La possibilité de transporter de la lumière le long de fines fibres de verre fut exploitée au cours de la première moitié du XXe siècle. En 1927, Baird et Hansell tentèrent de mettre au point un dispositif d'images de télévision à l'aide de fibres. Hansell a pu faire breveter son invention, mais elle ne fut jamais vraiment utilisée.

La première application fructueuse de la fibre optique eut lieu au début des années 1950, lorsque le fibroscope flexible fut inventé par van Heel et Hopkins. Cet appareil permettait la transmission d'une image le long de fibres en verre. Il fut particulièrement utilisé en endoscopie, pour observer l'intérieur du corps humain, et pour inspecter des soudures dans des réacteurs d'avion. Malheureusement, la transmission ne pouvait pas être faite sur une grande distance étant donnée la mauvaise qualité des fibres utilisées.

Les télécommunications par fibre optique ne furent pas possibles avant l'invention du laser en 1960. Le laser offrit en effet l'occasion de transmettre un signal avec assez de puissance sur une grande distance. Dans sa publication de 1964, Charles Kao (Standard Télécommunications Laboratoires) décrivit un système de communication à longue distance et à faible perte en mettant à profit l'utilisation conjointe du laser et de la fibre optique. Peu après, soit en 1966, il démontra expérimentalement, avec la collaboration de Georges Hockman, qu'il était possible de transporter de l'information sur une grande distance sous forme de lumière grâce à la fibre optique. Cette expérience est souvent considérée comme la première transmission de données par fibre optique.

Cependant, les pertes dans une fibre optique étaient telles que le signal disparaissait au bout de quelques centimètres, non par perte de lumière, mais parce que les différents chemins de réflexion du signal contre les parois finissaient par en faire perdre la phase. Cela la rendait peu avantageuse par rapport au fil de cuivre traditionnel. Les pertes de phase, entraînées par l'usage d'une fibre de verre homogène, constituaient le principal obstacle à l'utilisation courante de la fibre optique.

En 1970, trois scientifiques de la compagnie Corning Glass Works de New York, Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck, produisirent la première fibre optique avec des variations de phase suffisamment faibles pour être utilisée dans les réseaux de télécommunications (20 décibels par kilomètre ; aujourd'hui la fibre conventionnelle affiche des pertes de moins de 0,25 décibel par kilomètre pour la longueur d'onde 1550 nm utilisée



dans les télécommunications). Leur fibre optique était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'informations qu'un simple câble de cuivre, ce qui correspondait au rapport des longueurs d'onde utilisées.

En 1977 le premier système de communication téléphonique optique fut installé. On estime qu'aujourd'hui plus de 80 % des communications à longue distance sont transportées le long de plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques partout dans le monde.

Mais aujourd'hui, l'essor de l'Internet est tel que l'évolution des systèmes de télécommunications tend toujours vers une augmentation des capacités de transmission. La difficulté majeure ne réside plus vraiment sur le support, possédant une large bande passante et de faibles atténuations, mais sur les modules d'émission et de réception, regroupant l'électronique rapide et les fonctions optoélectroniques.

le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique. Ainsi la diode laser est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre.

La partie émission d'une liaison optique est composée de divers éléments (laser, modulateur, driver). Son rôle est de délivrer au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données.

La théorie du laser à semi-conducteurs est relativement complexe car elle fait intervenir des notions de physique du solide, d'électromagnétisme et d'optique guidée; d'un point de vue pratique, un laser à semi-conducteur est essentiellement un dispositif à semi-conducteur ayant la capacité d'émettre une lumière cohérente.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre nous décrivons le principe d'une liaison par la fibre optique. Nous verrons ensuite les principaux composants de l'émetteur et du récepteur. Nous évaluons aussi les caractéristiques de chaque composant présenté, en illustrant les principes de fonctionnement du système global. Pour finir ce chapitre nous verrons les avantages et les inconvénients des fibres optiques.

Le second chapitre nous allons présenter une étude générale sur les lasers à semi-conducteur (principe de fonctionnement et les différents types de laser à semi-conducteur) ainsi l'application de laser à semi-conducteur dans le domaine de télécommunications.

Le troisième chapitre, a pour objectif de présenter le logiciel de simulation optisystem qu'on a utilisé pour les mesures de notre liaison et l'étude détaillée de bloc d'émission, cela nous a été d'un grand aide pour connaître les performances de laser en terme de, longueur de la fibre, la puissance émise par le laser.

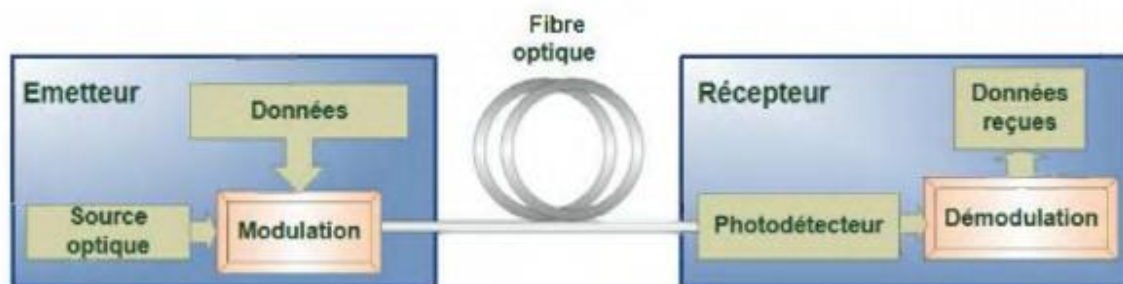
**Chapitre I**  
***CHAINE DE***  
***TRANSMISSION OPTIQUE HAUT DEBIT***

## Introduction

L'utilisation de la lumière comme moyen de communication remonte à l'antiquité. Des civilisations antérieures ont utilisé des signaux visuels, qu'on pourrait qualifier d'optiques, pour transmettre des messages. En 1792, Claude CHAPPE proposa un système qui consiste à transmettre mécaniquement des signaux codés sur des distances avoisinant les 100 Km, le rôle de la lumière se résumait simplement à rendre ces signaux visibles. Les études ont montré à partir de la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle, que le confinement de la lumière dans un milieu directeur, pouvait être un moyen de transmission efficace. L'invention de la source laser permit alors une exploration des performances que les systèmes de communications optiques pouvaient offrir en termes de débit et de distance entre répéteurs. Dans ce chapitre nous allons présenter une chaîne de transmission optique et détailler les différents blocs qui la composent

## I. Généralités sur les transmissions optiques

Comme tous les systèmes de communications, les liaisons optiques se basent sur trois blocs fondamentaux pour effectuer le transfert de l'information : l'élément d'émission, le canal de communication et le récepteur. La particularité de ce système provient des éléments utilisés pour effectuer le transport de l'information. Le bloc d'émission est constitué d'un dispositif diode laser ou source laser qui permet de convertir un signal sinusoïdal électrique en un signal optique. Le canal de transmission (la fibre optique) transporte une porteuse optique modulée contenant l'information. Enfin, le récepteur (le photodétecteur) récupère le signal électrique véhiculé en opérant une conversion optique-électrique.



*Figure I.1 : Synoptique général d'un système de communications par fibre optique*

### I.1 Le bloc émetteur

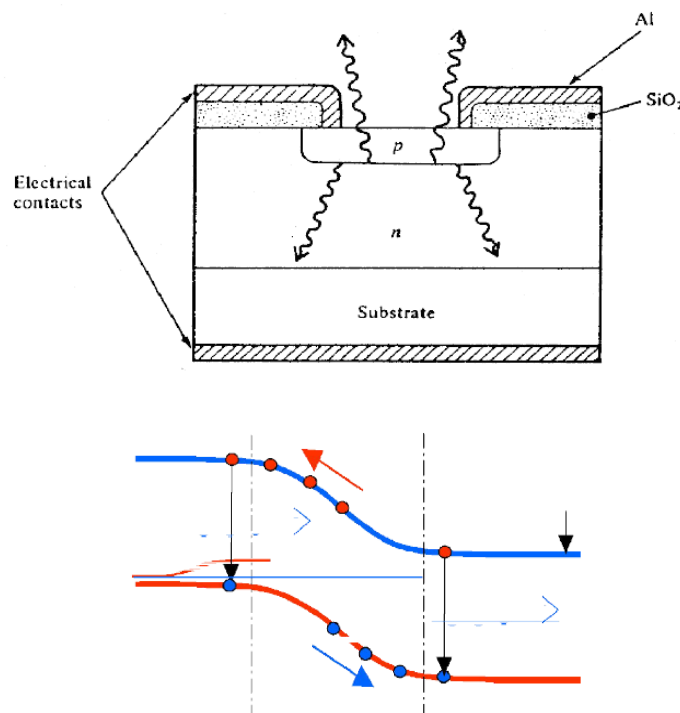
Les facteurs essentiels qui conditionnent le choix d'un émetteur pour télécommunication par fibre optique sont, le spectre d'émission, qui doit correspondre aux fenêtres de transparence et de faible dispersion de la fibre utilisée, la possibilité de modulation du rayonnement émis, et la réalisation d'un couplage efficace émetteur - fibre. Les fibres optiques de silice sont caractérisées par des fenêtres centrées à 1.3 à 1.55 $\mu$  que nous verrons dans le deuxième chapitre, et des diamètres qui varient entre plusieurs centaines de microns et quelques microns. Les sources doivent par conséquent émettre un rayonnement modulable, centré sur

l'une de ces longueurs d'onde, et avoir une surface active de faible dimension. En conséquence les diodes électroluminescentes et les diodes lasers sont particulièrement bien adaptées. Comparativement aux diodes lasers, les diodes électroluminescentes sont plus facilement modulables, ont une meilleure durée de vie et sont beaucoup moins chères. Par contre, les diodes lasers ont une surface émettrice plus faible, ce qui permet d'utiliser des fibres de plus petite section et par la suite de diminuer la dispersion inter mode. D'autre part, le rayonnement émis par une diode laser est pratiquement monochromatique, plus puissant et moins divergeant, ce qui augmente le rendement du couplage émetteur - fibre. [2]

### I.1.1 La source optique

#### a. la diode DEL

Lorsqu'une jonction PN est polarisée dans le sens direct, les électrons, qui sont majoritaires dans la région de type n, sont injectés dans la région de type p où ils se recombinent avec les trous. Inversement pour les trous, la structure de base d'une diode Électroluminescente, LED (Light Emitting Diode) est une jonction PN réalisée à partir de Semi-conducteurs dans lesquels les recombinaisons des porteurs excédentaires sont essentiellement radiatives. La structure type d'une diode électroluminescente et son principe de fonctionnement sont représentés sur la figure (I.2)



*Figure I.2 : Principe de la diode électroluminescente*

Une tension de polarisation directe fixe la séparation des niveaux de Fermi. Les recombinaisons des porteurs excédentaires se manifestent dans trois régions différentes qui sont d'une part la zone de charge d'espace, et d'autre part les régions neutres n et p. Dans

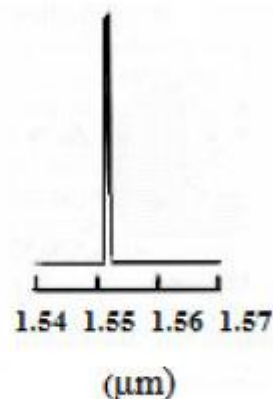
chacune de ces dernières, la zone émettrice est limitée à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. La zone de charge d'espace joue un rôle mineur dans la mesure où elle est très étroite en raison du fait que la jonction est fortement polarisée dans le sens direct. La mobilité des électrons étant beaucoup plus grande que celle des trous, le taux d'injection d'électrons dans la région de type p est plus important que le taux d'injection de trous dans la région de type p. C'est la raison pour laquelle cette région constitue la face émettrice dans la structure. Il faut ajouter que pour des raisons d'intensité d'émission, les régions n et p de la diode sont très dopées. Ces dopages importants se traduisent par une diminution du gap que l'on peut montrer qu'elle est plus importante dans la région p que dans la région n. Cette différence de gap favorise encore l'injection d'électrons par rapport à celle de trous.

Le spectre (type de longueur d'onde), c'est-à-dire la couleur du rayonnement émis par une diode électroluminescente, est évidemment conditionné par le gap du matériau de type p, dans lequel se produit l'essentiel des recombinaisons radiatives. Dans la mesure où certaines transitions mettent en jeu des niveaux d'impuretés, le spectre d'émission est aussi conditionné par le type de dopant.

Les différents matériaux utilisés à l'heure actuelle permettent de couvrir pratiquement tout le spectre visible.

### b. La diode laser

Laser est l'acronyme anglais de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (en français, amplification de la lumière par émission stimulée de radiations). La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, elle est caractérisée par : une faible largeur spectrale et une bande passante importante. Le spectre est monomode longitudinal (voir figure I.3) [3].



*Figure I.3 : Spectre d'émission d'un DL*

Le laser est composé de trois éléments essentiels (voir figure I.4) :

- Le milieu actif.
- La pompe : source énergétique qui réalise l'inversion de population.
- La cavité, limitée par deux surfaces, l'une réfléchissante presque à 100%, l'autre à 98% de façon à laisser sortir le faisceau laser [3].

Cette cavité forme, avec le milieu actif, un amplificateur

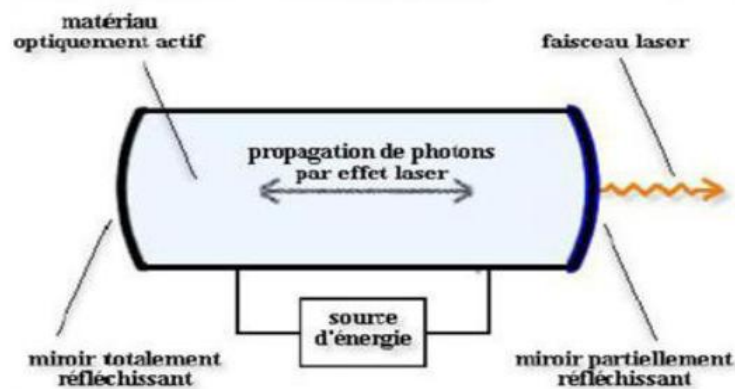


Figure I.4 : Schémas de principe de laser

Les lasers utilisent l'émission stimulée. On provoque, par l'intermédiaire d'un courant à haute densité, un important excès de porteurs qui rend possible une forte émission stimulée.

Cet effet d'amplification est dû à une avalanche de photons [3]

La diode laser représente les caractéristiques suivantes :

- La source DL est cohérente et monochromatique.
- Largeur de spectre étroite, et la bande passante qui atteint quelques gigahertz
- Diagramme de rayonnement directif (émissions se font dans la même direction)
- Utilisée dans les systèmes de transmission à grand distance
- La densité de courant de seuil est de quelque dizaine de milliampères

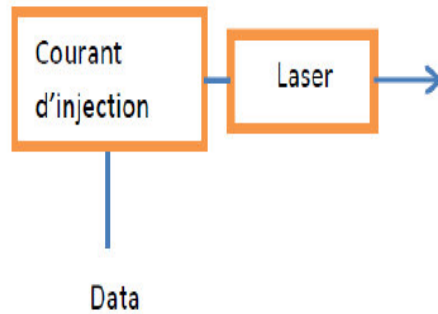
### I.1.2. Le modulateur

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer cette information sur un signal physique à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation, qui est une fonction essentielle de tout système de transmission. Pour réaliser la modulation, on a deux possibilités :

#### a. Modulation directe

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement : la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée modulation directe. Ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser.

La modulation directe connaît beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en œuvre. Un inconvénient majeur de cette méthode est que lorsqu'on module en amplitude le courant d'injection d'un laser cette opération s'accompagne d'une modulation de fréquence parasite ou chirp. Ces effets, conjugués à la dispersion chromatique de la fibre, provoquent un élargissement de l'impulsion d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande (voir figure I.5) [3]



*Figure I.5 : Modulation directe*

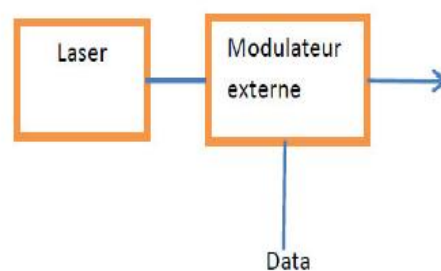
### **b. Modulation externe**

Les propriétés des diodes lasers vues précédemment font que la modulation directe est satisfaisante jusqu'à 5 Gigahertz environ mais qu'au-delà, cette méthode n'est plus applicable. Trop de dégradations (oscillations de relaxation, chirp, bruit, ...) apparaissent et limitent les capacités de transmission. La modulation externe est une bonne alternative permettant au laser d'émettre un signal constant. Et tous les défauts dus à la modulation du courant de polarisation seront atténués.

Elle consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents sur le signal optique.

