

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI, TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
ACADEMIQUE**

SPECIALITE: TELECOMMUNICATIONS ET RESEAUX

THEME :

**SYSTEME DE COMMUNICATION OPTIQUE :
ETUDE DES DIFFERENTS ELEMENTS ET DE
LEURS BRUITS RESPECTIFS**

Proposé et dirigé par :

M^r TAZIBT.S

Présenté par :

M^r Idir Ziri

M^r Larbani Mehdi

Promotion: 2012/2013



REMERCIEMENT

D'abord, nous tenons à remercier le bon dieu de nous avoir accordée la force et le courage de munir à terme ce mémoire.

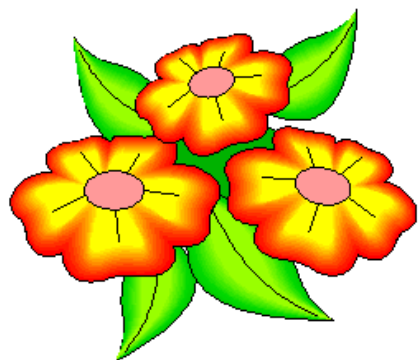
A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur Mr -TAZIBT. S pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition,

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant tout, trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation de master dans les meilleures conditions.

idir & larbani



Dédicace

✎ *Je dédie ce modeste travail :*

- ✎ *A Mes très chères parents, pour leur sacrifice et leur dévouement pour mon bonheur.*
- ✎ *A Mes frères et sœurs et toute la famille sans exception.*
- ✎ *A Tous mes amis.*
- ✎ *A toute ma promotion.*
- ✎ *A ceux qui m'aiment*

∞ Ziri ∞



- ✎ *A Mes très chères parents, pour leur sacrifice et leur dévouement pour mon bonheur.*
- ✎ *A Mon frère et ma sœur et toute la famille sans exception.*
- ✎ *A Tous mes amis.*
- ✎ *A toute ma promotion*
 - ✎ *A ceux qui m'aiment*

Je dédie ce travail

∞ MEHDI ∞

Sommaire :

Introduction générale.....1

Chapitre I : Emetteur du signal optique et ses bruits : la diode laser

I.1 Généralités sur les lasers.....3

I.1.1 Introduction3

I.1.2 Le laser.....3

I.1.3 L'émetteur : la diode laser à semi-conducteur3

I.1.3.1 Fonctionnement d'un laser à semi-conducteur3

I.1.3.2 Principe de l'oscillateur laser5

I.1.3.3 Les différents types de Laser à semi-conducteur7

I.1.4 La modulation.....8

a) Modulation directe.....8

b) Modulation externe.....8

I.2 Bruits du laser.....9

I.2.1 Introduction.....9

I.2.2 Origines des bruits.....9

I.2.2.1 Bruits d'origine technique.....9

I.2.2.2 Bruits d'origine quantique.....10

I.2.3 Etude des bruits du laser.....10

I.2.4 Bruit de grenaille.....12

I.2.5 Réduire le bruit d'origine quantique.....12

I.2.6 Réduire le bruit d'origine technique.....13

I.3 Conclusion13

Chapitre II : Canal de transmission et ses bruits : fibre optique et amplificateur

II.1 Généralités sur la fibre optique.....14

II.1.1 Introduction.....14

II.1.2 La fibre optique.....14

II.1.2.1 Description.....14

II.1.2.2 Le guidage de signal optique dans une fibre.....15

II.1.2.3 La réflexion totale interne.....16

II.1.3 Caractérisation de la fibre.....17

a. L'atténuation.....17

b. Dispersion.....18

II.1.4 Les différents types de fibre optique.....19

a. Fibre multimode.....	19
• fibre multimode à saut d'indice.....	19
• fibre multimode à gradient d'indice.....	20
b. Fibre monomode.....	20
II.1.5 Fibre en télécom.....	22
a /Utilisation de différente fibre optique.....	22
b /Les application de la fibre monomode.....	23
c /Avantages et inconvénients de la fibre optique.....	23
c.1 avantages.....	23
c.2 inconvénients.....	24
II.1.6 Evolution de la capacité de transmission.....	24
II.1.7 Evolution des services.....	24
II.2 Amplification optique.....	25
II.2.1 Introduction.....	25
II.2.2 Généralités sur l'amplification optique.....	26
II.2.3 Les amplificateurs à fibre dopée(EDFA).....	26
II.2.4 Applications des EDFA.....	28
a)booster.....	28
b)amplificateur sur une ligne optique.....	29
c)Pré-Amplificateur.....	29
II.2.5 Avantages et inconvénients.....	29
a)Avantage.....	29
b) Inconvénients.....	29
II.3 Bruits des amplificateurs optiques.....	30
II.4 Conclusion.....	32

Chapitre III : Le récepteur du signal optique et ses bruits : le photodétecteur

III-1 Généralités sur les photodétecteurs.....	33
III.1.1 Introduction	33
III.1.2 Les concepts de base.....	33
III.1.3 Principe de la photodétection.....	33
III.1.4 Caractéristiques d'une photodétection.....	34
III.1.4.1 Le coefficient d'absorption.....	34
III.1.4.2 Le rendement quantique.....	35
III.1.4.3 La sensibilité.. ..	35
III.1.5 Les différents types des phodétecteurs.....	36

III.1.5.1 La photodiode...	37
III.1.5.2 La cellule photovoltaïque.....	38
III.1.5.3 Photodiode PDA (à avalanche).....	38
III.1.5.4 Photodiode Schottky.....	39
III.1.5.5 Photodétecteur a transfert de charge (CCD).....	39
III.1.5.6 Les photodiode PIN	40
III.2 Bruit du photodétecteur.....	42
III.2.1 Le bruit de grenaille (shot noise).....	42
III.2.2 Le bruit thermique.....	42
III.2.3 Le bruit en 1/f.....	43
III.2.4 Le bruit de courant d'obscurité.....	43
III.3 Conclusion.....	43

Chapitre IV : Le facteur de bruit

IV.1 Introduction.....	44
IV.1.1 Facteur de bruit.....	44
IV.1.2 Facteur de bruit du laser.....	45
IV.1.3 Facteur de bruit optique.....	46
IV.1.4 Facteur de bruit d'une photodiode.....	47
IV.2 Facteur de bruit de la liaison optique.....	48
IV.3 Conclusion.....	49
Conclusion générale.....	50

Bibliographie

INTRODUCTION GENERALE

Afin d'approcher et d'apprécier les techniques des communications optiques à très haut débit, nous aimerions retracer leurs histoires, leurs évolutions, en montrant ainsi les étapes et l'essor exponentiel que connaissent aujourd'hui ces véritables « Autoroutes de l'Informations ». Au début des années 50, l'idée de transmettre des signaux à haut débit en utilisant des porteuses dans les régions optiques était déjà établie. Malheureusement, à cette époque là, ni les sources de lumière, ni le milieu de transmission appropriés n'étaient disponibles.

En 1960, suite à l'invention de la diode laser, l'attention des chercheurs s'est focalisée sur le développement d'un milieu de transmission adéquat. A la fin des années 60, le concept de confinement de la lumière, ainsi que la possibilité d'utiliser des fibres optiques, comme milieu de transmission étaient largement diffusés. Le seul problème qui restait à résoudre, était le haut niveau de perte de propagation qui, à l'époque, atteignait 1000 dB/km.

Au début des années 70, deux événements ont beaucoup favorisé le développement des transmissions par fibres optiques. D'une part, la première diode laser AsGa a été réalisée. D'autre part, des fibres optiques avec des atténuations de l'ordre de 20 dB/km, pour des longueurs d'onde proche du micron, ont été développées.

La 1^{ère} génération commerciale de système de communication à fibre optique est disponible dès 1980. Elle a été réalisée à l'aide d'une fibre multimode à base de silice à $\lambda=0,8 \mu\text{m}$ ($\alpha \approx 5 \text{ dB/km}$) et nécessitant un répéteur tous les 10 km pour un débit de 45 Mb/s. Par ailleurs, une 2^{ème} génération voit le jour, en utilisant cette fois-ci la même fibre optique pour $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ ($\alpha \approx 1 \text{ dB/km}$). Dans la première génération, des lasers à hétérojonctions du type GaAs/GaAlAs ont été utilisés, tandis que dans la deuxième génération des composants avec des hétérojonctions de type InGaAsP/InP ont permis de les remplacer. Au début de leurs introductions, l'avantage le plus important, était une plus faible atténuation des fibres à $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ ($\alpha \approx 1 \text{ dB/km}$), et donc une augmentation de la distance entre répéteurs, avec un débit de 100 Mb/s (cette limite est due à la dispersion intermodale des fibres multimodes).

A la fin des années 80, grâce aux fibres monomodes à base de silice, disponibles sur le marché, des systèmes avec des débits de transmission de 1,7 Gb/s, et des séparations entre répéteurs de 50 km. Les fibres présentent une atténuation d'environ 0,6 dB/km à $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$. Par ailleurs, le niveau d'atténuation le plus faible se trouve quant à lui à $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ (fenêtre de transmission). Ceci a motivé le développement d'une troisième génération de systèmes de transmission optique.

En 1989, les systèmes utilisent la longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$ avec un débit de 10 Gb/s. Cependant pour atteindre ce débit de transmission sur de longue distance, il aura été nécessaire

d'utiliser des diodes lasers monomodes et des fibres à dispersion décalée. Pour les systèmes de 3ème génération, les distances de régénération atteignent 60 à 70 km en utilisant le schéma classique de la détection d'amplitude (récepteur hétérodyne ou cohérent).

En 1990, les amplificateurs optiques dopés à l'erbium (EDFA) apparaissent. Ils introduisent un gain de 40 dB, séparés tous les 60 à 100 km. Ceci permet de se passer des différents répéteurs qui nécessitent des transductions électro-optiques et opto-électroniques. Ils permettent ainsi des liens de transmissions sur plusieurs milliers de kilomètres (régénération purement optique).

Nous nous intéressons à l'étude des performances d'une telle liaison en caractérisant des différents blocs : diode laser, fibre optique, et photodétecteur. Ce travail de mémoire se divise en quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire est une description générale de l'émetteur d'un signal optique qui est la diode laser ainsi ses bruits.

Dans le deuxième chapitre nous allons pencher sur les généralités de la transmission Par fibre optique. Ainsi nous présenterons la description des différents types de la fibre optique, les avantages et inconvénients.

Dans le troisième chapitre nous localisons le récepteur de signal optique, qui est le photo-détecteur dans une chaîne de transmission optique. Nous exposons d'une façon générale les types des différents photo-détecteurs qui existent dans l'électronique et leur principe de fonctionnement, ainsi leurs bruits.

Le quatrième chapitre consacré à l'étude de facteur de bruit de chaque bloc , et le facteur de bruit de la chaîne.

Chapitre I :

Emetteur du signal optique et ses bruits : la diode laser

I.1 Généralités sur les lasers

I.1.1 Introduction

Dans les liaisons optiques hyperfréquences, comme dans tous les systèmes de communication, il existe trois blocs importants pour effectuer la transmission de l'information: L'émetteur, le canal de communication et le récepteur. Dans ce cas, l'émetteur qui est la diode laser, joue le rôle de porteuse et le modulateur celui de convertisseur électrique/optique du signal. Le canal de transmission est une fibre optique. Cette dernière permet de transporter la porteuse optique modulée. Enfin, le photorécepteur assume la détection du signal électrique véhiculé en effectuant une conversion optique/électrique

Dans les paragraphes suivants, nous décrirons les caractéristiques de composants qui constituent les éléments fondamentaux des liaisons optiques. Dans la suite, nous aborderons les critères habituellement utilisés pour décrire les performances de liaisons complètes, à savoir le gain, la bande passante et le bruit.

I. 1.2 Le laser

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, 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 (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement), est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre.

I.1.3 L'émetteur : la diode laser à semi-conducteur

I.1.3.1 Fonctionnement d'un laser à semi-conducteur

Dans les systèmes de communications optiques, la source optique la plus utilisée est la diode laser, (acronyme de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation »). La diode laser se base sur trois processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière. Ces processus sont l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. (Figure I.1)

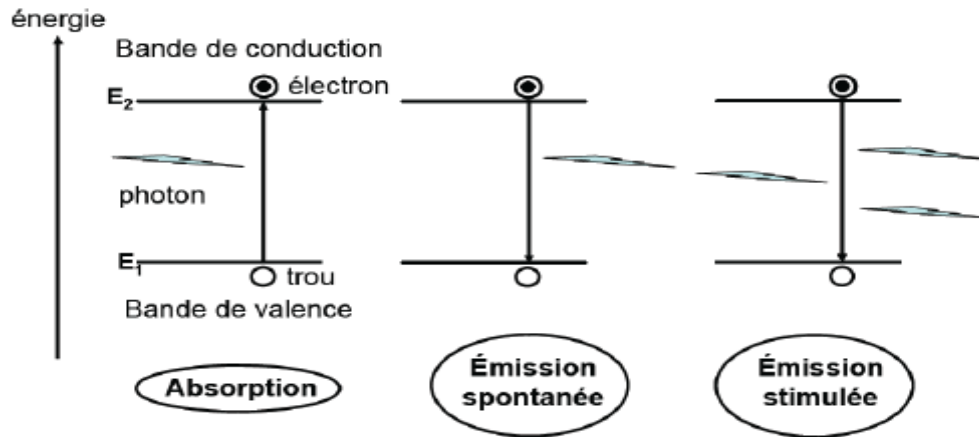


Figure I. 1 : Les processus d'interaction entre la matière et le rayonnement (Mécanismes fondamentaux de fonctionnement d'une diode laser)

a) *L'émission spontanée* : De sa propre initiative, l'électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant un photon spontané.

b) *L'absorption* : En absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé (électron dans la bande de conduction et trou dans la bande de valence).

c) *L'émission stimulée* : Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation que le photon incident. On parle alors de lumière cohérente. Avec l'émission stimulée s'introduit la notion de gain ou d'amplification du rayonnement incident puisque, à partir d'un photon, on en obtient deux.

Pour obtenir l'effet laser, il est nécessaire de privilégier l'émission stimulée. Deux conditions doivent être réalisées pour favoriser cette émission stimulée et ainsi obtenir l'effet laser :

- 1) Il faut avoir suffisamment d'électrons dans l'état d'énergie supérieure. Dans un semi-conducteur, ceci est réalisé par une opération dite de pompage électrique qui consiste à promouvoir un maximum d'électrons dans la bande de conduction : c'est ce qu'on appelle une inversion de population.
- 2) Il faut favoriser l'émission stimulée : il faut donc avoir suffisamment de photons incidents (excitateurs). Pour cela, on enferme le semi-conducteur dans une cavité

résonante constituée par exemple par un résonateur du type Fabry-Pérot, obligeant ainsi l'énergie lumineuse à s'accumuler.

I.1.3.2 Principe de l'oscillateur laser

Un laser est une source de lumière cohérente, c'est à dire une onde électromagnétique sinusoïdale dans le temps (mathématiquement parlant). Un laser peut donc être vu comme un oscillateur. Tout oscillateur peut être présenté selon la sémantique propre à l'automatique comme un circuit bouclé composé d'un amplificateur et d'un filtre sélectif (figure I.2).

Les conditions d'oscillation, c'est à dire les conditions d'émission du laser, sont de deux natures:

- 1) la condition de gain nécessite que le gain total de la boucle soit supérieur ou égal à 1.
- 2) la condition de phase qui met en jeu la propagation des photons émis à travers la cavité, implique que seules certaines fréquences (longueurs d'ondes) pourront être émises.

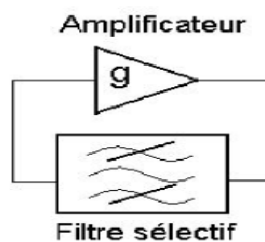


Figure I. 2 Principe d'oscillation.

Considérons une cavité Fabry Pérot, dont les deux miroirs (ayant le même coefficient de réflexion). Au seuil du laser, l'onde lumineuse se retrouve identique à elle même, c'est à dire que son changement d'amplitude est égal à 1, d'où la relation :

$$R e^{-i2L\beta} e^{gL} e^{-\alpha L} = 1 \quad (I.1)$$

- R est le coefficient de réflexion de l'onde sur les miroirs de la cavité.
- L est la longueur de la cavité.
- β est la constante de propagation de l'onde égale à $2\pi nr / \lambda$.
- g est le coefficient de gain (= gain en intensité / unité de longueur)
- α est le coefficient d'absorption des photons à l'intérieur de la cavité.

La séparation des parties réelles et imaginaires de la relation (I.1), mène aux deux relations (I.2) et (I.3) :

$$g = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) = \alpha_i + \alpha_m \quad (\text{I.2})$$

Où α_m désigne les pertes résonantes (pertes par les facettes).

Et

$$\lambda = \frac{2nrL}{m} \quad (\text{I.3})$$

- λ est la longueur d'onde d'émission laser.
- nr est l'indice de réfraction réel du matériau.
- m est un entier naturel non nul.
- La relation (I.2), montre qu'au seuil, le gain compense les pertes.
- La relation (I.3), traduit ce qu'on appelle la condition de phase dans un laser : les seules longueurs d'ondes susceptibles d'osciller dans la cavité sont celles qui satisfont cette relation.
- Comme il a été précisé précédemment, le laser doit remplir simultanément les conditions de gain et de phase afin de pouvoir fonctionner. Le spectre optique sera donc la condition de gain (figure I.3-a), modulée par le peigne Fabry-Pérot (figure I.3-b), l'ensemble étant inégalement amplifié par le phénomène d'émission stimulée. Ce qui donne le spectre d'émission (la figure I.3-c)

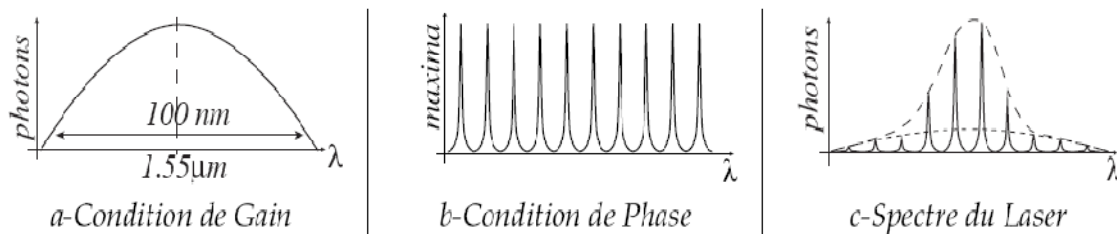


Figure I. 3 Condition de Gain, condition de phase et spectre d'un Laser Fabry-Pérot

D'après la figure I.3-b, on peut dire que la cavité joue le rôle d'un filtre en longueur d'onde, ce qui veut dire que l'onde n'est amplifiée qu'à certaines valeurs de fréquences précises (avec $v = \frac{c}{\lambda}$).