La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable : le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe  $v(t)$ , modulée et représentative de l'information à transmettre. Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon  $v(t)$

La modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc d'envoyer des débits plus élevés (voir figure I.6) [3]



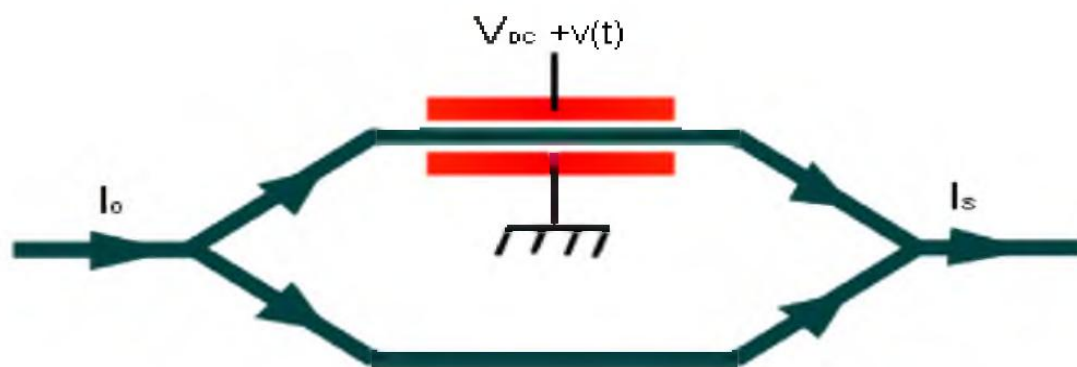
*Figure I.6 : modulation externe*

Plusieurs types de modulateurs sont disponibles, en particulier nous nous intéresserons au modulateur Mach-Zehnder et au modulateur électro-absorbant.

➤ **Le modulateur Mach-Zehnder**

Les effets électro-optiques sont la base de ces types de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique, variant selon la modulation des données [8].

Le modulateur Mach-Zehnder (MZM) est, dans sa version la plus simple, un interféromètre constitué généralement d'un bras de référence et d'un bras dans lequel une variation de phase est induite par effet électro-optique (variation de l'indice de réfraction du cristal). Ces deux bras sont deux guides optiques parallèles et de longueurs égales. Si aucune tension n'est appliquée aux guides d'ondes, la lumière incidente est divisée de manière égale entre les deux bras de l'interféromètre. La recombinaison des ondes provenant des bras conduit à une figure d'interférence.



*Figure I.7 : Schéma simplifié d'un modulateur de Mach-Zehnder*

La technique utilisée pour moduler l'amplitude d'un faisceau consiste à lui faire traverser un interféromètre de Mach-Zehnder (Figure I.7) dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras.

La lumière est couplée dans deux guides par un embranchement en Y. Les deux faisceaux se recombinaient ensuite dans un deuxième embranchement en Y. L'indice de réfraction du matériau électro-optique, placé sur l'un des bras de l'interféromètre, est modifié par l'application d'une tension, entraînant ainsi un déphasage entre les deux faisceaux. Suivant leur différence de marche (phase relative), les deux faisceaux interfèrent de manière constructive (toute la puissance optique est disponible en sortie), ou destructive (aucune lumière n'est injectée dans le guide de sortie). Entre ces deux extrêmes, tous les états intermédiaires sont possibles et la modulation de la lumière reproduit celle de la tension appliquée.

L'absence de modulation de phase parasite évite ainsi tout problème de transmission lié au chirp.

L'interféromètre de MZM constitue donc un modulateur d'intensité. En utilisant ce type de composant, il est possible de réaliser un émetteur optique par modulation d'amplitude. L'intensité à la sortie peut être de façon générale, représentée par



$$\frac{I_{out}}{I_{int}} = \cos^2 \left( \frac{\pi V}{2V_{\pi}} \right) \quad (I.1)$$

$V$  : est la tension appliquée au borne des électrodes

$V_{\pi}$  : est la tension demi-onde du modulateur MZM, c'est la tension pour laquelle on a une sortie nulle.

Les modulateurs de Mach-Zehnder commercialisés sont en très grande majorité réalisés sur des substrats LiNbO3 qui permettent de réaliser des guides à très faibles pertes (< 0,2 dB/cm) [8].

#### ➤ **Le modulateur électro-absorbant (MEA)**

Le principe de fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur soumis à un champ électrique. Leur particularité intéressante est qu'ils peuvent être facilement intégrés avec les diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation.

Les performances dépendent du matériau utilisé (massif ou à puits quantiques). Les dispositifs dont le guide est formé de puits quantiques permettent d'obtenir une efficacité d'électro-absorption par unité de longueur plus importante et une bande passante plus élevée mais ils demandent une tension de commande plus forte et sont plus sensibles à la polarisation de la lumière que les dispositifs dont le guide est formé de matériaux massifs.

Malgré la sensibilité à la polarisation, l'avantage de cette structure est de permettre d'associer sur un même substrat d'InP une diode laser fonctionnant en continu et un modulateur d'intensité.

Le modulateur électro-absorbant est transparent lorsqu'il reçoit une tension nulle et absorbant pour une tension négative. Le circuit de commande du modulateur va alors forcer le niveau haut des données à 0 Volt et le niveau bas à une valeur choisie selon l'extinction souhaitée.

#### ➤ **Conclusion :**

La modulation directe, plus simple et moins coûteuse est encore très utilisée si les données sont transmises à un débit de quelques gigabits/s, selon la qualité du laser. Mais au-delà de 5 Gbits/s, la modulation externe devient indispensable car elle présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc d'envoyer des débits plus élevés. Le bruit, le chirp ... ne sont pas inexistantes dans les modulateurs externes mais leurs valeurs sont nettement plus faibles que dans les lasers. Les limites de capacité de transmission sont donc repoussées vers des fréquences plus importantes.

## I.2. Le bloc récepteur

Tout comme il existe plusieurs méthodes pour écrire l'information sur le signal lumineux, il existe différentes techniques pour la récupérer. Néanmoins, le photodétecteur est toujours nécessaire pour convertir le signal optique en électrique. Pour simplifier, nous pourrions le comparer à un compteur de photons et un générateur d'électrons. La première méthode de détection est appelée directe. Elle consiste en la conversion, grâce à une photodiode, des fluctuations de puissance optique porteuses de l'information en fluctuations de courant électrique. D'autres méthodes dites cohérentes (détecteurs hétérodyne et homodyne).

La détection directe permet d'extraire le signal qui module en amplitude une onde, on peut le redresser, ou plus généralement le faire passer dans un dispositif non linéaire, tel qu'une diode. Un signal basse fréquence, le signal modulant et des harmoniques sont alors émis. Les harmoniques peuvent être éliminées par filtrage, dans la mesure où la fréquence de l'onde porteuse est très grande devant la fréquence maximale du spectre du signal modulant. Ce procédé est classiquement appelé détection directe.

Le photodétecteur peut être réalisé soit par une diode PIN, soit une photodiode à avalanche (PDA). Le principe de fonctionnement reste inchangé, il permet de traduire le signal optique envoyé par la fibre optique en signal électrique, qui sera traité par des dispositifs électroniques. [8]

### I.2.1. Photodiode PIN :

Positive Intrinsic Négative Photodiode cette photodiode, polarisée en inverse, est réalisée à partir de trois couches de semi-conducteur. Deux couches fortement dopées P+ et N+ entre lesquelles existe une couche de grande résistivité (presque intrinsèque) où il existe très peu de charges mobiles. Les photodiodes PIN sont les plus utilisées car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante (voir figure I.8) [5]

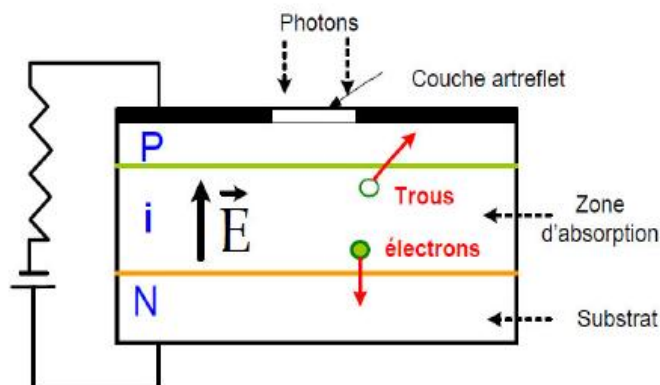
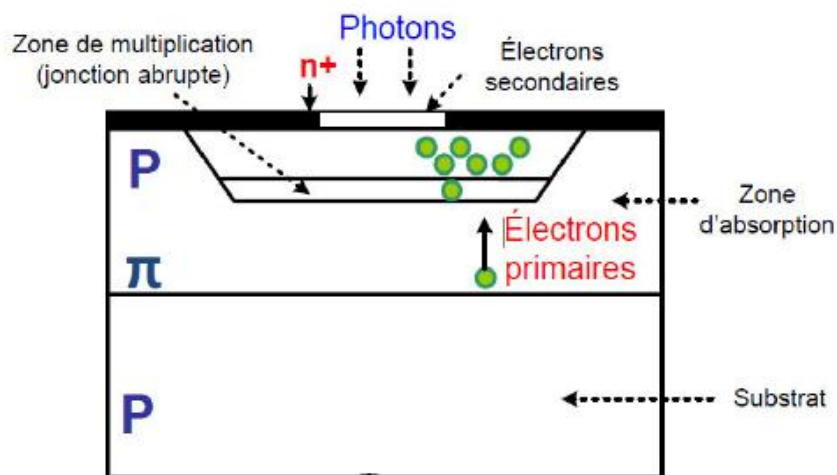


Figure I.8 : photodiode PIN.

### I.2.2 Photodiode APD (avalanche photo diode)

Lorsque la puissance lumineuse reçue est très faible, les courants détectés sont peu élevés et se superposent au courant d'obscurité, conduisant à un mauvais rapport signal sur bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire que le courant détecté soit plus important en utilisant d'autres types de photodiode, comme les photodiodes à gain interne de type avalanche. La photodiode d'avalanche est une diode PIN dans laquelle est réalisée une amplification de puissance, cela permet d'extraire un signal électrique fort même pour une puissance lumineuse affaiblie. Les photodiodes à avalanche sont aussi utilisés grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte (voir figure I.9) [5]



*Figure I.9 : photodiode APD.*

En transmissions optique les photodétecteurs doivent :

- Offrir un bon couplage avec la fibre.
- Avoir une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement.
- Avoir une bande passante convenable.
- Avoir une faible exigence du point de vue tension de source
- Pas d'influence des conditions extérieures sur les caractéristiques.
- Avoir une grande fiabilité (bon rendement quantique) et un faible cout.
- Avoir un temps de réponse très court et un faible bruit additionnel [5]

### I.3. Généralité sur la fibre optique

Dans le système de première génération, il y avait des fibres multimodes et des diodes laser à  $0.9\mu\text{m}$ , leurs débit quelques Gb/S. Dans le système de seconde génération on trouve des fibres unimodales, diodes lasers à  $1,3\mu\text{m}$ , avec un débit de 10 Gb/S. Tant dit que dans la troisième génération, les diodes lasers à  $1,5\mu\text{m}$ , minimisation de l'atténuation, leur débit de

500 Gb/S. Et pour la quatrième et dernière génération, il y a la possibilité d'utiliser plusieurs longueurs d'onde simultanément avec un débit de 100000Gb/S [6].

### I.3.1. Définition d'une fibre optique

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle a un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, la téléphonie, la visioconférence ou les données informatiques.

Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'informations. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications optiques. Ses propriétés sont également exploitées dans le domaine des capteurs (température, pression, ... etc.) et dans l'imagerie.

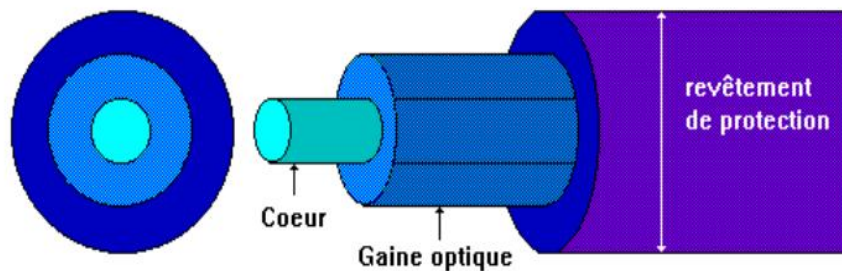


Figure I.10 : structure de la fibre.

D'autre part une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire tel que schématisé sur la figure (I.10). Ce guide est constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre ou plastique) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre. [2]

### I.3.2. Mode de guidage dans une fibre optique

On dit qu'une fibre optique est capable de transmettre un mode (fibre optique monomode) ou plusieurs modes (fibre optique multimode). on appelle mode chaque angle d'injection le rayon dans la fibre optique (voir figure I.11). Qu'une fibre optique soit monomode ou multimode dépend de la structure de la fibre et aussi de la longueur d'onde à transmettre.

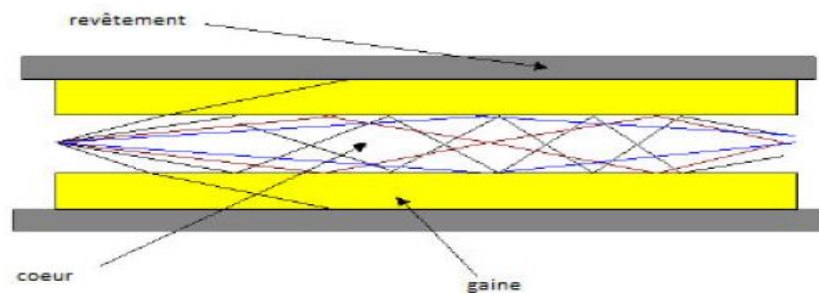


Figure I.11 : Transmission d'une fibre optique.

On peut aussi parler de l'ouverture numérique qui est un paramètre très important qui nous renseigne sur la capacité qu'a une fibre pour propager les rayons optiques. On note que l'ouverture numérique est indépendante des dimensions de la fibre. L'ouverture numérique est notée par (voir figure I.12) [7] :

$$ON = \sin \theta_{OL} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (I.2)$$

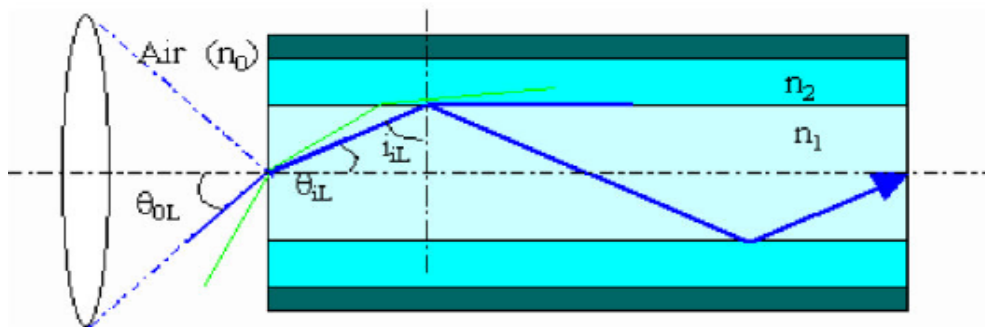


Figure I.12 : Ouverture numérique d'une fibre optique.

### I.3.3. Les différents types de fibres optiques

Dans la spécialité des télécommunications, il y a deux types de fibres optiques utilisées :

- les fibres monomodes.
- les fibres multimodes.

La différence entre ces deux types de fibres optiques est la dimension du cœur, où il est de 10 μm pour les fibres monomodes et de 50 μm pour les fibres multimodes.

#### a. Les fibres optiques monomodes

Les fibres monomodes ont un diamètre de cœur (10 microns), faible par rapport au diamètre de la gaine (125 microns) et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée.

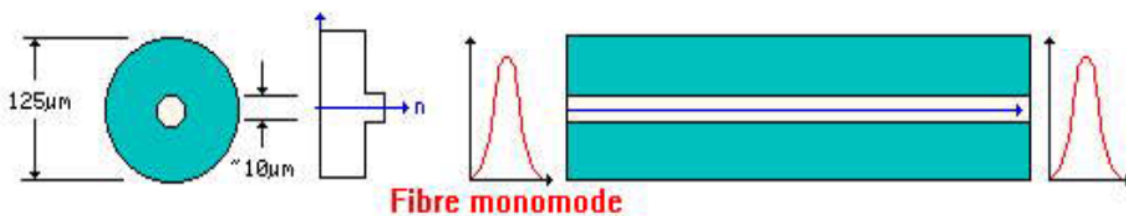


Figure I.13 : La fibre monomode

L'onde se propage alors sans réflexion et il n'y a pas de dispersion modale. Le petit diamètre du cœur des fibres monomodes nécessite une grande puissance d'émission qui est délivrée par des diodes laser.