I.1.3.3 Les différents types de Laser à semi-conducteur :

Les quatre principaux types de lasers à semi-conducteurs sont :

- Les lasers Fabry-Pérot (FP) sont peu performants en bruit mais sont peu coûteux ; ils sont multimodes et leur longueur d'onde atteint les 1550 nm; on les utilise par exemple comme source de puissance optique continue ou dans les liaisons numériques;
- Les lasers Distributed Feedback (DFB) ont de très bonnes performances en bruit et sont largement utilisés pour les télécommunications ; ils sont monomodes et leur longueur d'onde atteint les 1550 nm;
- les lasers Distributed Bragg Reflector (DBR) ; contrairement aux lasers DFB (historiquement plus anciens), 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 donnée. Ils restent plus difficiles à réaliser et présentent un coût élevé;
- Les lasers Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) ; leur longueur d'onde atteint pour l'instant les 1550 nm et leur intérêt principal est d'être plus adapté à la fabrication en grand nombre. Cependant la technologie de fabrication des VCSELs à 1550 nm n'est pas encore mature, et ils présentent encore quelques inconvénients. En comparaison aux DFBs leur puissance émise est plus faible et leurs propriétés spectrales et en bruit sont moins bonnes.

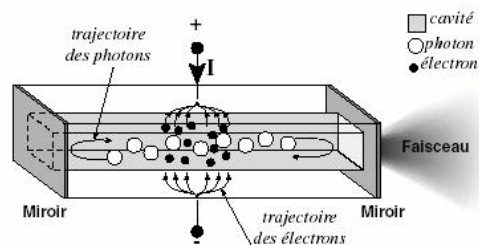


Figure I. 4 : Structure d'un laser classique Fabry-Pérot

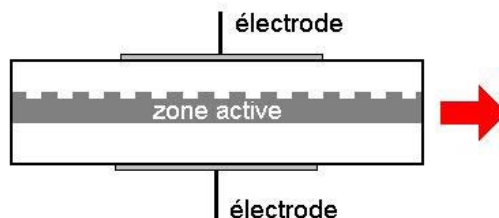


Figure I. 5 : Structure d'une diode laser DFB

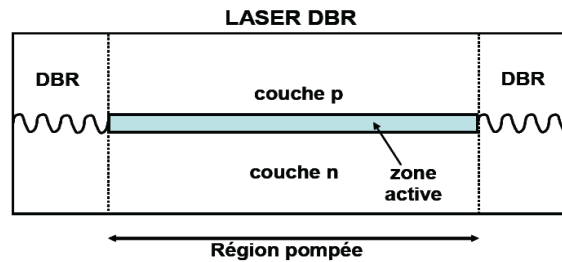


Figure I.6 : Structure d'un laser DBR

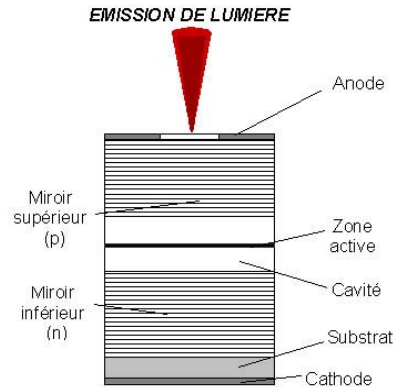


Figure I. 7 Structure d'une diode laser à cavité verticale émettant par la surface
(Typiquement VCSEL à 850 nm)

I.1.4 La modulation :

Un modulateur, c'est un système capable de modifier les paramètres de la lumière (essentiellement amplitude ou phase ; mais cela pourrait être : polarisation, direction de propagation, fréquence, répartition de modes, etc.) en fonction d'un signal de commande. Un modulateur est un système d'interaction. Les interactions entre phénomène physique de nature différente - mécanique (ou élastique), acoustique, magnétique, etc.

On peut moduler ces sources de deux manières différentes.

a/ Modulation directe : on agit sur le courant de jonction qui provoque l'effet laser. En première approximation, la puissance optique délivrée varie linéairement en fonction du courant.

Ce type de modulation provoque une modification dynamique du spectre due à la conversion amplitude-fréquence (désignée par le terme anglo-américain de chirp) et du diagramme de rayonnement, avec des effets nuisibles aux grandes vitesses de modulation.

b/ Modulation externe : le champ émis par la source n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial où l'on peut provoquer une modulation de phase ou d'amplitude. Les modulateurs d'amplitude ne présentent aucune propriété de linéarité mais introduisent beaucoup moins de conversion amplitude-fréquence.

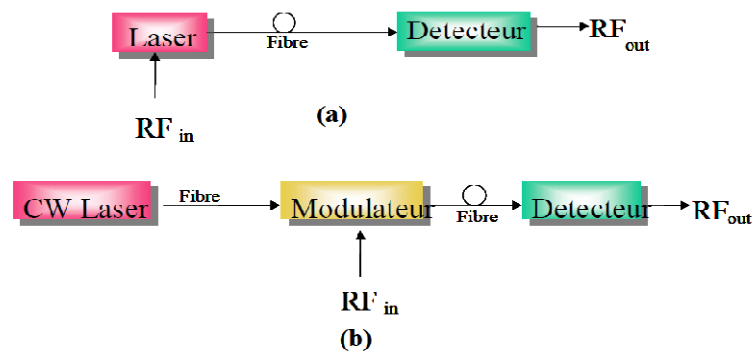


Figure (I.8) : liaisons optiques à modulation directe (a) et modulation externe (b)

I.2 Bruits du laser :

I.2.1 Introduction:

Un laser comporte toujours du bruit relié à la fluctuation d'une grandeur physique de la lumière. Les types de bruits rencontrés sont nombreux et dépendent du mode de fonctionnement du laser.

I.2.2 Origines des bruits:

Pour arriver à réduire les bruits laser et à lire une courbe de bruits, il est nécessaire d'en comprendre l'origine et l'influence des différents bruits laser. En fait, tous les bruits intrinsèques au laser ont des origines qui peuvent être classées dans deux catégories : les bruits d'origine technique et les bruits d'origine quantique. Les bruits extrinsèques aux lasers seront ceux reliés à la mesure.

I.2.2.1 Bruits d'origine technique:

Les laséristes se sont beaucoup intéressés aux origines technique de bruits afin de les corriger, car ils ont une influence directe sur la stabilité en puissance et en pointé du laser. Ce domaine est donc très bien maîtrisé par certains fabricants. Par contre, bien que la compréhension de ces origines soit beaucoup plus intuitive que les origines quantiques. Généralement les bruits d'origine technique sont causés par:

- du bruit de la pompe du laser (dont son alimentation).
- des battements de modes.
- des vibrations mécaniques du laser.
- des vibrations acoustiques du laser.
- des variations lentes ou rapides de la température (soit de la pièce, soit d'une composante du laser : milieu de gain, miroir, absorbant saturable...)

-d'une variation mécanique active ou passive sur un composant de la cavité (cale piézo-électrique, moteur...) et bruit de leur alimentation.

I.2.2.2 Bruits d'origine quantique:

Souvent dans les lasers, la contribution technique des bruits est bien plus importante que la contribution quantique pour une grande plage de fréquences et c'est la raison pour laquelle les bruits d'origine quantique sont généralement moins étudiés. La contribution quantique provient d'ailleurs pour beaucoup du milieu de gain laser et du type de cavité choisi et c'est rarement l'obtention d'un laser ayant de faibles bruits qui en guide la conception.

Si dans le domaine de l'électronique, la limite inférieure du bruit est donnée par les bruits thermiques, dans le domaine de l'optique, elle est donnée par la mécanique quantique. Ceci s'explique par le fait que l'énergie d'un photon laser est bien plus importante que l'énergie thermique ($K_B T$) à la température de la pièce. Donc, les photons sont à l'origine de la contribution quantique aux bruits.

- Les mécanismes à l'origine de la contribution quantique sont:
 - l'émission spontanée.
 - les fluctuations du vide avec comme port d'entrée:
 - Le coupleur de sortie d'un laser.
 - les pertes dans une cavité.
 - le partage dans les lames séparatrices.

I.2.3 Etude des bruits du laser

Le signal optique délivré par une diode laser présente des fluctuations en amplitude et en fréquence, même si le laser est polarisé avec un courant constant. Les deux mécanismes fondamentaux qui concourent à la génération du bruit sont l'émission spontanée et la recombinaison électron-trou.