Les caractéristiques essentielles d'une fibre optique monomode pour la transmission d'un signal sont :

- l'affaiblissement (dB) par unité de longueur (Km), qui est fonction de la longueur d'onde, soit 0,36 dB/Km à 1300 nm et 0,2 dB/Km à 1550 nm,

- La dispersion chromatique, qui conduit à un élargissement d'une impulsion lumineuse du fait de la variation des vitesses de propagation, ce qui est pénalisant dans le cas d'une modulation directe (1 ou 0) du signal optique,
- la dispersion des modes de polarisation (PMD), qui se caractérise par un étalement spectral en ligne,
- la longueur d'onde de coupure.

### b. Les fibres optiques multimodes

La fibre multimode a été la première utilisée. Elle est facile à réaliser (gros cœur) mais a une limitation de bande passante... Elle est donc réservée aux courtes distances : réseaux informatiques. La fibre optique est décomposée en deux parties :

#### ➤ La fibre à saut d'indice

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction reste constant dans tout le cœur de la fibre, et à l'interface gaine cœur il décroît brusquement en effectuant un saut d'indice dans la gaine.

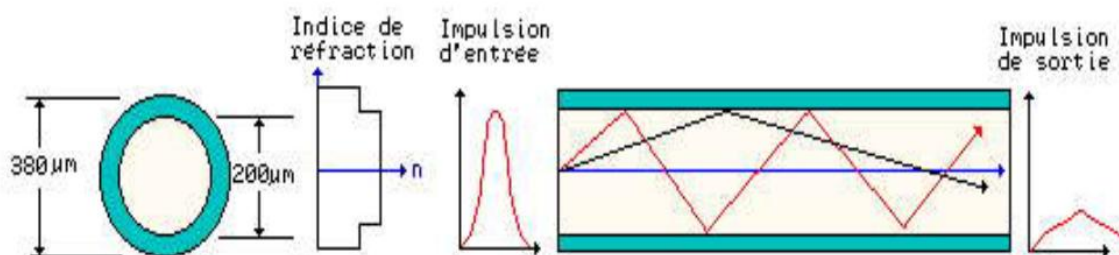


Figure I.14 : Fibres multimodes à saut d'indice.

#### ➤ La Fibre à gradient d'indice

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction n'est pas constant dans le cœur ; bien au contraire il décroît graduellement du centre du cœur jusqu'à la limite de la surface qui sépare le cœur et la gaine.

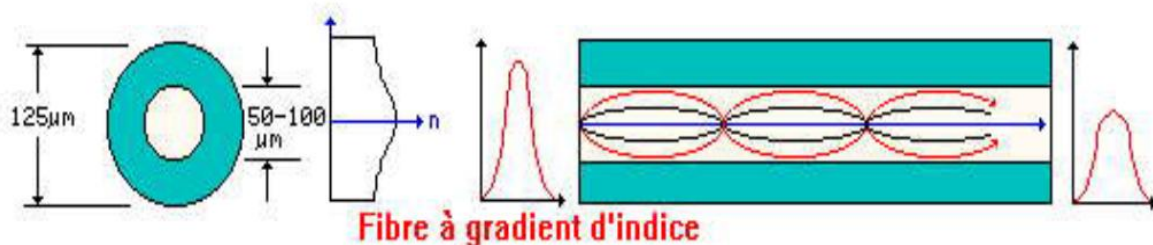


Figure I.15 : Fibre à gradient d'indice.

### I.3.4. Les limitations physiques liées à la fibre

Parmi les principaux phénomènes liés à la propagation d'un signal dans une fibre optique, nous allons présenter par la suite.

#### a. Affaiblissements dans les fibres optiques

Un des problèmes les plus importants que posent les systèmes de transmission d'information est la perte de puissance dans le signal transmis, cet affaiblissement du signal est moins fort dans les systèmes optiques à base de fibre optiques que dans les systèmes électriques,

Normalement l'affaiblissement dans une fibre optique est donnée en dB ou dBm par kilomètre, cet affaiblissement n'est pas constant avec la fréquence du signal optique à transmettre. On définit comme fenêtres de transmission les intervalles de longueur d'onde où l'affaiblissement varie peu et présente un maximum local (figure I.16) [7]



Figure I.16 : L'affaiblissement d'une fibre optique.

Les différentes causes de l'affaiblissement sont (figure I.17) :

- Une courbure trop prononcée qui augmente les pertes par réflexion.
- L'affaiblissement par absorption atomique ou électronique. Elle est due aux impuretés. Région infrarouge.
- Par absorption moléculaire. Elle est aussi due aux impuretés du cœur. Région infrarouge.
- Par diffusion de Rayleigh. Elle est due aux variations de l'indice au niveau Microscopique

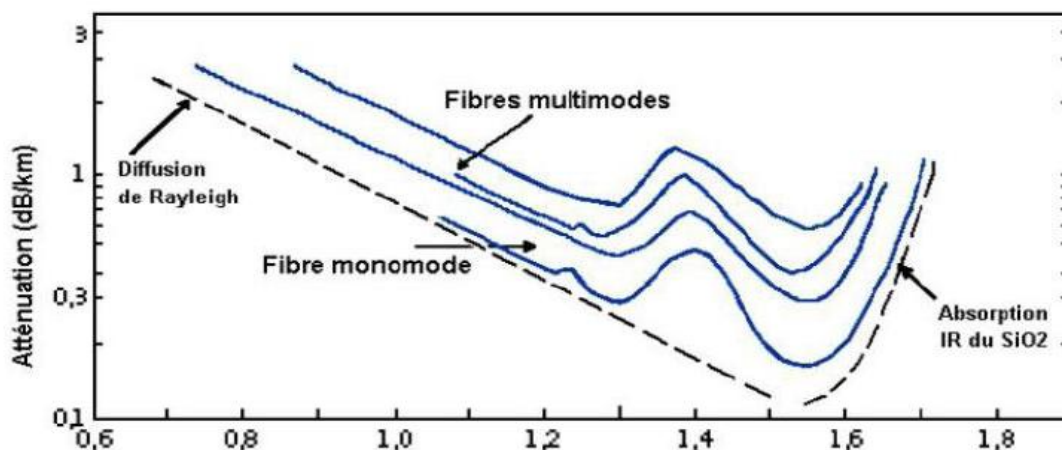


Figure I.17 : Les différentes causes de l'affaiblissement.

## b. La dispersion dans la fibre optique

La dispersion au sens large est un étalement ou un élargissement des pulses lumineux lors de leur propagation le long d'une fibre. Elle est due d'une part, aux différents chemins que prennent les rayons lumineux (dispersion multimodale), et à la nature intrinsèque de la lumière et du milieu de propagation (dispersion chromatique). Une dispersion trop importante augmente le taux d'erreur au niveau du récepteur (une impossibilité de distinguer les 0 des 1). La dispersion est très néfaste pour la restitution du signal à l'arrivée et est un facteur limitant le débit dans les liens de transmission. Il y a plusieurs causes pouvant expliquer ce phénomène :

- Dispersion intermodale.
- Dispersion chromatique.

### 1. La dispersion intermodale

La dispersion intermodale est l'étalement du signal dû à la multiplicité de chemins (modes) des rayons lumineux dans la fibre multimodes.

#### ➤ Dispersion intermodale dans la fibre multimodes à saut d'indice

La dispersion dans ce type de fibre va s'exprimer en termes de retard entre le rayon le plus lent de celui le plus rapide.

#### ➤ dispersion intermodale dans la fibre multimodes à gradient d'indice

Les fibres à gradient d'indice ont été faites pour corriger les effets de la dispersion dans la fibre à saut d'indice on démontre que le retard est de l'ordre du picoseconde (ps).

$$\Delta\tau = L \frac{n_1}{c} \frac{\Delta^2}{8} \text{ avec } \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (\text{L3})$$

#### ➤ La dispersion intermodale dans la fibre monomode

Dans les fibres monomode, il n'y a qu'un seul mode de propagation donc il n'y aurait aucun effet de dispersion intermodale.

### 2. La dispersion chromatique

Une source laser n'émet pas sur une seule longueur d'onde. Elle a alors une fonction DSP qui n'est pas une impulsion, elle émet donc plusieurs longueurs d'onde près de la nominale. Il y a déjà une dispersion initiale sur la fréquence optique. Cette variation de la vitesse avec la fréquence va décomposer dans le temps le signal selon la fréquence, en augmentant la longueur temporelle de la sortie.

Ce type de dispersion apparaît dans le cas des fibres monomode et multimode. Elle est de l'ordre de ps/km.



### I.3.5. Les avantages et les inconvénients de la fibre optique

#### a. Les avantages

La fibre optique présente donc plusieurs avantages sur son homologue le câble coaxial en cuivre.

Nous pouvons débiter la longue liste en nommant évidemment la vitesse ; comme nous l'avons amplement expliqué, la lumière qui voyage dans la fibre se propage à près de 300000 km/s, ce qui crée une vitesse de transmission relativement instantanée. La seule restriction sur la vitesse se trouvant être la dispersion. La rapidité des fibres reste incontestablement plus grande que celle des fils en cuivre.

Le deuxième grand avantage des fibres est la légèreté des matériaux utilisés pour leur conception. Un câble optique pèse beaucoup moins qu'un câble de cuivre. Ceci, en conjonction avec le type des matériaux utilisés, rend l'utilisation et la manipulation des fibres optiques énormément plus faciles et avantageuses.

De plus, cette légèreté ne signifie pas nécessairement la fragilité. La gaine protectrice du câble accomplit très bien sa tâche en rendant ce moyen de communication très rigide et très peu corrosif. Par exemple un câble optique de 62.5 micromètres peut soutenir une charge de près de 100 kg.

Il a aussi été observé plusieurs fois que la fibre optique est plus rentable à long terme que le fil de cuivre. La manutention est beaucoup moins nécessaire ce qui donne la possibilité d'établir un réseau plus fiable, plus rentable, et surtout, plus efficace.

Un troisième avantage majeur est que le signal qui voyage dans la fibre est insensible aux champs magnétiques ou divers bruits pouvant créer une distorsion sur les signaux voyageant dans des fils de cuivres.

Par contre si la fibre optique présente beaucoup d'avantages par rapport au câble coaxial, elle possède certains inconvénients que l'on cite.

#### b. Les inconvénients

Par contre, il reste deux problèmes majeurs que la fibre optique ne règle pas, bien qu'elle aide à les diminuer grandement. Premièrement, il y a ce qu'on appelle l'atténuation, ou la perte de force du signal lumineux. Les ondes voyageant sous forme de flux dans une fibre ne sont pas toutes alignées et parallèles ; elles ont toutes une même direction en générale, mais n'ont pas toutes le même parcours. [1]

Ceci fait que chaque onde ne se reflète pas au même moment et qu'il peut donc arriver que, à la suite de plis ou de virages dans le câble, une certaine quantité d'ondes lumineuses, ayant dépassé l'angle critique, soit perdue. La force du signal final est moindre que celle du signal initial dû à la perte de certaines ondes lumineuses.

Pour une fibre optique commerciale, l'atténuation est calculée en décibels par kilomètre (dB/km), soit la quantité de décibels perdus au cours d'un kilomètre, et peut varier de 0,5 dB/km jusqu'à 1000 dB/km pour un câble à noyau large.

Le deuxième problème majeur découlant aussi du non parallélisme des ondes est la dispersion. Si une onde voyage en zigzag, rebondissant d'un côté à l'autre du noyau, elle parcourt beaucoup plus de distance qu'une onde voyageant en ligne droite. En faisant un plus long parcours pour la même vitesse de propagation, elle prend du retard sur celle qui voyage en ligne droite. Ceci crée le phénomène d'allongement du signal, ou de dispersion dans le temps. Dans le cas où un deuxième signal serait émis trop rapidement derrière le premier, il pourrait se créer une superposition où le récepteur ne saurait plus différencier entre les deux signaux. On appelle largeur de spectre la fréquence maximale à laquelle on peut émettre des signaux successifs sans avoir de superposition.

Par contre, il est possible de réduire ce problème en réduisant le diamètre du noyau.

Plus celui-ci est petit, moins les ondes voyageant en zigzag prennent de retard sur les autres, et plus la largeur de spectre peut être grande.

### I.3.6. Les amplificateurs optiques

Comme nous l'avons vu, les informations sont transmises sur de très longues distances. Elles sont soumises à de multiples effets décrits plus haut qui dégradent le signal (atténuation, élargissement, déphasage...). C'est pourquoi tout au long de la ligne des répéteurs sont positionnés afin de régénérer le signal (R), de le remettre en forme (2R) voir de le re-synchronisé ou récupérer le rythme (3R). La plupart des lignes déjà installées possèdent des répéteurs purement électroniques. Le signal est donc converti (optique-électrique O/E) remis en forme, re-synchronisé, etc. Et reconvertir électrique-optique (E/O). Ce type de répéteurs emploie des circuits électroniques ultra rapides, donc très coûteux et complexes à mettre en œuvre, pour pouvoir gérer le nombre de canaux qui croît régulièrement pour augmenter les débits de transmission, surtout à de telles vitesses de fonctionnement. Les systèmes actuels utilisent dorénavant, des répéteurs purement optiques, facile à mettre en œuvre et permettant d'effectuer cette tâche à la « vitesse optique ». La remise en forme et la régénérescence du signal, sera faite par un amplificateur optique à l'aide d'une fibre dopée à l'erbium, la resynchronisation par l'emploi de fibre de compensation.

#### a. Amplificateur optique à semi-conducteur (AOSC)

Les premiers travaux sur les AOSC ont démarré au début des années 80, à partir du moment où les lasers à semi-conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable. Leur structure de base est peu différente de celle d'une diode laser. Contrairement aux lasers à semi-conducteur, il n'y a pas de miroirs aux extrémités mais un revêtement anti-reflets est déposé sur les faces afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit. [1]

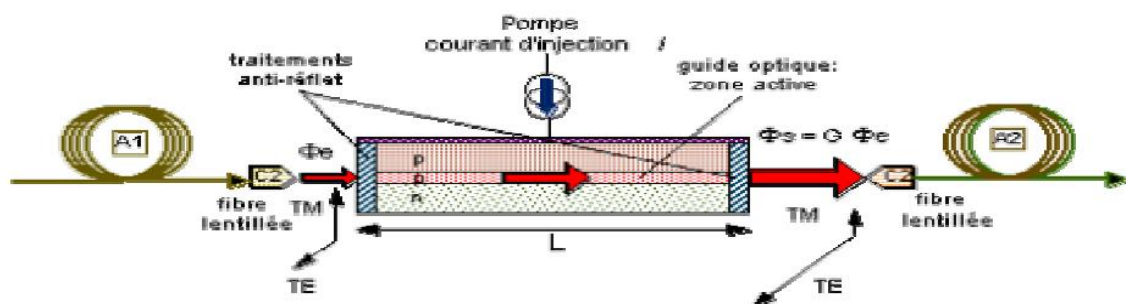


Figure I.18 : Schéma d'un amplificateur semi-conducteur.

La lumière incidente entre dans le circuit, elle est amplifiée et sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre. Voici quelques caractéristiques : un gain élevé jusqu'à 30 dB, une puissance de saturation en sortie de 5 à 10 mW, une bande passante de 5 THz à  $\lambda = 1550$  nm...

### b. Amplificateur optique à fibre dopée (EDFA, Erbium doped fiber amplifier)

Comme n'importe quel amplificateur, un amplificateur optique absorbe l'énergie fournie par le système extérieur désigné par le terme de pompage. Il la restitue au signal pour le renforcer et l'amplifier.

Les amplificateurs à fibre qui sont disponibles commercialement fonctionnent dans la fenêtre de transmission à la longueur d'onde de 1550 nm. Un de leurs avantages est la simplicité du dispositif. Ils se composent pour l'essentiel : d'une fibre active de quelques mètres de longueur, dopée avec des ions appropriés (erbium), et connectée à la fibre de ligne, d'une pompe et d'un dispositif de couplage de la lumière de la pompe vers la fibre dopée. Dans la plupart des cas la pompe est un laser à semi-conducteur. Le couplage de la lumière de la pompe dans la fibre est obtenu à l'aide de multiplexeur. [1]

Il est habituel d'ajouter deux isolateurs (diode optique), une à l'entrée, l'autre à la sortie, qui ne laissent passer la lumière que dans un sens afin d'éviter toutes les réflexions qui pourraient : créer une cavité, faire osciller le dispositif et le transformer en laser. 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées à l'EDFA, et des diodes lasers à semi-conducteur sont disponibles à ces longueurs d'onde. Le multiplexeur optique, sélectif en longueur d'onde, doit présenter une perte d'insertion faible à ces deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. La figure (I.19) montre le schéma d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium.