Les équations d'évolution représentant le bilan des interactions entre les électrons N et les photons P sont donc modifiées par l'introduction d'un terme additif concernant le bruit appelé force de Langevin [1] et [6], comme il est montré en (I.4)

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{q} - \frac{N}{\tau_n} - G \cdot P + F_N(t) + F_N \cdot \frac{1}{f}(t) \quad (I.4)$$

$$\frac{dP}{dt} = G \cdot P + R_{SP} - \frac{P}{\tau_P} + F_P(t) \quad (1.5)$$

Où $F_N(t)$, $F_N \cdot 1/f(t)$ et $F_P(t)$ sont les forces de Langevin.

(Nous expliquerons par la suite l'intérêt de l'introduction du terme FN, $1/f(t)$).

La résolution de ces équations décrit les fluctuations d'amplitude optique du laser. On définit ainsi le **bruit relatif d'intensité RIN** (de l'anglais, « Relative Intensity Noise ») comme le rapport entre la densité spectrale des fluctuations du nombre de photons et le nombre de photons au carré, ou entre la densité spectrale de fluctuations de puissance optique et le carré de la puissance optique moyenne

$$\text{RIN}(f) = \left\langle \frac{\Delta P_{OPT}^2}{P_{OPT}^2} \right\rangle$$

- ΔP_{OPT}^2 est la moyenne carrée des fluctuations de la puissance optique et P_{OPT} est la puissance optique moyenne.

Le RIN s'exprime en Hz^{-1} mais il est généralement présenté en décibel et donc s'exprime alors en dB/Hz , puisque le bruit est intégré dans 1 Hz de bande.

Un exemple de résultats de mesure du RIN haute fréquence est représenté en figure (I.9). Ces courbes montrent clairement la diminution du RIN quand le courant de polarisation augmente. On observe aussi la fréquence de résonance du laser et le pic de RIN correspondant.

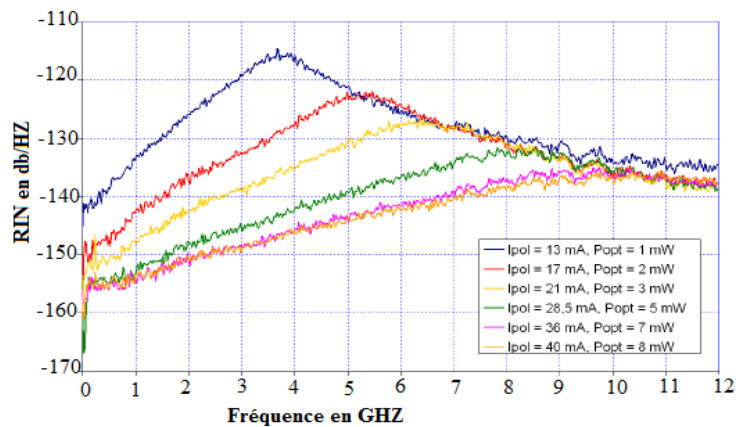


Figure I. 9 RIN aux hautes fréquences du laser FU68-PDF en fonction de son courant de polarisation (et de la puissance optique émise)

Comme tout composant électronique, le laser possède aussi à des fréquences inférieures à quelques MHz une distribution spectrale du bruit qui est caractérisée par une remontée rapide du bruit suivant une pente en $1/f$, à laquelle se superposent parfois des composantes spectrales

différentes (par exemple du bruit de génération recombinaison) [2], [3] et [4]. L'origine du bruit en $1/f$, en particulier dans les lasers, est malheureusement peu détaillée [5].

Dans une diode laser, les fluctuations optiques basses fréquences sont attribuées à des fluctuations électriques basses fréquences. C'est pour cette raison qu'il a été nécessaire, afin de modéliser correctement le bruit basse fréquence, d'introduire une source de bruit de Langevin FN, $1/f(t)$ unique sur les électrons dont la densité spectrale a une dépendance en $1/f$.

Ces deux composantes basses et hautes fréquences du RIN sont parfaitement indépendantes l'une de l'autre.

I.2.4 Bruit de grenaille:

Pour les faisceaux laser, le bruit d'intensité minimum est appelé bruit de grenaille (shot noise). Il s'agit du bruit blanc d'intensité (Indépendant de la fréquence) à sa limite quantique. Il ne s'agit pas du plancher de la mesure, mais bien du bruit minimum déterminé par la quantique. Cette limite est fixée par la nature discrète des photons et des électrons et sa principale contribution est le bruit de fluctuations du vide. Le bruit de grenaille est atteint par plusieurs lasers à des fréquences bien au dessus de la fréquence des oscillations de relaxation du laser. Ce bruit minimum est vraiment une propriété du champ laser plutôt que seulement un effet de la photo détection. De bonnes mesures de bruits de grenaille doivent être faites en détectant la puissance totale du laser en utilisant au besoin des séparatrices et plusieurs photodiodes puisque l'atténuation du faisceau laser entraîne un bruit quantique supplémentaire.

I.2.5 Réduire le bruit d'origine quantique:

- Choisir un matériau laser quatre niveaux
 - Moins d'émission spontanée: pas de réabsorption de l'émission laser.
- Choisir un matériau laser avec un niveau supérieur ayant une durée de vie plus courte:
- Choisir un matériau ayant une largeur de raie la plus petite possible mais qui supporte quand même la durée des impulsions souhaitée :
 - Moins de bruit de la fréquence centrale du laser dans la partie des basses fréquences de bruit, moins de sensibilité à la dispersion
- Pomper bien au dessus du seuil laser:
 - Amortissement des oscillations de relaxation.

I.2.6 Réduire le bruit d'origine technique:

- Avoir une cavité stable optiquement.
- Avoir un laser isolé des sources de vibrations acoustiques et mécaniques dont celles du sol.
- Avoir un bon contrôle de la température.
 - Température de la pièce.
 - Température du cristal et de la diode de pompe.
- Avoir peu de variations de la température des montures de miroir (chasse aux faisceaux parasites sur les montures)
- Avoir un laser de pompe peu bruyant.
- Utiliser des alimentations peu bruyantes.
- Optimiser la conception du laser pour qu'il réagisse moins aux influences du bruit qu'il soit peu sensible à l'alignement.
- Faire en sorte que le laser ne puisse pas changer de mode en cours d'opération (mode hopping), surtout pour les lasers mono-fréquence, mais aussi pour les diodes lasers en s'assurant qu'elles ne changent pas de température.

I.3 Conclusion :

Dans la mesure du possible, un maximum de ces critères doit être appliqué pour développer un laser intrinsèquement peu bruyant, ou à tous le moins, ayant la capacité de donner un laser peu bruyant. Toutefois, le niveau de bruit pour une bonne injection du laser dans un Fabry-pérot de haute finesse est impossible à atteindre directement avec le laser. Par conséquent, il faudra asservir de manière active entre elles les deux cavités, afin de réduire de façon plus importante les bruits du laser. Ceci dit, moins le laser sera bruyant et moins le spectre de bruit ne présentera de défauts, plus il sera simple à asservir.

Chapitre II :

**Canal de transmission et ses bruits : fibre optique
et amplificateur**

II.1 Généralités sur la fibre optique

II.1.1 introduction :

Les fibres optiques ont été inventées par Tyndall qui a découvert qu'on peut guider la lumière dans la fibre optique par le phénomène des réflexions internes totales. Des fibres de diamètre de 1 à 2 ont été utilisées dans les endoscopes.

En 1966 Kao et Hocham ont proposé l'utilisation des fibres optiques dans les télécommunications, mais à l'époque les fibres optiques représentaient des pertes de transmission de l'ordre de 1000 dB/km, alors que dans l'atmosphère ces pertes étaient

De quelques dB/km. Kao et Hocham ont prouvé dans leurs travaux que les grandes pertes étaient dues aux impuretés dans les matériaux constituant la fibre. En utilisant des fibres de silice pure les pertes ont été réduites à 20 dB/km en 1970 par Karpon, et c'est à ce moment là que les fibres optiques ont été introduites dans les télécommunications.

II.1.2 La fibre optique

II.1.2.1 Description

Une fibre optique est un guide d'onde diélectrique cylindrique qui possède généralement une symétrie de révolution.

Une fibre est constituée par deux couches de matériaux transparents à base de silice appelées le cœur, d'indice de réfraction n_1 , et la gaine optique qui entoure le cœur, d'indice n_2 (Figure II.1).

L'indice n_1 est supérieur à n_2 ce qui garantit la réalisation de la condition de la réflexion totale sur la gaine d'un rayon se propageant dans le cœur et qui permet le guidage.

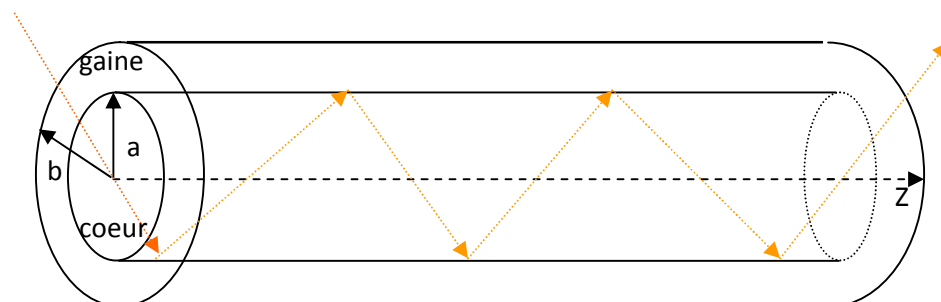


Figure (II.1) : Réflexion interne total dans une fibre optique

Une fibre a des dimensions de l'ordre de la centaine de micromètre. Le diamètre de la gaine b , est en général de $125\ \mu\text{m}$ mais peut aussi être de $140\ \mu\text{m}$ (cas de certaines fibres multimodes). Le rayon a de cœur, quant à lui, varie de 1 à $100\ \mu\text{m}$.