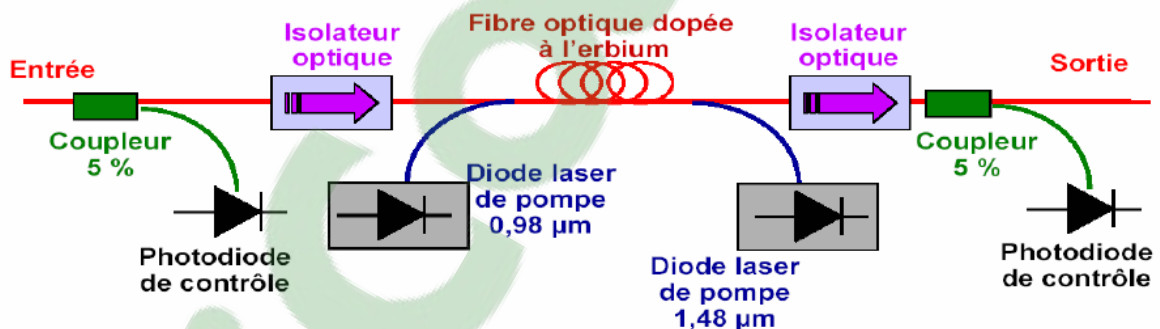


Figure I.19 : exemple d'un amplificateur optique à fibre dopée erbium.

En général, les EDFA possèdent un gain de 25 à 45 dB et des puissances de saturation allant de 1 à 10 mW (0 à 10 dBm). Enfin, les EDFA ont une large bande passante (1530-1560 nm) pour laquelle le gain est quasiment identique, ce qui rend intéressant ces amplificateurs quand on veut d'amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueur d'onde.

### c. Amplificateur Raman

Avec l'accroissement des canaux dans la fibre, la bande spectrale offerte par les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium, limitée au maximum à 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant. Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale.

De nouveaux amplificateurs optiques tels que les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de télécommunications. Ils sont basés sur le principe de la diffusion Raman, qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe

est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon. Ce phénomène peut être spontané s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal. Ainsi, dans le cas de l'amplificateur Raman, l'onde incidente, dite onde de pompe, stimulée par l'onde signal, va créer une autre onde signal et un phonon. L'amplification est alors réalisée. [1]

Comme pour les autres amplificateurs optiques, l'amplificateur Raman a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG sont le plus souvent utilisés dans ce cas, ils émettent une longueur d'onde inférieure à celle du signal. L'avantage principal de ces lasers est d'être accordable sur une très grande plage de longueurs d'onde. Le gain obtenu peut atteindre quelques dizaines de décibels, mais une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître. La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman.

### **I.3.7. Les fibres de compensation**

La dispersion chromatique peut être compensée par un dispositif créant des fonctions de transfert inverse de celle d'une fibre standard, tel que les fibres à compensation de dispersion (DCF, Dispersion Compensative Fiber). Elle consiste alors à introduire un tronçon de longueur adapté de cette fibre dont la dispersion est de signe opposé par rapport à celle de la fibre de ligne. La DCF est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux éléments extérieurs, son avantage majeur est son caractère large bande, mais elle présente aussi des inconvénients comme les pertes linéiques non négligeables. [2]

### **Conclusion**

Dans ce chapitre on a vu la description d'une chaîne de transmission optique, les composantes d'un émetteur, du récepteur ainsi que les caractéristiques de la fibre, ses différents types, ces avantages ainsi que ces inconvénients. Dans le chapitre suivant nous allons présenter la source optique qui sera un laser à semi-conducteur et son application dans les télécommunications optiques.

## **CHAPITRE II**

### *Les lasers à semi-conducteur et leur application dans les réseaux optiques*

## Introduction

Depuis le début des télécommunications par fibres optiques, le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit, des longueurs d'onde disponibles compatibles avec les fenêtres spectrales des fibres optiques et de leur faible consommation énergétique.

Ce chapitre est consacré à l'étude du laser à semi-conducteur ses propriétés, son fonctionnement, ainsi que quelques exemples d'applications dans le domaine optique.

### II.1 Historique

Nous reprenons ci-dessous les différentes étapes qui ont été nécessaires dans le progrès de la physique pour aboutir à l'avènement du laser à S-C. Le premier ingrédient nécessaire a bien entendu été la découverte du photon par Planck et Einstein. Est venu ensuite le concept d'émission stimulée décrit pour la première fois par Einstein. La notion de gain optique n'est apparue qu'en 1950 avec les travaux de Kastler sur le pompage optique (technique d'inversion de population d'un système d'atomes). En 1954 Townes réalisa le premier MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) sur base de l'excitation des niveaux de vibration de molécules d'ammoniac se trouvant dans une cavité. En 1958 Townes suggère la possibilité de réaliser un Maser optique (le Laser) basé sur le même principe mais utilisant des transitions atomiques. En 1960 le premier laser fut construit utilisant des transitions atomiques de l'ion de Chrome dans une matrice d'alumine (rubis). En 1961 Bernard et Duraffourg (France) propose, sur base du concept de quasi-niveau de Fermi, l'utilisation d'une jonction  $p-n$  semi-conductrice pour la réalisation de l'inversion de population. Il n'a fallu attendre qu'un an après cette proposition pour voir fonctionner le premier laser à S-C en 1962 dans plusieurs laboratoires de recherche industriels. Il s'agissait d'une diode (jonction  $p-n$ ) en GaAs fonctionnant à très basse température. Cinq années plus tard la première diode laser à température ambiante à vue le jour. Celle-ci était basée sur le concept essentiel de double hétérojonction.

- 1900 : Rayonnement du corps noir, photon (Planck)
- 1917 : Emission stimulée (Einstein)
- 1950 : Pompage optique, gain optique (Kastler)
- 1954 : Maser à ammoniac, microonde  $\lambda = 1.25$  cm (Townes)
- 1958 : Idée du Maser optique, cavité + gain optique (Townes)
- 1960: 1er Laser, rubis ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  + Chrome)  $\lambda = 0.69$   $\mu\text{m}$
- 1961 : Idée du gain optique dans les S-C, quasi-niveau de Fermi  $\Delta EF > E_g$  (Bernard et Duraffourg)
- 1962 : 1er Laser à S-C, GaAs  $\lambda = 0.85$   $\mu\text{m}$ , 77 K (IBM, MIT, GE)
- 1967 : Le laser à hétérojonction,  $\lambda$  variable, 300 K (Kroemer)

Le grand avantage des S-C par rapport aux autres matériaux à gain optique est qu'ils présentent une densité de dipôles électriques (ou porteurs excités) extrêmement élevée (les autres matériaux à gain sont essentiellement : des gaz ou des verres ou des cristaux dopés dans lesquels la densité de dipôles électriques est très faible devant les  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  des S-C). Cela conduit naturellement à des gains optiques élevés sur des longueurs réduites. De plus le pompage optique dans les S-C peut se faire par simple polarisation d'une jonction  $p-n$  ce qui est particulièrement facile et efficace par rapport aux techniques de pompage optique classiques.

## II.2 Principes de base d'un laser à S-C

Avant d'étudier le laser à S-C proprement dit, voyons tout d'abord le principe de fonctionnement du laser. Un laser est une cavité optique dans lequel se trouve un milieu à gain optique. La cavité peut être, par exemple, formée d'un semi-miroir et d'un miroir parallèles se faisant face de manière à ce que les photons puissent faire des aller-retour en traversant le milieu à gain. Le gain optique peut être réalisé par émission stimulée sur base d'une inversion de population.

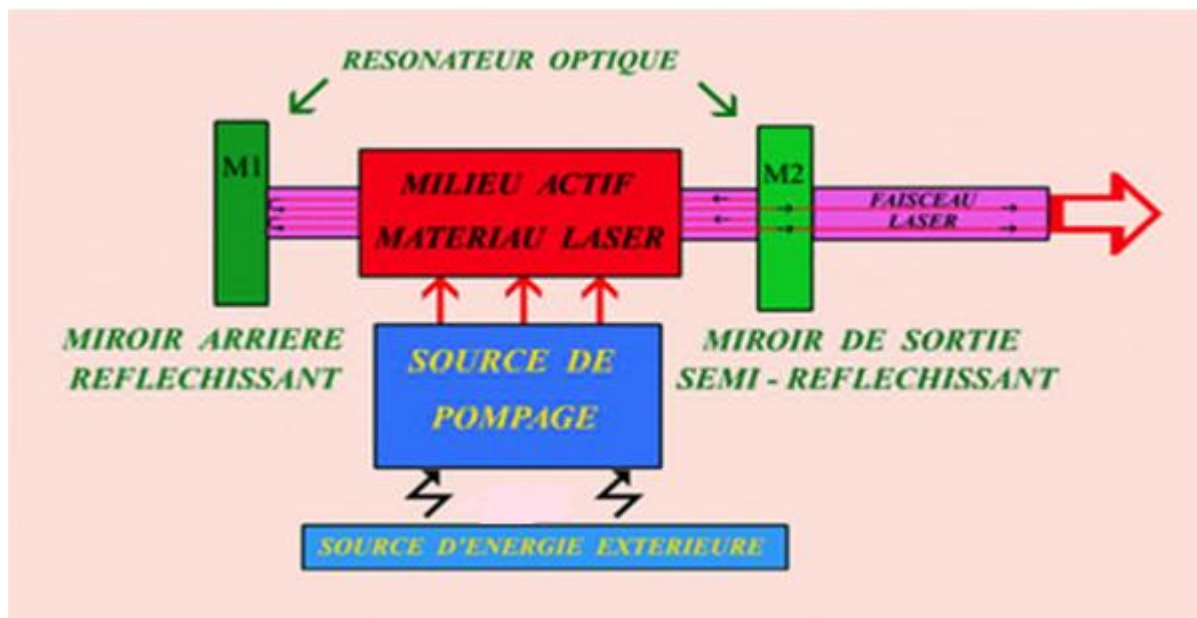


Figure II.1 : principe de fonctionnement de laser

### II.2.1 Résonateur optique

Le résonateur est constitué de deux miroirs parallèles entre lesquels est placé le milieu actif. Le premier miroir, le réflecteur, est totalement réfléchissant alors que le second, le coupleur, est semi-transparent. Il permet ainsi à la lumière de sortir de la cavité, le résonateur contribue en grande partie à l'amplification de la lumière dans le laser. Les photons en étant réfléchis par les miroirs, peuvent traverser plusieurs fois le milieu actif et provoquer l'émission stimulée d'un plus grand nombre de photons. Lorsque le processus d'amplification se produit dans le laser, on dit qu'il oscille.

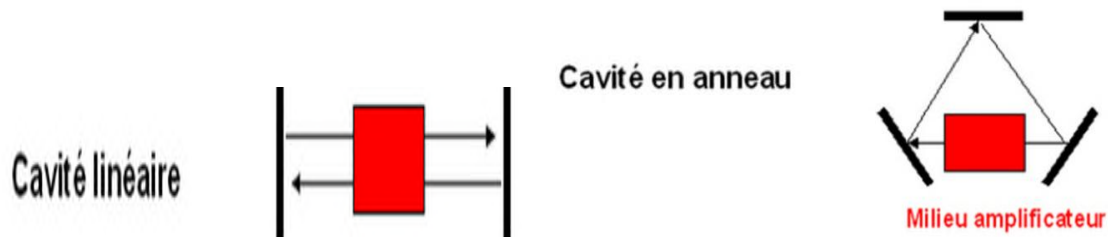


Figure II.2 : type de cavité.

## II.2.2 Emission Laser : Etude du milieu actif des lasers à semi-conducteur

Le principe de fonctionnement du laser est le suivant : imaginons un premier photon spontané émis dans le milieu à gain. Si ce photon est émis dans l'axe de la cavité (perpendiculairement aux miroirs) il sera réfléchi par un des miroirs et reviendra dans le milieu actif où il sera multiplié, disons  $N$  fois. Le groupe de  $N$  photons résultants sera à nouveau amplifié lors de son passage suivant dans le milieu à gain après réflexion sur un des miroirs. Il en résultera  $N^2$  photons dans la cavité. En se répétant ce processus conduit à une croissance exponentielle du nombre de photons. Bien entendu la croissance est limitée par le phénomène de saturation de gain. Aussi, dans ce raisonnement nous n'avons pas tenu compte du fait que des photons quittaient la cavité à chaque aller-retour au travers du semi-miroir. Ce sont ces photons qui constituent le faisceau laser.

Puisque, tous les photons sont identiques au premier photon spontané (Propriétés de l'émission stimulée) ils sont bien entendu tous en phase et le rayonnement laser est parfaitement cohérent (du moins en principe). [8]

### II.2.2.1 Fonctionnement du milieu actif du laser à semi-conducteur

Les lasers utilisés dans les liaisons optiques actuelles sont les lasers à semi-conducteurs. Le principal matériau utilisé est : L'alliage quaternaire  $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$  sur substrat  $InP$ . L'alliage  $InGaAsP$  est utilisé dans les applications de télécommunications à cause de sa bande interdite (*gap*) réglable en fonction des valeurs de  $x$  et  $y$ , qui lui permet d'émettre entre 1 et  $1.65\mu m$ . [8]

- **Jonction P-N** : Lorsque deux semi-conducteurs type  $P$  et type  $N$  sont mis en contact, ils forment une jonction  $PN$ . Les porteurs libres de chaque région vont être diffusés dans la région de signe opposée, en se recombinant éventuellement dans la zone amoindrie. Et donc une région amoindrie de porteurs libres est formée de deux côtés de la jonction, ainsi le courant de diffusion dure jusqu'à l'équilibre



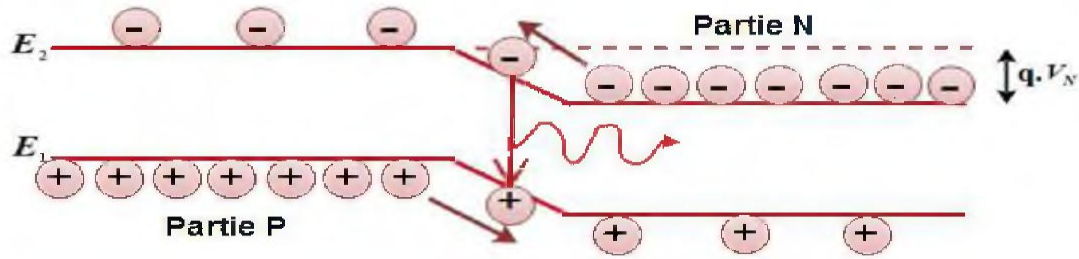


Figure II.3 : La jonction P-N dans un laser

Dans le cas idéal chaque porteur minoritaire doit générer un photon. Mais ce qui se passe dans le cas réel est que seule une fraction de ces porteurs se recombine d'une manière radiative et émettent un photon. L'efficacité associée s'appelle efficacité quantique et elle représente le nombre de photon générés par chaque porteur minoritaire.

Le nombre de photons générés, noté  $P$ , est relié directement au courant d'injection  $I$  :

$$P = \eta_{ext} I \frac{h\nu}{e} \simeq \eta_{ext} I \frac{E_g}{e} \quad (\text{II.1})$$

$\eta_{ext}$ : le rendement.

$h$  : constant de planck.

$\nu$ : la fréquence.

$E_g$ : énergie de Gap.

$e$  : Charge d'électron

### II.2.2.2 L'effet photoélectrique dans un semi-conducteur

L'effet photoélectrique est une première manifestation du caractère discontinu des phénomènes électromagnétiques qui se révèle dans l'interaction entre la lumière et la matière.

en 1917, EINSTEIN mit en évidence les trois processus d'interaction entre un atome dit «à deux niveaux» et un rayonnement électromagnétique Ces processus sont désignés par les termes l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée Ces différents types d'interactions se déroulent au sein d'un milieu pouvant être atomique, ionique ou moléculaire, constitué de deux niveaux d'énergie possibles  $E_m$  et  $E_n$  ( $E_m < E_n$ ) pour les atomes constituant ce milieu. On pourra désigner le niveau 1 par le terme de «niveau fondamental» et le niveau 2 par celui de «niveau excité», lorsque le niveau 2 est plus peuplé d'atomes que le niveau 1, on dit qu'il y a inversion de population. [8]

#### a. Absorption

Lors du processus d'absorption, un atome situé sur le niveau inférieur  $E_m$  va absorber un photon d'énergie  $h\nu = E_n - E_m$  et monte au niveau excité grâce à la présence d'un photon de fréquence  $\nu_{21}$  et d'énergie  $\Delta E$ .