II.1.2.2 Le guidage de signal optique dans une fibre :

Dans une fibre optique standard, la différence d'indice entre le cœur et la gaine est souvent faible, de l'ordre de quelques 10^{-3} . On réalise alors l'approximation en guidage faible

Lorsque :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Avec Δ , différence relative d'indice.

Dans ce cadre, certaines modes dits dégénères possédant la même constante de propagation axiale. Ces champs modaux sont polarisés de manière rectiligne et sont appelés modes **LP** (linearly polarised ou en français linéairement polarisés).

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine (figure II.2). Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui de cœur (une différence de quelques % est suffisante).

La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. L'ouverture numérique (O.N) représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptré cœur gaine de la fibre.

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

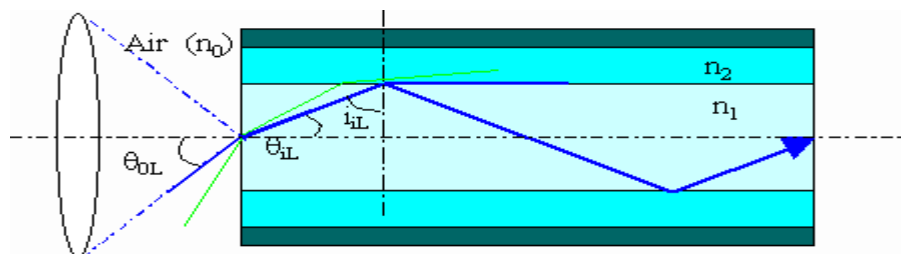


Figure (II.2) Ouverture numérique d'une fibre optique

Afin de faciliter l'injection de la lumière dans la fibre à l'entrée, on a intérêt à avoir l'angle limite \varnothing le plus grand possible. Ceci s'obtient pratiquement en choisissant des indices n_1 et n_2 très proches.

La plupart des fibres sont fabriquées à base de silice, matériau abondant et peu cher. Pour façonner les profils d'indice, la silice est dopée avec du dioxyde de germanium ou du pentoxyde de phosphore pour augmenter l'indice (donc plutôt pour le cœur de la fibre) et avec de fluor ou de trioxyde de bore pour le diminuer (plutôt réservé à la gaine optique).

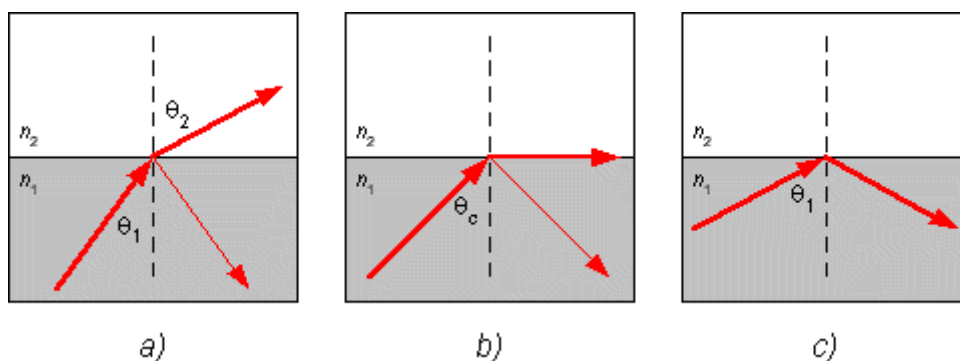
II.1.2.3 La réflexion totale interne

Le principe de la réflexion totale interne est à la base de la propagation des ondes lumineuses dans la fibre optique. D'après ce principe, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est plus faible, il peut être réfléchi. De plus, lorsque l'angle d'incidence du rayon lumineux est plus grand que l'angle critique, la lumière est réfléchie en totalité et il n'y a aucune perte de lumière (figure II.3).

La réflexion totale interne est régie par deux facteurs : les indices de réfraction des deux milieux et l'angle critique. Ces facteurs sont reliés par l'équation suivante :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{II.3})$$

En connaissant les indices de réfraction des deux matériaux de l'interface, l'angle critique peut facilement être calculé.



Figure(II.3) : Réflexion de la lumière

a) Réfraction d'un rayon lumineux pour $\theta_1 < \theta_c$, le rayon incident est aussi partiellement réfléchi dans le premier milieu.

b) rayon critique lorsque $\theta_1 = \theta_c$.

c) réflexion totale interne pour $\theta_1 > \theta_c$.

Physiquement, l'indice de réfraction d'une substance est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide (c) et sa vitesse dans le matériau (v).

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{II.4})$$

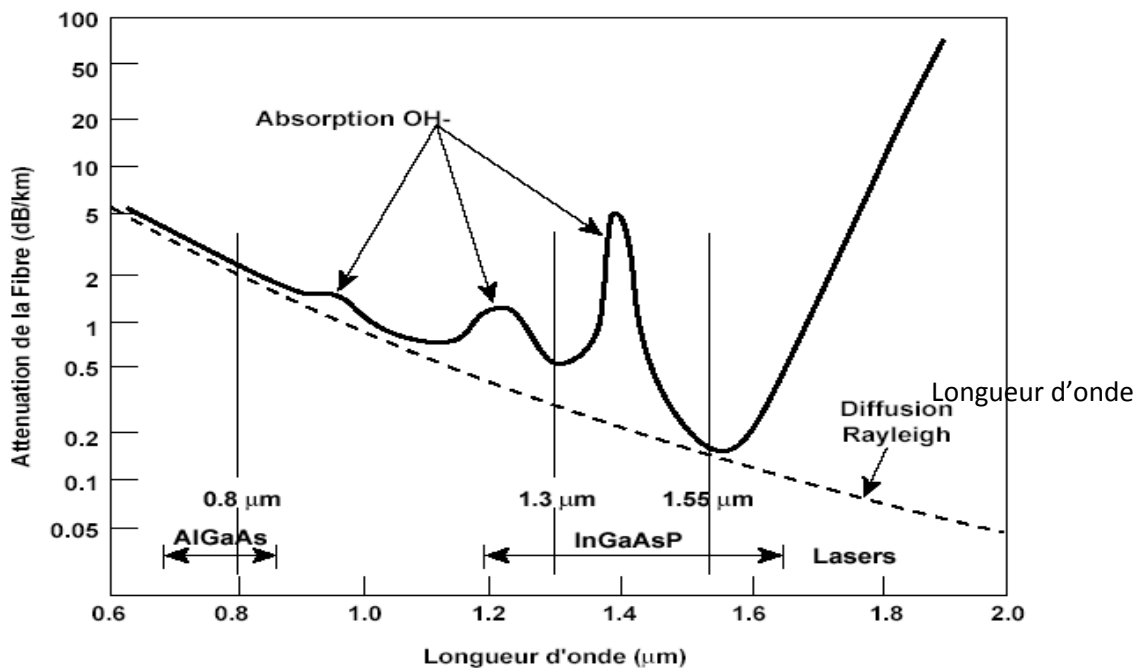
La lumière voyage donc plus rapidement dans un matériau avec un indice de réfraction plus petit. Il est à noter que l'indice de réfraction du vide est de 1. On dit aussi que l'indice de l'air est égal à 1 puisque la vitesse de la lumière dans l'air est à peu près égale à celle dans le vide. En comparaison, l'indice de réfraction de l'eau est de 1,33. Notez bien que l'indice de réfraction est une quantité qui n'a pas d'unité, puisqu'il s'agit d'un rapport entre deux vitesses, et qu'il est toujours plus grand ou égal à 1.

II.1.3 Caractérisation de la fibre :

Les principales caractéristiques des fibres optiques sont l'atténuation, la dispersion chromatique, la dispersion modale, que nous allons présenter.

- **L'atténuation** : L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes.
 - ❖ Pertes intrinsèques : dépendent de la nature physico chimique de la fibre optique.
 - ❖ Pertes par absorption moléculaire : elles sont causées par l'absorption des rayons optiques par la silice et les impuretés contenus dans celle-ci.
 - ❖ Les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh).
 - ❖ Pertes extrinsèques : dépendent du couplage fibre-fibre ou fibre-composant.
 - ❖ Les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement
 - ❖ Les microcourbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles.
 - ❖ Les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement.

La Figure(II.4) montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications.



Figure(II.4) Atténuation de la fibre optique en fonction de la longueur d'onde.

L'atténuation minimale de 0,22 dB/km n'est pas très loin du minimum théorique pour la silice. La différence s'explique par le fait que l'on ne peut pas utiliser de la silice pure. On doit doper soit le cœur, soit la gaine et cela augmente les fluctuations de composition et donc les pertes par absorption.

- **Dispersion :** La dispersion d'un signal optique se manifeste par une distorsion du signal et cause un élargissement des impulsions au cours de leur propagation dans la fibre optique.