Il y a disparition du photon qui transfère son énergie au milieu environnement. Ce phénomène est représenté à la figure (II.4.a)

### b. Émission spontanée

L'émission spontanée consiste à la désexcitation du milieu considéré par passage d'un atome du niveau supérieur  $E_n$  vers le niveau inférieur  $E_m$ . Le milieu va donc perdre une quantité d'énergie égale à  $\Delta E = E_n - E_m$ , entraînant ainsi la création d'un photon d'énergie  $\Delta E$  et de fréquence :

$$\nu_{21} = \frac{E_n - E_m}{h} \quad (\text{II.2})$$

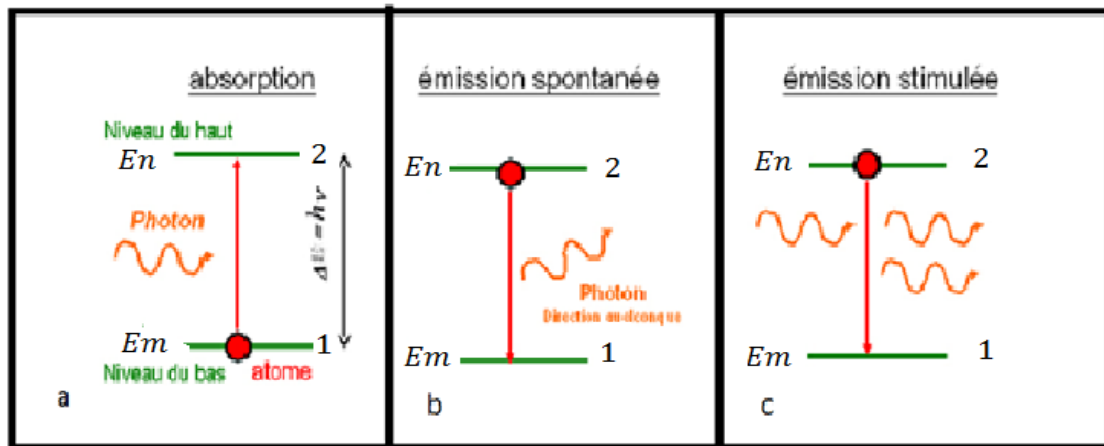
$h$  est la constante de Planck. Ce phénomène est illustré à la figure (II.4.b).

### c. Émission stimulée

Dans cet état, le milieu se trouve au préalable dans un état excité. Cherchant naturellement à minimiser sa quantité d'énergie, un atome du niveau 2, il va se désexciter vers le niveau 1. À la différence de l'émission spontanée, l'émission stimulée nécessite la présence d'un photon d'énergie  $\Delta E$  et de fréquence  $\nu_{21}$ .

Ce photon sera en effet reproduit, on obtient à l'issue deux photons parfaitement similaires en terme d'énergie, fréquence, direction de propagation. Cette création d'un second photon résulte d'un couplage entre l'onde incidente et le système atomique s'apparentant aux résonances rencontrées dans les phénomènes vibratoires. Le système atomique recevant un photon en fournit un second : il agit donc en amplificateur de rayonnement. C'est ce processus de l'émission stimulée qui est à l'origine du principe du laser. L'émission stimulée est montré à la figure (II.4.c), l'onde optique ainsi passe par une cavité optique ou résonateur.

[11]



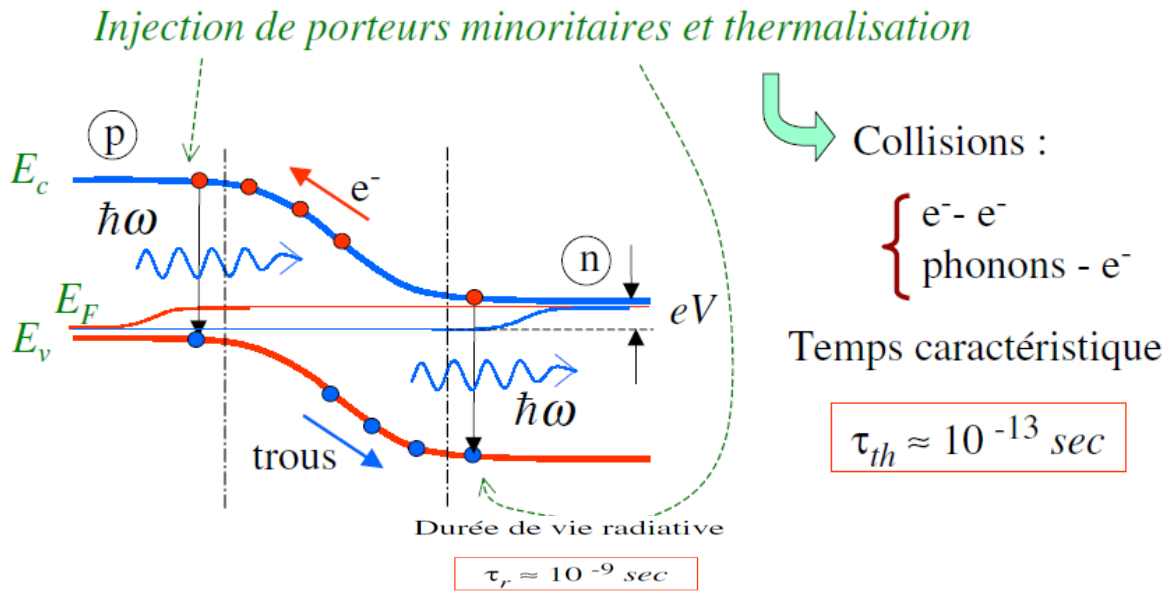
**Figure II.4 :** Représentation schématique des transitions électroniques possibles dans un modèle à deux niveaux

#### d. Inversion de population

Voyons maintenant en détail comment réaliser l'inversion de population dans une jonction p-n. Lorsque la jonction est polarisée en sens passant, les porteurs minoritaires sont injectés avec une certaine énergie cinétique.

Cette énergie est dissipée par collisions électrons-électrons ou électrons-phonons (interaction avec le réseau cristallin) jusqu'à thermalisation (c.-à-d., la vitesse des électrons atteint celle qu'elle serait à équilibre thermique :

Distribution des vitesses de moyenne nulle et d'écart-type fixé par la température). Cette thermalisation s'effectue en des temps extrêmement courts de l'ordre du dixième de picoseconde. Ces temps sont beaucoup plus courts que les temps de vie radiative habituellement rencontrés dans les S-C (temps de vie radiative : temps moyen mis par les paires électron-trou pour se recombiner par émission spontanée de photon). Ceci signifie que les électrons du côté p et les trous du côté n sont accumulés et l'on peut donc imaginer réaliser de cette manière l'inversion de population. [9]



**Figure II.5 : inversion de population**

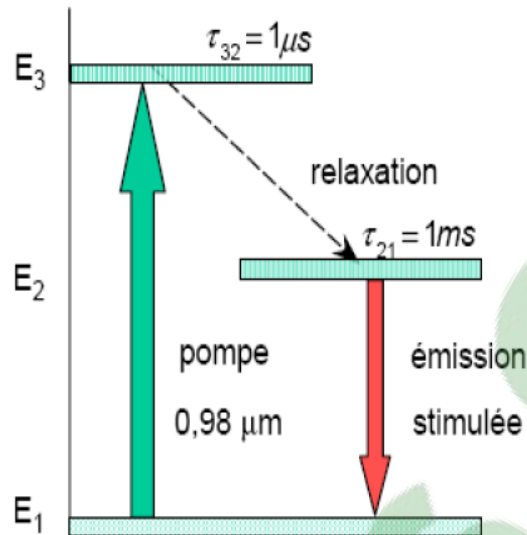
### II.2.3 La source de Pompage

Le pompage permet d'amener une majorité des particules à l'état excité (Excitation optique, Décharge électrique, ...). Il ya ensuite accumulation d'électrons sur le niveau métastable, c'est l'inversion de population. Celle-ci favorise l'émission stimulée. Les différents milieux amplificateurs actuellement utilisés sont indiqués dans le Tableau (II.1) suivant, ainsi que la méthode de pompage :

| Nature du milieu                                                                                                         | Méthode de pompage                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Isolant dopé : Rubis dopé Cr, YAG dopé avec des ions néodyme $\text{Nd}^{+3}$ , Fibre optique dopée terre rare (Erbium). | Optique (absorption de photons à partir d'un faisceau intense d'énergie appropriée). |
| Liquide organique (dye) dissous dans un solvant (ex : rhodamine).                                                        | Optique                                                                              |
| Gaz ionisé : Argon, He-Ne, $\text{CO}_2$ , excimère.                                                                     | Décharge électrique (plasma gazeux).                                                 |
| Semiconducteur.                                                                                                          | Injection de courant dans une jonction.                                              |

**Tableau II.1 : Milieu amplificateur et méthode de pompage.**

Pour obtenir une inversion de population suffisamment importante entre les deux niveaux impliqués dans la transition laser, le milieu doit comporter au moins 3 niveaux d'énergie. La figure (II.6), ci-dessous représente le système à 3 niveaux d'énergie utilisée pour le pompage des ions d'Erbium dans une fibre optique :



Système à 3 niveaux : Les électrons sont «pompés »à partir du niveau fondamental E1 sur un niveau E3 (groupe de niveaux très rapprochées ou bande) en utilisant un rayonnement de longueur d'onde

$\lambda_p = 0,98 \mu\text{m}$ .

La durée de vie  $\tau_{32}$ , pour les transitions

$E_3 \rightarrow E_2$  étant très courte devant la durée de vie  $\tau_{21}$  pour les transitions  $E_2 \rightarrow E_1$ ,

Les électrons vont s'accumuler sur le niveau E2. Le niveau intermédiaire E3 ne sert qu'à faciliter l'inversion de population. [10]

*Figure II.6 : Niveaux d'énergie des ions Er Dans la Silice.*

## II.3 Différents type laser SC

### II.3.1 LASERS à hétérojonctions doubles (DHS)

Le laser à S-C est devenu accessible pour les applications grâce à l'invention de la double hétérojonction. La structure en double hétérojonction crée une double barrière de potentiel pour les porteurs minoritaires injectés. Le confinement de porteurs qui en résulte conduit à une grande facilité d'inversion de population. La DDP appliquée ne doit pas être très importante (elle doit juste excéder le petit gap de la structure) et la diode laser peut fonctionner à température ambiante. De plus la largeur de la zone d'inversion de population est maintenant fixée lors de la fabrication du dispositif et ne dépend donc plus de la DDP, le contrôle du fonctionnement de la diode laser en est donc fortement simplifié.9]

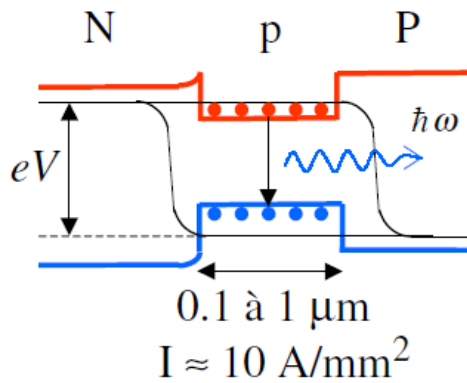


Figure II.7 : structure de DHS

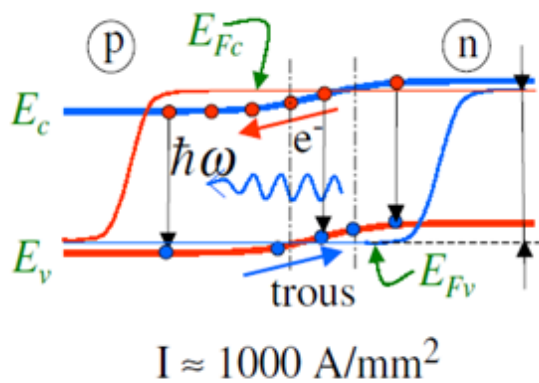
Avantages :

- Zone active déterminée par construction, confinement des porteurs minoritaires

↳ courant faible (300K)

### II.3.2 Laser SC homojonctions

Pour obtenir du gain optique dans une homojonction, il faut polariser la jonction avec une DDP supérieure au gap du S-C sur la charge  $\frac{E_g}{q}$ . L'inversion de population n'est alors réalisée que dans la zone de charge d'espace, là où à la fois les quasi-niveaux de Fermi  $E_{Fc}$  et  $E_{Fv}$  sont respectivement supérieur et inférieur au bas de la bande de conduction et au sommet de la bande de valence (entre les lignes pointillées du schéma ci-dessous). Cette zone est étroite et sa largeur dépend fortement de la DDP appliquée. En fait elle n'existe que si la DDP appliquée est suffisamment élevée. En pratique l'obtention de cette zone d'inversion de population requiert une telle DDP que le courant associé est très grand ce qui a pour effet de chauffer fortement la jonction. L'échauffement est si fort que pour conserver les propriétés de la jonction intacte, il faut refroidir le système à l'azote liquide (77 K). Une telle solution n'est évidemment pas acceptable pour les applications du laser à S-C. [16]



Problèmes :

- Zone active limitée (de taille variable)

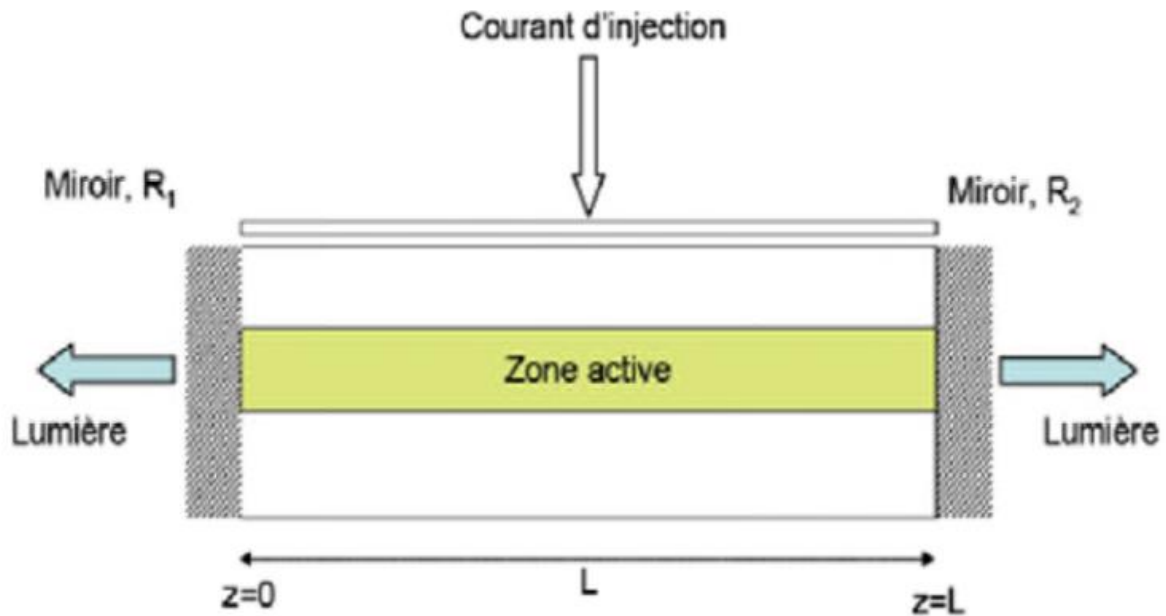
- Courant élevé (échauffement)

↳ refroidi à l'azote (N) liquide (77k)

Figure II.8 : structure de laser homojonctions

### II.3.3 Laser Fabry- pérot

Le fonctionnement de la diode laser fait appel à la contre réaction optique qui permet de passer d'un comportement amplificateur en oscillateur, Ceci est obtenu en plaçant le milieu actif à l'intérieur d'une cavité optique. Cette cavité est constituée de deux miroirs partiellement réfléchissants avec indice de réflexion R1 et R2 comme le montre la figure I.6



**Figure II.9 :** Structure d'une diode laser à une cavité de résonance Fabry-Pérot

La contre-réaction positive est déterminée par les réflexions aux extrémités de la cavité. L'onde optique générée à l'intérieur de la zone active effectue autant d'allers retours à l'intérieur de la cavité que de passages dans le milieu amplificateur. Pour que l'oscillation de l'onde optique puisse démarrer à l'intérieur de la cavité, le gain optique doit compenser au moins les pertes internes à cette dernière. Il doit en effet dépasser la valeur seuil de densité des porteurs injectés  $N_s$  correspond au courant de seuil  $I_s$ . [8]

La puissance optique délivrée par une facette d'une diode laser est la suivant :

$$P_{POp}(I) = \eta_d \left( \frac{h\nu}{2e} \right) (I - I_s) \quad (\text{II.3})$$

$\eta_d$  : représente l'efficacité quantique différentielle

$h$ : Constante de Planck

$\nu$  : Fréquence optique

$e$  : Charge de l'électron

$I$  : Courant injecté

Une cavité optique assure :

- le gain nécessaire pour l'émission des photons
- consiste à réaliser une sélectivité en fréquence ou en longueur d'onde.

Ce sont des ondes stationnaires créées à l'intérieur de la cavité après chaque aller et retour suivant l'axe de propagation. Ces ondes sont renforcées par l'interférence constructive après la réflexion sur les surfaces des miroirs, et les autres ondes subissent toutes entre elles des Interférences destructives.

Dans cette cavité résonnante seulement les modes longitudinaux qui se propagent les ondes optiques qui satisfont à la condition de propagation  $L$  :

$$\lambda = \lambda_m = \frac{2nL}{M} \quad (\text{II.4})$$

$n$  : L'indice de la cavité,

$L$  : Longueur de la cavité

$m$  : Un nombre entier

Le nombre de ces modes dépend de :

- l'énergie introduite dans le laser
- la longueur de la cavité
- la distribution spectrale du gain et des pertes
- du type de gain
- L'espacement entre deux modes longitudinaux qui donné par :

$$\delta\lambda = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{\lambda_m^2}{2.L.n_g} \quad (\text{II.5})$$

$n_g$  : indice de groupe

$\delta\lambda$  Varie de 0.5 à 1 nm pour  $L$  variant de 200 à 400 nm

### II.3.4 Laser DFB

La contre-réaction dans les lasers DFB (distributed feedback), lasers les plus courants, est distribuée sur toute la longueur de la cavité et donc n'est pas localisée seulement sur les côtés. Ce résultat est obtenu avec un réseau gravé tout autour de la zone active qui détermine une variation périodique de l'indice de mode. Ce type de contre-réaction se base sur le principe de la diffraction de Bragg. La sélectivité de modes pour un laser DFB est reliée à la condition de Bragg.[8]

En effet le couplage entre les ondes qui se propagent en sens direct ou inverse se réalise seulement pour celles dont la longueur d'onde  $\lambda_B$  (longueur d'onde de Bragg) satisfait la condition suivant :

$$\lambda_M = \frac{2.A.n_{eff}}{M} \quad (\text{II.6})$$

$A$  : la période de miroir de Bragg

$n_{eff}$  : L'indice effectif du guide dans la zone de réseau

$M$  : un entier correspond à l'ordre de diffraction de réseau

### II.3.5. Laser DBR

Dans le cas de lasers DBR la contre-réaction ne se réalise pas à l'intérieur du milieu actif. En effet les extrémités d'un laser DBR se comportent comme des miroirs dont la réflectivité est maximale pour une longueur d'onde  $\lambda_B$  qui satisfait l'équation précédente. [8]

Les structures des lasers DFB et DBR sont montrées sur la figure (II.10) suivante



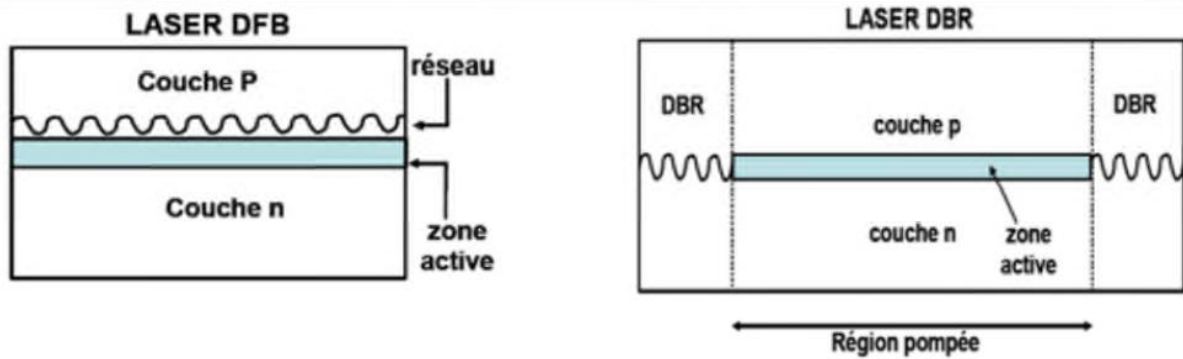


Figure II.10 : structure des lasers DFB, DBR.

## II.4 Applications des lasers SC dans le domaine de télécommunication

### II.4.1 Liaisons optiques à long distance

A la question " vaut-il mieux utiliser des électrons (câble électrique classique) ou bien des photons (fibre optique) pour propager l'information ? ", la courbe présentant l'énergie consommée pour la propagation en fonction de la distance de propagation montre clairement que pour des distances supérieures à 200 Km, le transport optique est à privilégier. [12]

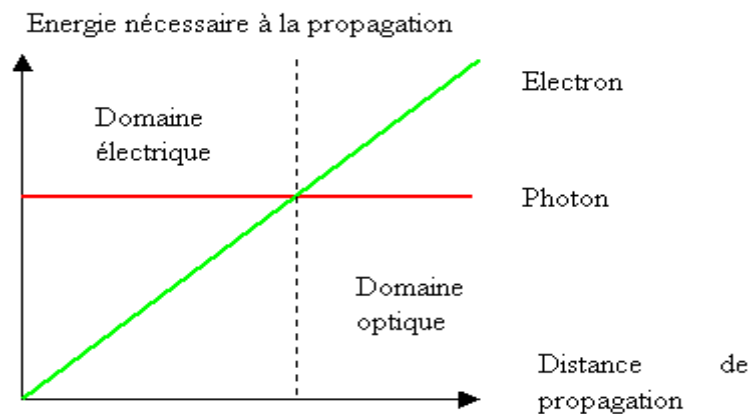


Figure II.11 : propagation optique ou électrique de l'information ?

En effet, l'électron ne coûte rien en termes de production contrairement au photon alors que le photon ne coûte rien à la propagation contrairement à l'électron du point de vue énergétique. Pour de grandes distances de propagation, les photons sont utilisés et circulent dans des fibres optiques en Silice à la longueur d'onde 1.55  $\mu\text{m}$ .

Toutefois, au cours de leur propagation, les photons sont absorbés par la Silice, dont le coefficient linéique d'atténuation est  $A_{\text{Silice}} = 0.2$  dB par kilomètre (dB/km). C'est à dire que si un signal de puissance  $P_e$  est injecté dans la fibre, il sera réduit à la puissance  $P_s = 1\%$  de  $P_e$  en sortie de la fibre optique, au bout de 100 km de propagation.

Le coefficient linéique d'atténuation de la fibre optique est calculé de la manière suivante :

$$A \text{ (dB/km)} = 10/L * \log (P_e / P_s) \quad (\text{II.7})$$

A : Coefficient linéique d'atténuation d'une fibre optique.

$P_e$ : puissance émise.

$P_s$ : puissance de sortie.

L : longueur.

Le lecteur pourra vérifier que pour la Silice,  $A = 10 * \log(1 / 1\%) = 10 * \log(100) = 20$  dB/100 km = 0.2 dB/km. C'est pour cette raison que des répéteurs de signal sont utilisés tous les 100 km de fibre optique.

Les LASERS sont utilisés pour propager une onde lumineuse sur de longues distances, à l'aide des fibres optiques Figure (II.12).

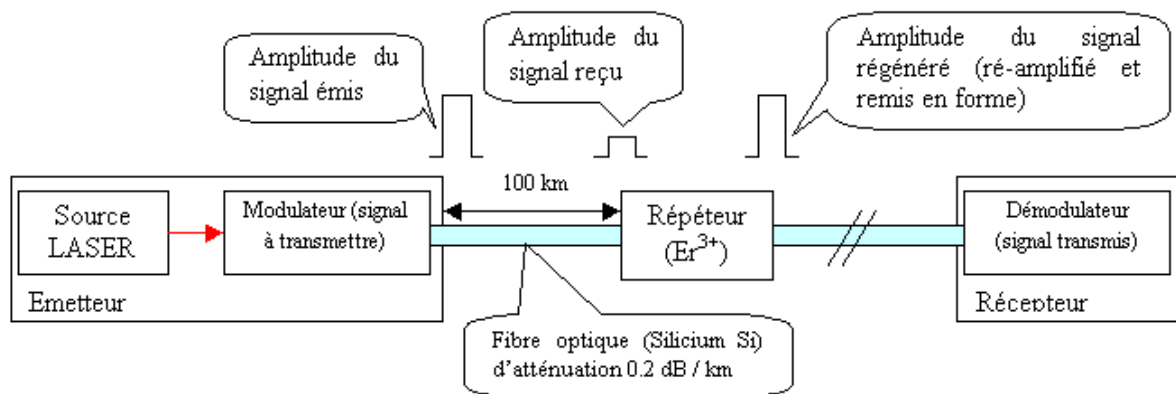


Figure II.12 : application du laser aux télécommunications optiques.

## II.5 Gain d'un laser à semi-conducteur

Nous avons admis jusqu'ici que les électrons et les photons ne pouvaient interagir qu'à l'énergie  $E_2 - E_1 = h\nu_0$ . Dans la réalité, plusieurs mécanismes viennent «élargir» ce domaine d'énergie. C'est particulièrement évident dans le cas des semi-conducteurs, puisque les transitions se font entre la bande de conduction et la bande de valence, ce qui implique un Continuum de niveaux d'énergie  $E_2$  et  $E_1$ . La conséquence est qu'il faut remplacer la relation (II.20) qui représente le gain total  $g$  dans la bande de fréquence, par un gain dépendant de la fréquence  $\nu$  ou spectre de gain  $g(\nu)$ . Le spectre de gain est caractérisé par sa **fréquence centrale**  $\nu_0$  est par sa **largeur à mi-hauteur**  $\Delta\nu$ , Figure (II.13). [11]

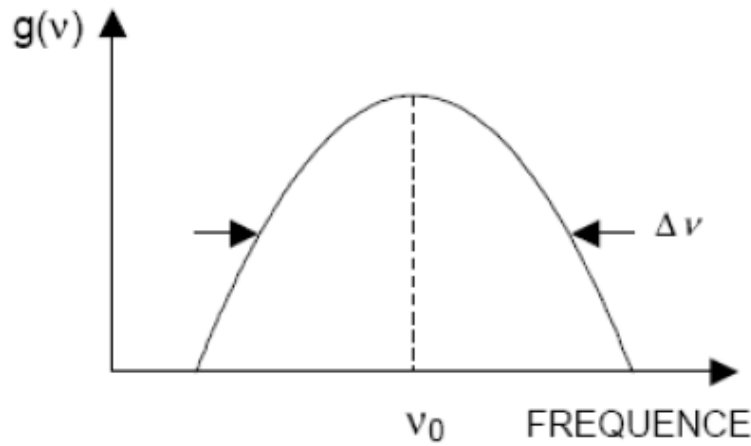


Figure II.13 : caractéristique de spectre de gain

### II.5.1 Puissance émise d'un laser a semi-conducteur

Pour terminer la description, il ne reste qu'à déterminer la puissance émise par le laser. La puissance totale est donnée par produit de l'énergie des photons  $h\nu$ , du taux auquel ceux-ci s'échappent de la cavité par les miroirs  $\nu_g \alpha_{\text{miroirs}}$ , de la densité de photon  $S$  et du volume  $V$  du laser [11]:

$$P_{\text{tot}} = (h\nu)(\nu_g \alpha_{\text{miroirs}}) VS \quad (\text{II.8})$$

Pour un laser de longueur  $L$  et de section  $A$ , on peut écrire :

$$P_{\text{Tot}} = \frac{h\nu}{2L} \nu_g \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) A * S \quad (\text{II.9})$$

Puisque  $\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$  (II.8)

Il est souvent utile de considérer la puissance émise par une des faces du laser :

$$P_{\text{Tot}}^1 = (1 - \zeta)^{-1} \quad (\text{II.10})$$

$$P_{\text{Tot}}^2 = (1 - \zeta^{-1})^{-1} \quad (\text{II.11})$$

Où

$$\zeta = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \left( \frac{1 - R_1}{1 - R_2} \right) \quad (\text{II.12})$$

Lorsque les deux faces du laser ont le même coefficient de réflexion  $R_1 = R_2 = R$ , on a alors  
Simplement :

$$P_{\text{Tot}}^1 = P_{\text{Tot}}^2 = \frac{P_{\text{Tot}}}{2} = \frac{h\nu}{2} \nu_g \ln\left(\frac{1}{R}\right) A * S \quad (\text{II.13})$$

### II.5.2 Rendement quantique d'un laser a semi-conducteur

Le rendement quantique différentiel externe  $\eta_{\text{ext}}$  est celui qui est obtenu à l'extérieur du dispositif. Pour un laser Fabry – Pérot, il est relié au rendement quantique différentiel interne

$\eta_i$  qui représente la quantité de porteurs libres injectés convertis en photons par recombinaison stimulée, et le rendement externe ( $\eta_{ext}$ , exprimé en W/A), soit [11]:

$$\eta_i = \frac{R_{stim}}{R_{SRH} + R_{Spom} + R_{stim}} \quad (\text{II.14})$$

Pour les "bons" matériaux ou la recombinaison est essentiellement radiative,  $\eta_i$  est voisin de 100%.

Et le rendement quantique différentiel externe est donné :

$$\eta_{ext} = \eta_i \frac{h\nu}{q} \frac{\alpha_m}{\alpha_m \alpha_i} \quad (\text{II.15})$$

Où la fréquence  $\nu$  d'émission laser,  $h$  la constante de Planck et  $q$  la charge de l'électron. Pour obtenir cette formule considérons le rapport du rendement externe au rendement interne. Il correspond au nombre de photons qui s'échappent divisé par le nombre total de photons produits par les miroirs. On peut voir que [11].

$$\frac{1}{\eta_{ext}} = \frac{q}{\eta_i h\nu} \left( 1 + \frac{2\alpha_i}{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)} L \right) \quad (\text{II.16})$$

## II.6 Débit de la transmission longue distance

La fibre optique peut transporter plusieurs ondes lumineuses simultanément et ceci grâce à différente technique de multiplexage dont le multiplexage en longueurs d'onde WDM. La fréquence porteuse du LASER est modulée en fréquence à 1 %, soit  $f_p = 5 * 10^{14}$  Hz, ce qui correspond à une excursion en fréquence  $\Delta\nu = 5 * 10^{12}$  Hz. La fibre optique peut propager l'information avec un débit binaire de  $10^{12}$  bits/seconde donc de l'ordre de 5 Terabit /seconde, ce qui correspond à  $10^{12}$  Hz de bande passante, si un bit est associé à 5 Hz (cela dépend du modulateur utilisé).

Pour transporter une conversation téléphonique, 64000 bits /seconde ou 3 kHz (400 à 3400 Hz plus précisément) de bande passante sont nécessaires, donc une fibre optique peut transporter plusieurs millions de conversations téléphoniques simultanées.

Dans le cas d'un programme TV, environ 5 MHz de bande passante sont nécessaires et la fibre optique pourra propager simultanément une centaine de milliers de programmes TV.

Grace à ce pouvoir de véhiculer de très hauts débits, les fibres optiques et les LASERs sont aujourd'hui massivement utilisées.

Notons que l'opérateur d'un réseau longue distance (composé des LASERs et fibres optiques) doit maîtriser des millions de canaux d'émission. Si une seule longueur d'onde WDM venait à

se mélanger avec sa voisine, une grande partie des communications en cours seraient perdues, d'où l'intérêt d'asservir les LASERs en fréquence afin que cette dernière ne varie pas au cours de la propagation. [12]

### **Conclusion**

Dans ce chapitre on vient de présenter une étude détaillée sur les lasers à semi-conducteur, le principe de l'émission d'un faisceau laser, ainsi que leur application dans les domaines de transmissions optique de l'information. Ensuite une étude du gain dans un laser ainsi que le calcul du rendement sont détaillés tout ceci pour nous permettre d'aborder le dernier chapitre, qui sera consacré à la simulation d'une ligne de transmission optique grande distance avec une étude détaillée des performances de cette transmission pour différents types de lasers.

**Chapitre III**  
**Résultats et interprétations**

**Clicours.COM**

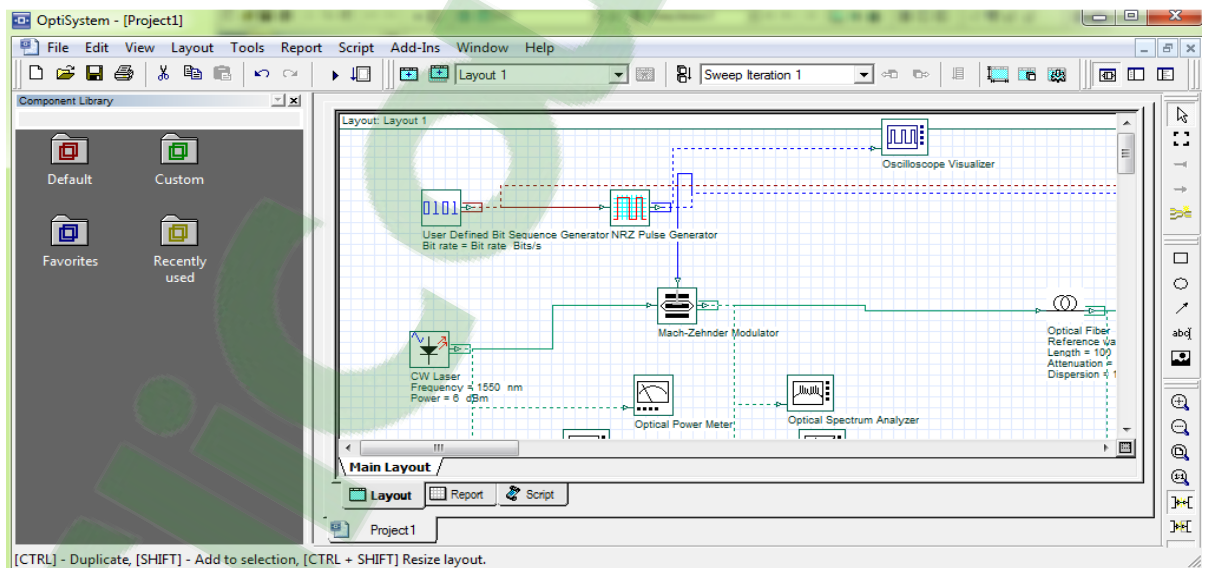
## Introduction

Dans ce chapitre on va décrire puis simuler une liaison optique pour voir les performances de bloc d'émission tout au long de la liaison à l'aide de logiciel de simulation optisystem.