Il existe deux types de dispersion :

- ❖ Dispersion chromatique (intramodale) : La dispersion chromatique est la combinaison de deux types de dispersion : la dispersion du matériau et la dispersion du guide d'onde.
 - ✓ La dispersion du matériau est causée par la dépendance de l'indice de réfraction de la longueur d'onde

En effet la dispersion du matériau est très petite par rapport à la longueur d'onde d'environ 1300nm, cette dispersion existe dans toute les fibres optiques qu'elle soit monomode ou multimode.

- ✓ La dispersion du guide d'onde est particulièrement importante pour les fibres monomodes. Elle est causée par le fait que la répartition de la lumière du mode fondamental sur le cœur et la gaine dépend de la longueur d'onde.

La dispersion totale est la somme des dispersions dues au matériau et la dispersion du guide d'onde.

- ❖ Dispersion modale (ou intermodale) : Dans une fibre optique multimode se propagent plusieurs modes, chacun suivant une trajectoire différente.

L'énergie lumineuse transmise dans la fibre se répartie entre les différents modes qui se propagent dans le cœur.

L'ensemble des retards entre les différents rayons composant le signal lumineux détermine en réception une distorsion du signal électrique obtenu par le convertisseur optique - électrique ; cette distorsion est la Dispersion Modale.

- ❖ Dispersion de polarisation : Cette dispersion due à la biréfringence de la fibre, provoque une déformation des impulsions lumineuses par le fait que les deux principaux états de polarisation ont des constantes de propagation légèrement différentes.

Il en résulte que les états de polarisation des bords et du centre des impulsions différentes de plus en plus au cours de la propagation, d'où leur déformation.

Pour pouvoir compenser avec précision la dispersion de polarisation de la fibre installée, il est nécessaire de l'avoir préalablement mesurée. Les recherches effectuées dans ce domaine ont surtout pour objectif de comparer la précision de différents procédés de mesure.

II .1.4 Les différents types de fibre optique :

Il existe deux types de fibre monomode et multimode. Les fibres multimodes, à leur tour, peuvent être divisées en :

a) Fibre multimode :

- **Fibre multimode à saut d'indice :**

Le cœur et la gaine présentent des indices de réfraction différents et constants. Le passage d'un milieu vers l'autre est caractérisé par un saut d'indice .Le faisceau lumineux injecté à l'entrée de la fibre va atteindre la sortie en empruntant des chemins optiques différents ce qui se traduit par des temps de propagation différents et donc un étalement du signal transmis. (Figure II.5)

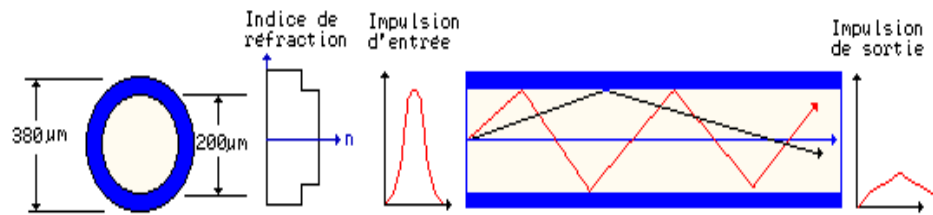


Figure (II.5) : la fibre multimode à saut d'indice

Les différents rayons empruntent des trajectoires différentes leurs chemins optiques et leurs temps de propagation sont différents. Il en résulte donc une dispersion intermodale. Pour diminuer cet effet, le profil d'indice de cœur peut être modifié de telle sorte a crée un « gradient d'indice ».

- **Fibre multimode à gradient d'indice :**

Le cœur se caractérise par un indice variable qui augmente progressivement de n_1 à l'interface gaine-cœur jusqu'à n_2 au centre de la fibre. Là aussi les rayons lumineux vont emprunter des chemins différents, mais un choix judicieux du profil d'indice du cœur permet de tendre vers des temps de parcours voisins et donc réduire l'étalement du signal (figure II.6).

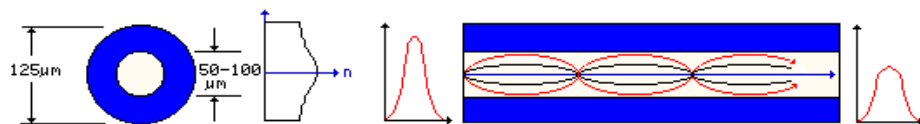


Figure (II.6) : La fibre multimode à gradient d'indice.

b) Fibre monomode:

Dans une fibre monomode, on obtient un seul mode grâce à la très faible dimension du cœur (diamètre de 10 μm et moins). Ainsi le chemin de la lumière est imposé, c'est le mode TEM00. Le nombre de modes se propageant dans une fibre optique est donné par la relation suivante :

$$m = \frac{2d}{\lambda} \cdot \text{ON} \quad (\text{II.5})$$

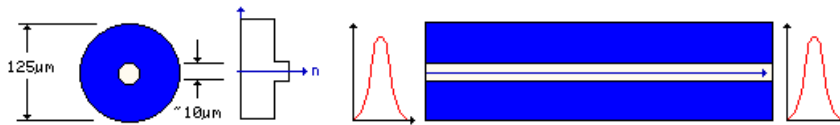
Avec

d : le diamètre du cœur de la fibre,

λ : la longueur d'onde de la lumière utilisée,

ON : l'ouverture numérique de la fibre

En choisissant d suffisamment faible, il est possible d'avoir un seul mode de propagation ($m=1 \Leftrightarrow$ fibre monomode). Le chemin de propagation est ainsi unique et parallèle à l'axe de la fibre (figure II.7). Théoriquement le signal injecté en entrée va atteindre la sortie sans aucune déformation. C'est ce type de fibre qui présente les plus grandes performances mais son coût est relativement élevé par rapport aux fibres multimodes.



Figure(II.7) la fibre monomode

La fibre monomode dont le cœur est si fin que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement directe. La dispersion modale devient quasiment nulle.

La bande passante transmise est presque infinie (>10 GHz/Km).cette fibre est utilisée essentiellement pour les communications à grande distance.

Le petit diamètre du cœur (10um) nécessite une grande puissance d'émission, donc des diodes au laser qui sont relativement onéreuses.

✓ **Condition :**

$$V^2 = k_0^2 a^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (\text{II.6})$$

Si : $V < 2,405$ fibre optique monomode

$V > 2,405$ fibre optique multimode

Tel que :

V : fréquence numérique

$$K_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

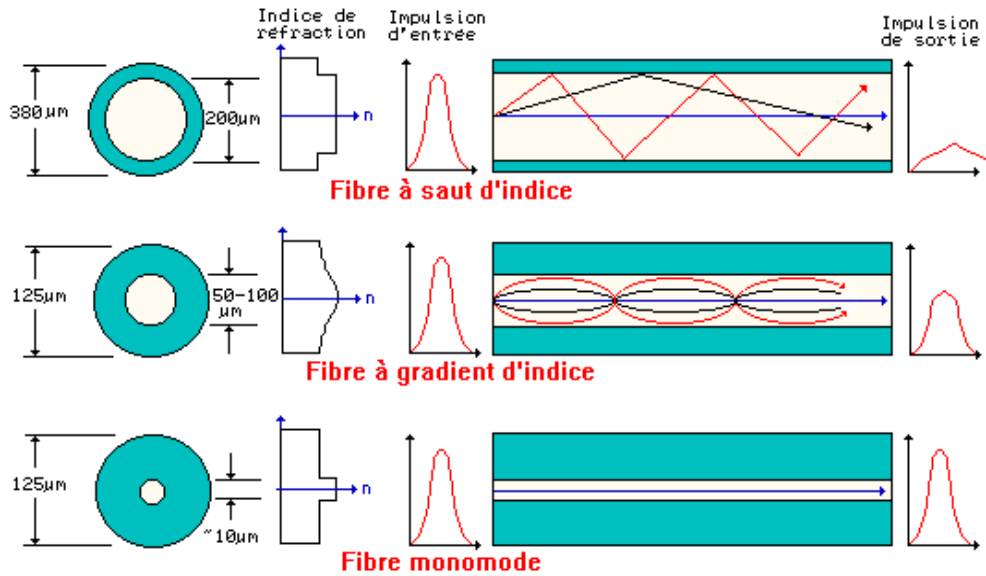
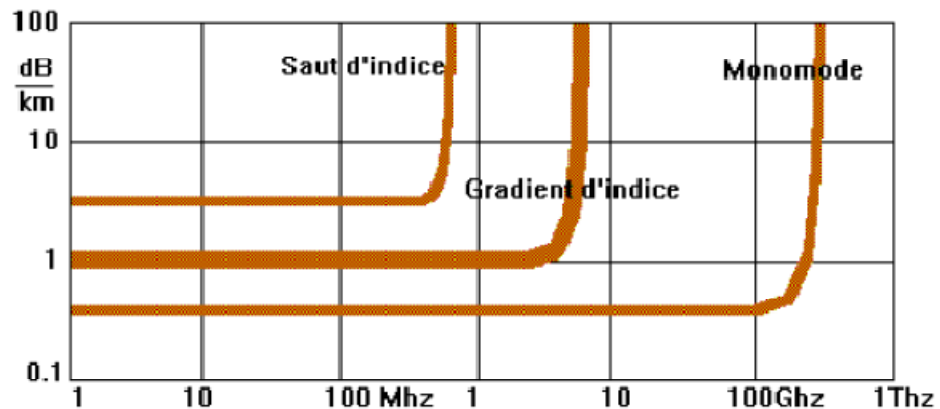


Figure (II.8) Propagation de la lumière dans les trois types de fibre

✓ Comparaison des performances des 3 types de fibres.