Une description détaillée du logiciel optisystem est présenté au début du chapitre puis nous allons définir les éléments qui serviront de critères de qualité pour évaluer la qualité de transmission d'un système de communication optique. Après une analyse des résultats de simulation.

### III.1 Présentation du logiciel optisystem

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



*Figure III.1 : schéma de l'interface optisystem.*

L'interface utilisateur graphique complète est contrôlée la disposition de composants optiques, elle contient une fenêtre principale répartie en plusieurs parties (Figure III.1) :

- **Bibliothèque** : une base de données de divers composants.
- **Editeur du layout** : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception

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

Sa vaste bibliothèque de composants actifs et passifs comprend des paramètres réalistes, ces capacités peuvent être étendus facilement avec l'ajout de composants et peuvent être éliés à un large éventail d'outils. Une interface complète d'utilisateur graphique contrôle la disposition optique des composants, des modèles et des présentations graphiques.

### III.2 Applications du logiciel optisystem

- la conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- le calcul de temps d'erreur binaire (BER) et le calcul de bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et de réseaux optiques passifs (PON).
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

### III.3 Avantage du logiciel optisystem

Les avantages du logiciel optisystem sont :

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

### III.4 Critères de qualité d'une transmission

Pour définir la qualité d'une transmission optique, différents critères existent. Les trois principaux critères de qualité d'un signal transmis le taux d'erreur binaire, le facteur de qualité et le diagramme de l'œil. Ces trois critères sont décrits dans la suite.

#### III.4.1 Le taux d'erreur binaire

Le moyen quantitatif d'évaluer la qualité d'une transmission consiste à évaluer la probabilité d'erreur par élément binaire, qui correspond à la probabilité de prendre une décision erronée sur un élément binaire.

Le taux d'erreur binaire (TEB) ou BER (pour Bit Error Rate) est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits émis. Comme nous l'avons décrit dans la première partie de ce chapitre, le récepteur prend une décision sur la présence d'un symbole «1» ou «0» selon le niveau de signal reçu. Cette décision est prise à l'instant d'échantillonnage et à l'aide d'une bascule de décision pour laquelle la tension reçue au-dessus d'un seuil est considérée comme un symbole «1», et au-dessous de ce seuil comme un symbole «0». Si les fluctuations d'amplitude et temporelles sont importantes, la tension d'un symbole «1» peut passer au-dessous du seuil et la tension d'un symbole «0» au-dessus du seuil, des erreurs sont alors commises.

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$



Le taux d'erreur binaire communément accepté dans le milieu des télécommunications optiques est de  $10^{-9}$ , correspondant à une erreur commise sur un milliard de bits lus. On tolère alors un signal de taux d'erreur binaire de  $10^{-4}$  puisqu'il permet après traitement par le code correcteur d'erreurs de retrouver un taux d'erreur binaire de  $10^{-12}$ . Cette tolérance est cependant une marge que les opérateurs assurent, le taux d'erreur binaire en ligne ne dépasse en général pas  $10^{-9}$ .

### III.4.2 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité est le rapport signal sur bruit électrique en entrée du circuit de décision du récepteur, il est défini par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (\text{III.1})$$

Où  $\mu_1$  et  $\mu_0$  sont respectivement les tensions moyennes des symboles «1» et «0» à l'instant de décision,  $\sigma_1$  et  $\sigma_0$  et les variances des probabilités de puissance des symboles «1» et «0».

Le facteur de qualité est donc relié au taux d'erreur binaire (TEB) dans l'hypothèse où la distribution de puissance des symboles est gaussienne, par la relation suivante :

$$TEB = \frac{1}{2} \left[ \text{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (\text{III.2})$$

Où *erfc* est la fonction erreur complémentaire défini par :

$$\text{erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-y^2) \cdot dy \quad (\text{III.3})$$

Il est souvent utilisé plutôt que le taux d'erreur binaire dès lors que le taux d'erreur binaire est trop faible pour être mesuré. En effet, plus le taux d'erreur binaire est faible, plus le temps de mesure est long pour une même précision sur la mesure. Expérimentalement, le taux d'erreur binaire n'est par conséquent pas toujours mesurable directement.

Le facteur de qualité est fréquemment utilisé pour quantifier la qualité d'une liaison ; un facteur de qualité de 6 correspond à un taux d'erreur binaire de  $10^{-9}$ .

### III.4.3 Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est obtenu dans le domaine électrique après détection par une photodiode, un filtre et un amplificateur. Il permet d'avoir une idée de la qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférences entre symboles, de gigue temporelle.

Le diagramme de l'œil n'a toutefois qu'une valeur qualitative, le critère qui permet réellement d'évaluer de manière quantitative la qualité du signal est le taux d'erreur binaire.

### III.5 Présentation de la liaison

Notre objectif dans cette partie est de réaliser une liaison optique point à point composé d'un module de transmission et d'un support de transmission et d'un module de réception

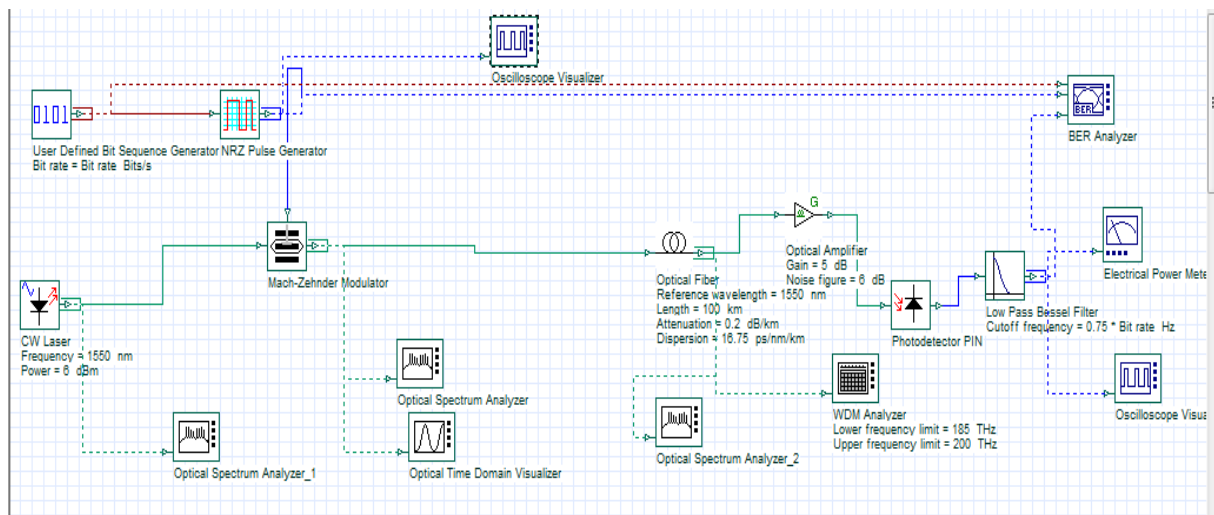


Figure III.2 : schéma d'une liaison optique point à point.

### III.5.1 Module d'émission

#### III.5.1.1 Générateur binaire

C'est un générateur qui produit une suite de longueur connue, de « 0 » et de « 1 » logiques. Il est dit aléatoire car c'est une suite arbitraire. Cependant, lorsque la suite arrive à son terme, le générateur ne s'arrête pas de fonctionner. La séquence déjà transmise est à nouveau reproduite, d'où le qualificatif de pseudo-aléatoire, le débit utilisé est de 2.5 Gbit/s.

#### III.5.1.2 Générateur NRZ

Dans le générateur NRZ, la donnée binaire « 1 » est associée à une impulsion optique de durée sensiblement égale au temps symbole (inverse du débit), la donnée « 0 » est associée à l'absence de signal. En pratique on n'a pas une absence totale de signal puisque le taux d'extinction n'est jamais infini.

#### III.5.1.3 Le laser (cw laser)

Le laser cw (continuous wave) est caractérisé par une fréquence de 1550 nm et de puissance de 0 dbm

#### III.5.1.4 Le modulateur externe

Le principe de fonctionnement des modulateurs à effet électro-optique repose sur la modification des indices de réfraction d'un matériau biréfringent soumis à un champ électrique. Si une tension est appliquée à l'un des bras d'un interféromètre de mach-zehnder (MZ) de sorte que la différence de phase entre les deux faisceaux de sortie est un multiple impair de  $\pi$ , l'interférence est destructive : l'interféromètre a une transmission nulle. L'interféromètre de MZ constitue donc un modulateur d'amplitude.

### III.5.2 Support de transmission

On va utiliser la fibre optique comme un support de transmission ayant une atténuation de 0.2 dB/km, une longueur d'onde de 1550 nm avec une dispersion de 17 ps/nm/km et une longueur de 80 km.

### III.5.3 Module de réception

#### III.5.3.1 Amplificateurs EDFA

On va utiliser EDFA pour la récupération de signal de sortie de la fibre après l'élargissement par l'effet de la dispersion et l'atténuation au cours de la fibre il est caractérisé par un gain de 5 dB et un (noise figure =6 dB).

#### III.5.3.2 Le photodétecteur PIN

Bien que certains dispositifs soient plus sensibles, les photodétecteurs à semi-conducteurs présentent les avantages d'être rapides et faciles à utiliser. Les paramètres importants sont la sensibilité et le courant d'obscurité : La sensibilité ( $S$ ) relie la puissance lumineuse  $P_{opt}$  au photocourant  $I_{ph}$ . Elle augmente avec  $\lambda$ , puis chute à l'approche de la coupure.

Le courant idéal de la sortie  $I_{ph}$  de la photodiode est :  $I_{ph} = S \cdot P_{opt}$  (pour une longueur d'onde de 1550 nm, la sensibilité est de 0.9 A/W).

Le courant d'obscurité  $I_{obs}$  est le courant qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement.

Pour  $\lambda=1550$  nm, le  $I_{obs} = 5$  nA.

#### III.5.3.3 Filtre de Bessel passe bas

Le filtre de Bessel est un filtre polynômial « tout pôle » d'ordre supérieur dont la caractéristique principale est d'offrir un délai constant en bande passante. Concrètement, cela signifie que toutes les fréquences pures, en bande, le traversent en un temps rigoureusement égal. Le filtre de Bessel permet donc de minimiser la distorsion que subit un signal complexe lors d'une opération de filtrage. La fréquence de coupure de ce filtre est de 0,75Hz.

## III.6 Résultats et interprétations

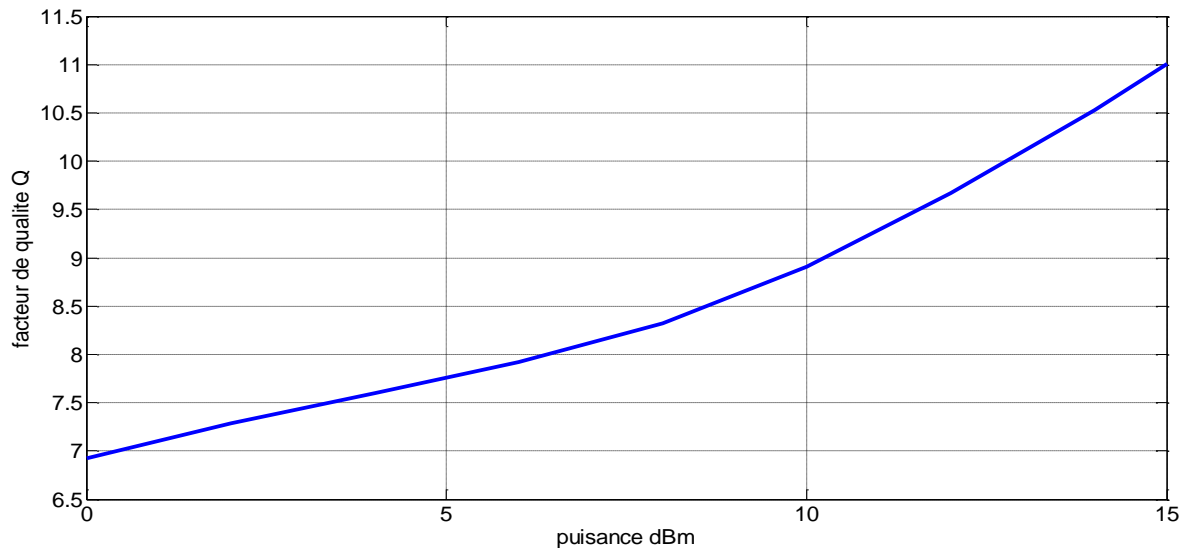
Le travail que nous allons effectuer consiste principalement de faire varier les paramètres de la liaison, comme la puissance émise par le laser, la longueur de la fibre monomode. Pour étudier la qualité de transmission on a deux paramètres importants à savoir : le facteur de qualité  $Q$  et le taux d'erreur binaire BER.

### III.6.1 Effet de variation de la puissance émise par le laser

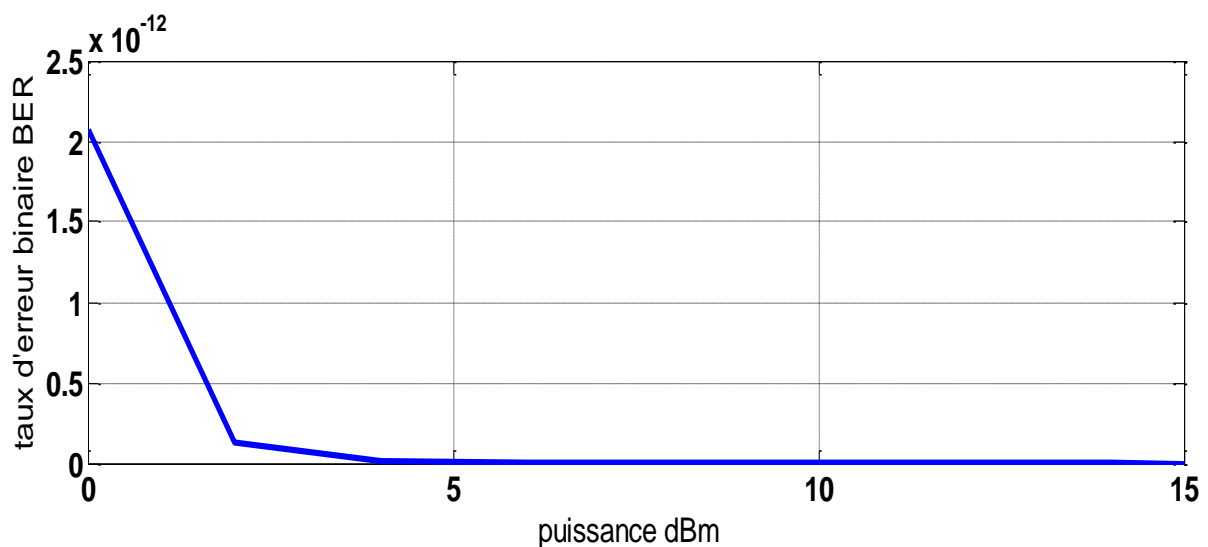
Les mesures suivantes sont faites en variant la puissance du laser tout en gardant une longueur de la fibre constante de 80km avec un débit de 1Gbits/s.

Les graphes des figures ci-dessus montrent la variation du facteur de qualité (Q) et du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la puissance émise du laser.

Les résultats de l'analyseur optique sont montrés sur les figures (III.3) e (III.4) :



*Figure III.3 : variation du facteur de qualité en fonction de la puissance émise par laser.*



*Figure III.4 : variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance émise par le laser.*

On constate, que plus on augmente la puissance émise du laser plus on obtient un meilleur facteur de qualité. On a augmentation de facteur de qualité jusqu'à atteindre le meilleur résultat de 11.01. On obtient aussi de très bonnes valeurs du taux d'erreur binaire pour des puissances allant de 0 dBm jusqu'à 4dBm à partir de cette puissance, il se stabilise pour un intervalle allant de 5 dBm à 15 dBm tend vers 0.