Figure(II.9) L'atténuation est constante quelle que soit la fréquence
Seule la dispersion lumineuse limite la largeur de la bande passante

II.1.5 Fibre en télécom :

a/Utilisation de différente fibre optique :

<u>Fibre monomode</u>	<u>Fibre multimode</u>
Faible dispersion	Forte dispersion
Connexion délicate	Connexion facile
Faible atténuation	Forte atténuation
Hauts débits, longues distances	Réseaux locaux

b/ Les applications de la fibre monomode

Les applications de la fibre optique monomode sont nombreuses, les plus connues concernent :

- ❖ les télécommunications, pour la réalisation des réseaux hauts débit à grande distance en technologie WDM, SDH, ATM.
- ❖ l'audiovisuel, pour la réalisation des réseaux câblés de télévision en association avec le câble coaxial utilisé pour le raccordement de l'abonné.
- ❖ La médecine, ou la fibre optique est notamment utilisée.
- ❖ En chirurgie, pour transporter le faisceau laser jusqu'au tissu à traiter.
- ❖ En endoscopie, pour éclairer l'intérieur du corps et transmettre les images jusqu'au médecin.
- ❖ L'éclairage (muséographique, architectural, espaces d'agrément publics ou domestiques).
- ❖ La décoration/illumination de piscines, bassins, fontaines,
- ❖ La signalétique d'orientation de l'information (panneaux de signalisation et enseignes).
- ❖ La signalisation routière (rond points, séparation de voies de circulation).

c /Avantages et inconvénients des fibres optiques

c.1 avantage.

Ils sont nombreux, on peut les classer comme suit :

- ❖ performances de transmission : très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible de plusieurs signaux ; elles permettent aux systèmes d'avoir une portée et une capacité très supérieures à celles des câbles conducteurs.
- ❖ Avantage de mise en œuvre : très petite taille, grande souplesse, faible poids, appréciables aussi bien en télécommunications que pour le câblage en informatique, aéronautiques, applications industrielles.
- ❖ Sécurité électrique : isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous forte tension.
- ❖ Sécurité électromagnétique : la fibre optique n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même.
- ❖ Avantage économique : contrairement à l'idée encore répandue, le coût global d'un système sur fibre optique et de plus en plus souvent inférieur à celui d'un système sur cuivre.

c.2 inconvénients

- ❖ la fibre optique ne permet pas le transport d'énergie.
- ❖ Les répéteurs doivent être alimentés séparément, soit localement, soit par second câble électrique, soit par un câble mixte optique et électrique.
- ❖ les techniciens des installations doivent protéger ces yeux.

Il est indispensable de porter des verres de protection infrarouge pour travailler de près sur un dispositif en fonctionnement.

- ❖ perte de raccordement entre différents composants optiques du système.
- ❖ Parmi les pertes de raccordement on trouve :

-pertes de couplage à la source : une partie seulement de la puissance émise par le laser sera captée par la fibre à cause de la désadaptation entre eux.

-pertes d'épissure : elle est due à cause d'une discontinuité des rayons, une erreur d'espacement, une erreur d'excentrement, une erreur d'alignement angulaire

II.1.6 Évolution de la capacité de transmission :

L'augmentation de la capacité de transmission des fibres optiques a été rendue possible grâce à des avancées technologiques marquantes telle que :

- ❖ La fibre monomode à faibles pertes.
- ❖ Les fibres à dispersion décalée.
- ❖ Les diodes lasers fonctionnant à 1.55 μ m.
- ❖ L'amplificateur à fibre dopée.
- ❖ La technique du multiplexage WDM.

II.1.7 Évolution des services :

En 2030, il est attendu que la vitesse de transmission soit plusieurs centaines de fois supérieure qu'aujourd'hui (Figure II.8). Les prévisions les plus optimistes prévoient qu'il sera possible de transmettre des données à 1 TB/s de et vers les particuliers.

D'autres prétendent que 70% du réseau sera encore à 1 Gb/s. Quoi qu'il en soit, l'augmentation de la vitesse favorisera l'émergence du télétravail, un des facteurs favorisant le développement des télécommunications.

L'introduction de l'ISDN, suivi par l'ADSL a permis d'augmenter les vitesses de transmission. Aujourd'hui, la vitesse est de 2 Mb/s.

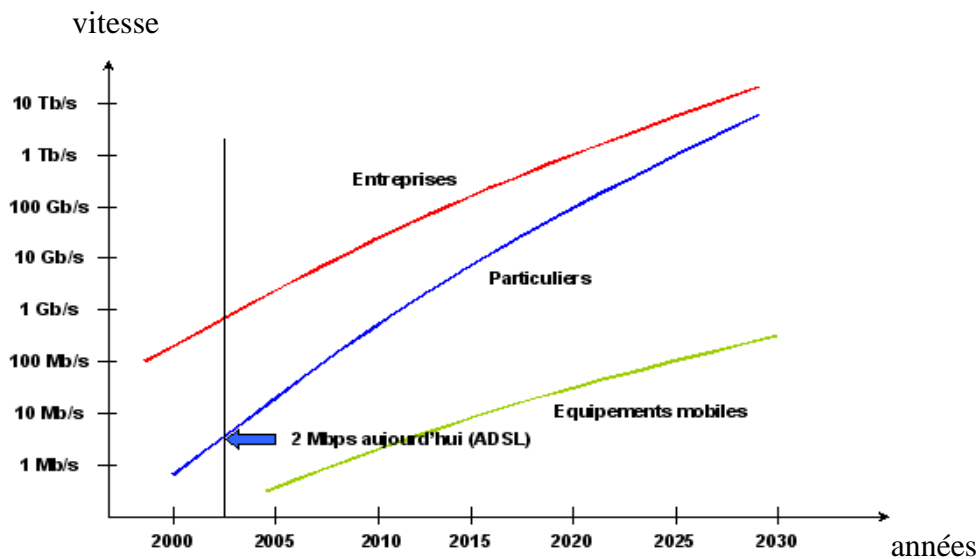


Figure (II.10) : Evolution du trafic de données.

La croissance de la bande passante va entraîner le développement de nouveaux composants avec de nouvelles fonctions. Le développement de composants, de modules et de systèmes pour les télécommunications optiques est lié aux développements des services (particuliers, entreprises). L'évolution des services et des applications/technologies associées est cependant un cercle vicieux. La demande des utilisateurs est généralement un besoin immédiat. La mise en place des services et applications est généralement rapide mais l'augmentation des débits plus élevés à la connexion se fait plutôt sur le moyen terme. L'infrastructure, elle, se fait sur le très long terme et les services et les applications dépendent à leur tour de l'infrastructure.

II.2 Amplification optique

II.2.1 Introduction :

L'évolution des systèmes de transmission optique a connu une révolution avec la mise au point et le développement industriel des amplificateurs optiques à la fin des années 80.

Trouvant désormais des fibres optiques à dispersion chromatique soit faible, soit opposée (dite fibre à compensation de dispersion dont le sigle anglais est DCF), la principale contrainte de ce support de transmission était devenue l'atténuation des signaux durant la propagation. Or le photodétecteur émettra un courant de qualité, codant correctement l'information à transmettre, seulement si le photocourant n'est pas noyé dans le bruit, et donc si la puissance optique reçue est

suffisamment importante. L'amplification optique devient alors une alternative aux complexes répéteurs-régénérateurs optoélectroniques. Elle permet de compenser ces pertes et de contrôler régulièrement la puissance optique des signaux. Il est désormais possible de transmettre le signal optique sans conversion sur une distance beaucoup plus importante.

L'amplification optique est à l'origine d'une véritable révolution dans le domaine des télécommunications, vu les avantages que cette technologie procure en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM). En effet, cette amplification peut intervenir sur l'ensemble des N longueurs d'onde d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Il évite donc une conversion optoélectronique et une amplification électrique sur chaque canal, donc N amplificateurs électriques.

Avant d'étudier l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium, quelques généralités et le principe de l'amplification optique seront traités dans le premier paragraphe.

II.2.2) Généralités sur l'amplification optique

L'amplification optique repose sur le phénomène d'émission stimulée, déjà présentée dans le paragraphe sur les diodes lasers. Le signal est amplifié dans un guide (semi-conducteur ou fibre) grâce à un apport extérieur d'énergie appelé pompage (courant injecté ou source de lumière) qui vient créer une inversion de population. La recombinaison électron-trou peut ensuite être provoquée par un photon incident, ce qui donne naissance à un deuxième photon de même fréquence, de même phase et même direction. Cette émission est dite stimulée et conduit à une amplification du signal.

En même temps, la recombinaison peut se faire sans la présence d'un photon incident. Ces photons, émis de façon spontanée, de manière non cohérente, constituent le bruit de l'amplification optique.