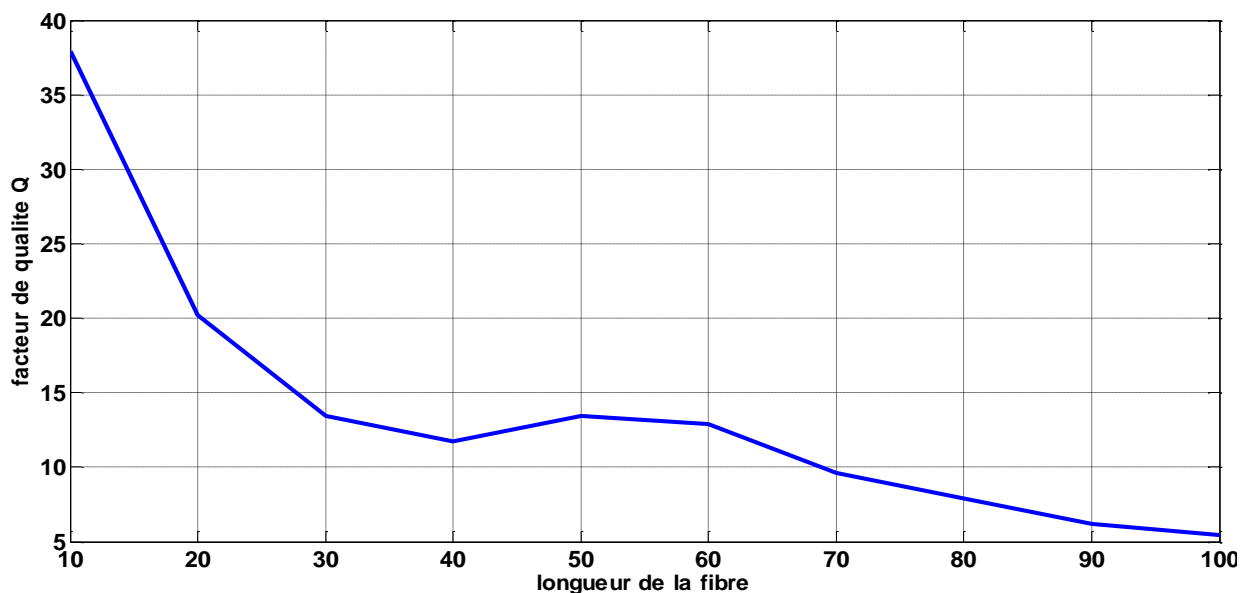
Dans tous les cas, le facteur de qualité est supérieur à 6,4 et le taux d'erreur binaire est inférieur à  $10^{-10}$ , témoignant d'une très bonne qualité de transmission.

### III.6.2 Effet de variation de la longueur de la fibre monomode

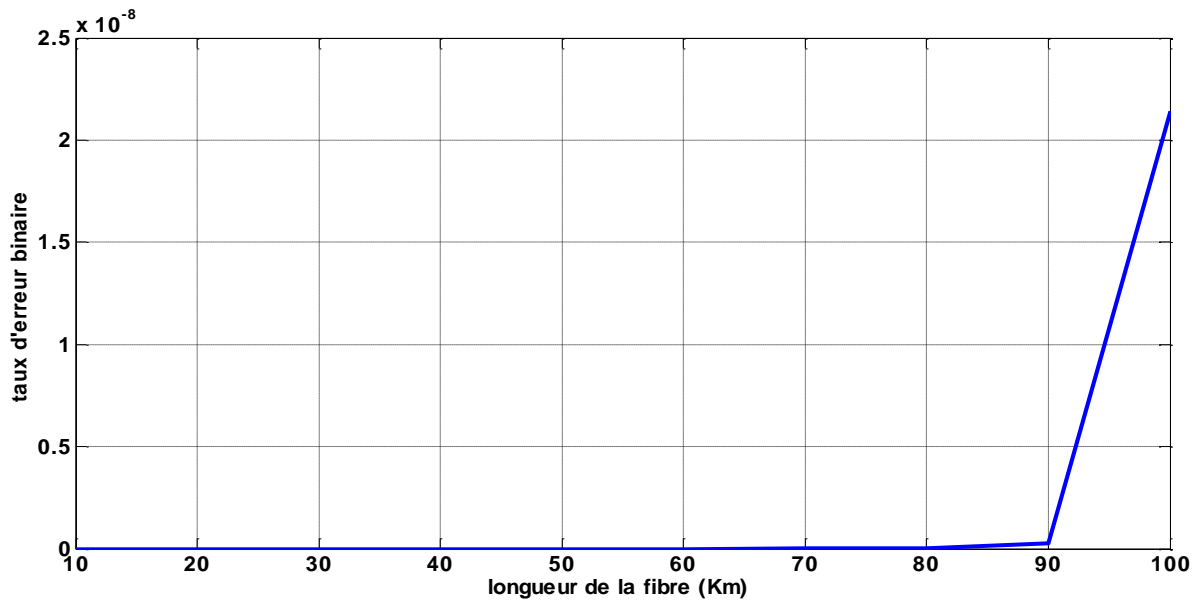
En générale en télécommunications optiques on considère qu'on a une bonne qualité de transmission pour un TEB variant entre  $10^{-9}$  et  $10^{-12}$ , dans ce qui suit on va prendre comme référence un TEB de  $10^{-10}$  ce qui correspond à un facteur de qualité de 6,4. On considère que pour un TEB inférieur à  $10^{-10}$  et un facteur de qualité supérieur à 6,4 on aura une bonne qualité du signal reçu.

En premier temps nous allons étudier l'effet de variation de la longueur de la fibre optique sur la qualité de la transmission.

Les figures 3.5 et 3.6, représentent la variation du facteur de qualité (Q) et du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la longueur de la fibre monomode.



*Figure III.5 : variation de facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre.*

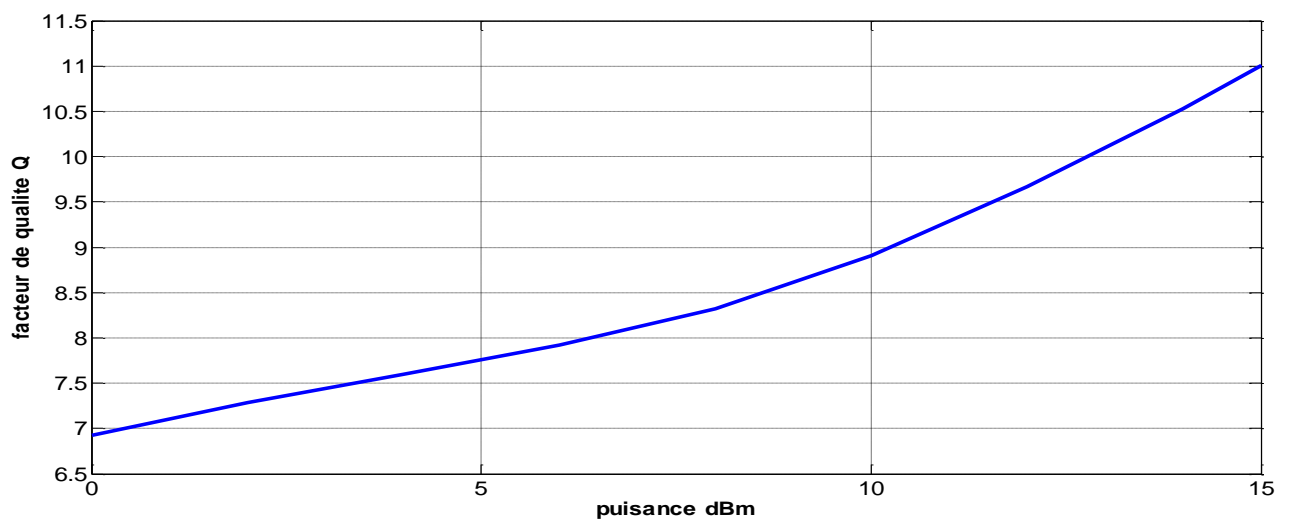


*Figure III.6 : variation de taux d'erreur binaire en fonction de la longueur de la fibre.*

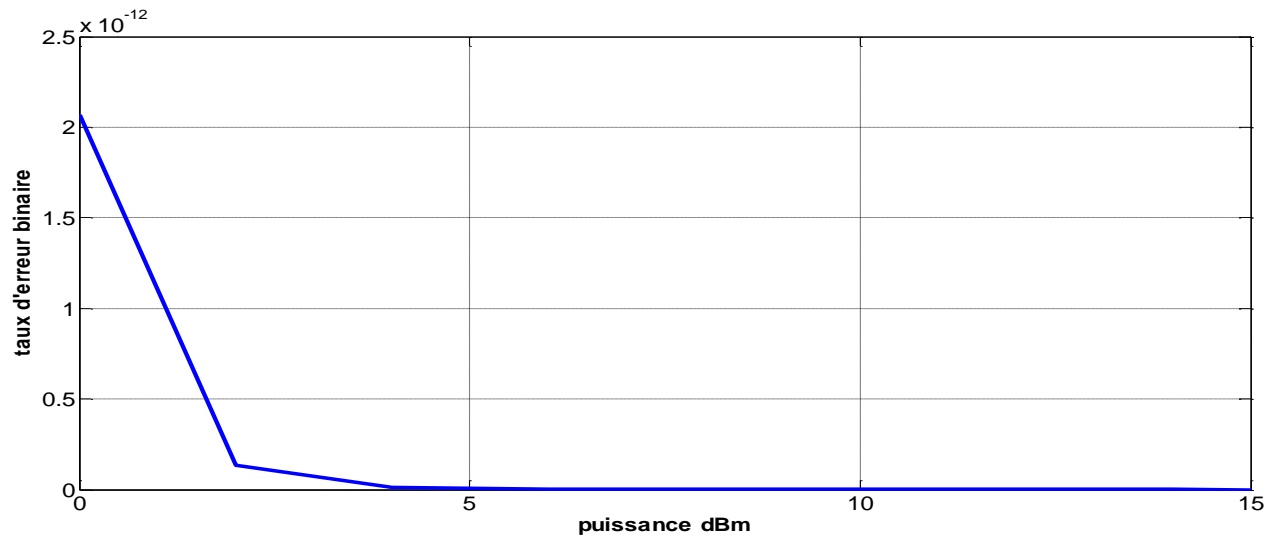
Les résultats indiquent un bon facteur de qualité de pour une longueur de 10km, plus on augmente la longueur de la fibre plus la qualité du signal diminue jusqu'à ce qu'elle se détériore à partir d'une longueur de 90km. Pour ce qui est du taux d'erreur binaire, qui est inversement proportionnel au facteur de qualité, il est négligeable pour 10km et il atteint une valeur de  $10^{-8}$  pour 100km.

### III.6.3 Effet du laser dans la liaison optique

Dans cette partie on va analyser la qualité de transmission de la liaison d'un débit de 1 Gb/s en absence de l'amplificateur donc nous allons paramétrer la diode laser sur une longueur d'onde de 1550 nm et une puissance de 0 dBm et on faire varier la longueur de la fibre, les résultats sont présents dans la figure (III.7).



*Figure III.7 : variation de facteur de qualité en fonction de la puissance émise par le laser.*



*Figure III.8 : variation de taux d'erreur en fonction de la puissance émise par le laser.*

On remarque a partir ces résultats plus on augmente la puissance du laser plus on obtient des bon résultats de facteur de qualité alors que le taux d'erreur binaire va ce diminue Sur l'intervalle de  $[0, 2]$  dBm mais a partir de 2 dBm les résultats de taux d'erreur binaire reste négligeables.

### Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons effectué nos recherches sur la variation de la qualité de transmission en agissant sur différents paramètres tel que la longueur de la fibre bidirectionnelle, la puissance du laser pour une liaison optique point à point avec amplificateur et sans amplificateur.

Et pour cela nous avons défini les différents critères pour améliorer le signal ainsi que la qualité de transmission: Facteur de qualité et taux d'erreur binaire.

L'étude de cette liaison nous a permet de visualiser les performances de bloc d'émission ou bien le laser a semi-conducteur ainsi que le support de transmission dans la liaison , donc on a conclu que le laser a semi-conducteur a des performances importante grâce à la puissance qu'il peut délivrer au cours de la liaison même si on a pas besoin d'un répéteur (amplificateur) à distance de 80 Km, tout en respectant le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire en télécoms optique.

Le principal objectif de ce travail était de faire une étude sur les lasers à semi-conducteur pour avoir ces performances dans une liaison optique long distance.

Le déploiement du réseau de télécommunications à haut débit nécessite le développement de nouveaux composants et architectures optoélectroniques adaptés à ces vitesses de transmission. Les enjeux stratégiques et économiques de ces développements découlent notamment de la nécessité de disposer, à assez court terme, de composants et d'outils économiquement viables (en matière de bas coûts de production et d'utilisation).

L'étude de ce projet a comporté trois chapitres qui nous ont amené aux conclusions suivantes :

Au cours du premier chapitre, nous avons fait une description détaillée sur la fibre optique et leurs types et on a conclu que la fibre optique a supplanté toutes les autres moyennes de transmissions ainsi on fait une étude théorique d'une liaison par fibre optique en précisant ces composants et en citant ces différents types.

Dans le deuxième chapitre nous avons parlé des lasers à semi-conducteur qui jouent un rôle si important en télécommunications optique. Elle a été largement déployée dans la transmission optique Par rapport aux critères de directivité, de monochromaticité et de rendement énergétique, le laser à semi-conducteur est sans conteste le dispositif le plus performant que l'homme ait pu réaliser dans sa quête vers la maîtrise de la lumière.

Le dernier chapitre de ce projet est consacré à la conception et la simulation d'une liaison optique longue distance jouant sur les différents paramètres la longueur de la fibre monomode ainsi la puissance d'émission du laser. On a aussi introduit en premier lieu liaison avec EDFA et en deuxième lieu une liaison sans EDFA pour avoir l'effet du laser dans la liaison optique.



- [1] Riadh SAIDI « ETUDE D'UNE STRUCTURE DE LIAISON PAR FIBRE OPTIQUE : CARACTERISATION DE LA PROPAGATION ET BILAN ENERGETIQUE » Mémoire de magister En Electronique, Université de Biskra, 2009.
- [2] Melle BILLAMI Hanane & Melle BENDAHDJANE Raouida, « étude d'un réseau optique ADM 10Gbit/s Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakri Belkaid-Tlemcen, Promotion juin 2013.
- [3] Pierre Lecoy, «Télécom sur fibres optiques», 3ème édition revue et augmentée.
- [4] T.Fettouhi, « Etude et planification d'un réseau de transport optique », Mémoire de fin D'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, Promotion juin 2009.
- [5] Jérôme Laurent « Communications optiques a très haut débit » examain probatoire spécialité électronique, 2004 a paris.
- [6] les télécommunications par fibre optique.
- [7] Irène et Michel Joindot et douze co-auteurs, « Les télécommunications par fibres Optiques ».
- [8] Mme. MESLI Fatima Zohra & Melle. BENBARKA Imane, « laser a semi-conducteur dans les communications optique sécurisé par les chaos » Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakri Belkaid-Tlemcen, Promotion juin 2015.
- [9] Marc Haelterman « cours de physique semi-conducteur » Service d'Optique et d'Acoustique Faculté des Sciences Appliquées Université Libre de Bruxelles.
- [10] HANNACHI Chaouki « Caractérisation de la réponse d'un Laser de télécommunication à une rampe de commande en température » Mémoire Présenté pour l'obtention du Diplôme de Magister en électronique, Année 2007/2008, université de badji mokhtar Annaba.
- [11] BENATMANE Kaled « étude de lasers a base de semi-conducteur III-V » Mémoire présenter Pour l'obtention de diplôme de Magister en électronique, promotion 2011, université -Hadj Lakhder – Batna.
- [12] Jérôme Pons « les lasers et leurs applications au domaine de télécommunication », rapport de stage, année 2002.
- [13] b.de cremou « les diodes laser : des principes aux développements récents » article.

[14] Mickaël FAUGERON « Diode laser 1.5  $\mu\text{m}$  de puissance et faible bruit pour l'optique hyperfréquence » Thèse de doctorat en photonique, Année 2012.

[15] Agrawal G.P. and Dutta N.K « Long Wavelength Semiconductor Lasers», Van Nostrand Reinhold (Electrical/Computer Science and Engineering Service), New York, 1986.

[16] A. G. Milnes and D. L. Feucht, « Hétéro-jonctions and Metal-Semiconductor Junctions », Academic Press, (1972).

[17] John H. Davies, « The physics of low-dimensional semiconductors», Cambridge University Press, (1998).

## **Résumé**

L'objectif de ce travail est de faire une étude sur une chaîne de transmission optique et les lasers à semi-conducteur pour avoir ces performances dans la liaison optique longue distance.

La simulation par le logiciel optisystem d'une liaison optique, a permis d'effectuer nos recherches sur la variation de la qualité de transmission en agissant sur différents paramètres tel que la longueur de la fibre bidirectionnelle, la puissance du laser pour une liaison optique point à point avec amplificateur et sans amplificateur.

Les indicateurs permettant de suivre les performances d'une liaison optique et de déterminer toute dégradation pouvant affecter la qualité de service de réseau ont été définis comme suivants : le taux d'erreur binaire BER, et le facteur de qualité Q.

**Mots clés** : transmission optique, laser à semi-conducteur, BER, facteur de qualité .