L'ensemble des photons, originels ou pas, subissent une série d'amplifications. Les photons spontanés seront aussi amplifiés, ce qui définit la source de bruit appelée ESA (Émission Spontanée Amplifiée).

II.2.3) Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA)

Le milieu amplificateur est cette fois-ci le cœur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terre rare. Pour que la fibre ne soit pas absorbante, mais amplificatrice, il faut l'associer à un pompage optique. Un multiplexeur permet de coupler le flux lumineux puissant provenant d'une diode laser de pompe et le signal à l'intérieur de la fibre. Les longueurs d'onde de pompe doivent permettre des transitions vers les états excités des ions de terre rare et créer

l'inversion de polarisation. L'ensemble module de pompe, multiplexeur et fibre dopée forme l'amplificateur le plus rudimentaire. La longueur de fibre est généralement comprise entre 10 et 20 mètres. Pour l'amplification autour de 1550 nm, fenêtre spectrale la plus utilisée car de faible atténuation des fibres optiques en silice, les dopants sont des ions Erbium Er^{3+} . On parle alors d'Amplificateur à Fibre Dopée à l'Erbium (AFDE ou EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier en anglo-américain). 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 (lasers en AlGaAs pour le 980 nm et lasers en InGaAsP pour le 1480 nm). 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. Des isolateurs présents à chaque extrémité en assurent aussi la stabilité en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval. Le signal de pompe peut être couplé dans la fibre en Co-propagation (mêmes sens pour le signal et le signal de pompe) afin de réduire le facteur de bruit ou en contre-propagation (sens opposés du signal de pompe sur le signal utile) favorisant ainsi une plus forte puissance de saturation. Mais afin d'augmenter et uniformiser dans la fibre dopée l'inversion de polarisation et donc l'amplification du signal, un double pompage aux deux extrémités peut également être réalisé. La (Figure II.11) représente la configuration d'un de ces amplificateurs à fibre dopée.

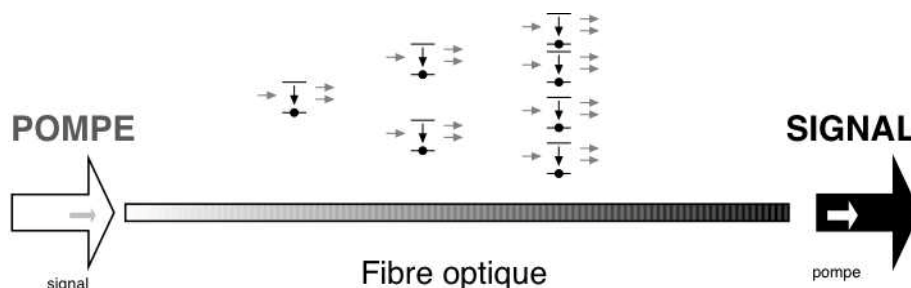
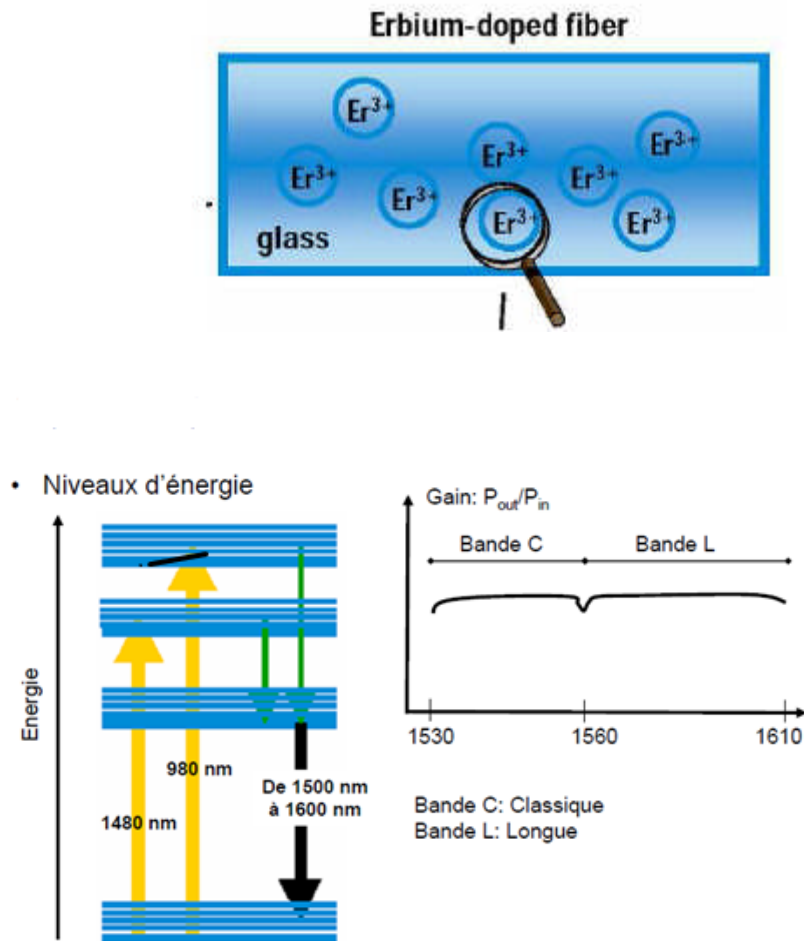


Figure (II.11): EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)

- Cœur de la fibre dopé de terres rares ions Erbium
- Energie extérieure fournie par une autre source lumineuse



Figure(II.12) Diagramme d'énergie partiel de l'ion Er^{3+}

- à trois niveaux d'énergie.
- Pour un signal injecté à la longueur d'onde $1.55 \mu m$ la fibre est absorbante en l'absence de pompage.
- Pour que le milieu soit amplificateur il faut réaliser l'inversion de population entre les niveaux 2 et 1 (Initialement les atomes sont tous sur le niveau 1).
- Le pompage permet de porter les atomes sur le niveau 3. Les électrons relaxent rapidement du niveau 3 au niveau 2 (non-radiative). Pour réaliser l'inversion il faut au moins amener la moitié des atomes sur le niveau 2.

II.2.4 Applications des EDFA

a) Booster:

- But: injecter le signal maximum dans une fibre.
- Placé directement derrière l'émetteur.
- Puissance de saturation en sortie: $\Rightarrow 19 \text{ dBm}$.

- Gain typique: de 10 à 20 dB.
- Pour 16 canaux, puissance d'entrée par canal: de -17 dBm à -7 dBm.
- Pour un seul canal, puissance d'entrée: de -5 dBm à 5 dBm.

b) Amplificateur sur une ligne optique:

- But: l'important pour ce composant est d'avoir une bande de transmission assez plate (généralement à plus ou moins 0.5 dB sur une bande ITU C).
- Puissance de saturation en sortie: de 14 à 18 dBm.
- Gain typique: de 20 à 30 dB.
- Puissance d'entrée: de -20 dBm à -5 dBm.

c) Pré-Amplificateur:

- But: placé devant un récepteur pour améliorer la détection si le signal amont est trop faible.
- Peu de bruit et fort gain.
- Gain typique: de 25 à 35 dB.
- Puissance d'entrée: de -40 dBm.
- Puissance de sortie: de -5 dBm à 5 dBm.

II.2.5 Avantages et inconvénients

a) Avantage :

- grand gain fibre à fibre (faibles pertes de couplage au milieu actif).
- réflexions très faibles.
- grande puissance de saturation (de 10 à 30 dBm).
- «faible» facteur de bruit de 4 à 7 dB (près de la limite théorique de 3 dB).
- peu sensible à la polarisation et à la température.
- Bande passante élevée : 30 nm soit environ 4000 GHz.
- Pas de diaphonie entre canaux.

b) Inconvénients :

- Puissance de pompage élevée : 40 à 100 mW optiques coût élevé des lasers de pompe.
- Consommation importante.
- Les amplis à fibre ne sont pas intégrables contrairement aux amplis à semi-conducteurs.

II.3 Bruit des amplificateurs optiques

Quelques ions retombent dans l'état fondamental sans avoir été stimulés par un photon de signal et émettent un photon dit 'spontanée'. Ces photons spontanés se propagent dans la fibre et stimulent eux-mêmes l'émission d'autres photons : c'est l'émission spontanée amplifiée (ESA) qui constitue la source de bruit des amplificateurs optiques.

Cette émission spontanée dépeuple le niveau métastable, réduisant ainsi l'inversion de population et dégradant les performances de l'amplificateur. Des considérations théoriques montrent que la probabilité qu'un ion excité émette spontanément un photon est liée à la probabilité qu'un photon incident induise un photon stimulé. Il est d'usage de désigner par le terme de « paramètre d'inversion de population » ou « paramètre de bruit » le rapport n_{sp} entre le taux d'émission spontanée dans un mode du rayonnement électromagnétique et le taux d'émission stimulée par photon et par mode. Ce paramètre est égale à 1 dans un amplificateur idéal où l'inversion de population est complète.

Le bruit d'émission spontanée amplifiée est caractérisé par sa densité spectrale de puissance bilatérale par mode.

$$\gamma_{esa}(\nu) = n_{sp}(G-1)h\nu_s \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$h\nu_s$: énergie du photon

h : constante de Planck

ν_s : fréquence optique

G : gain en puissance

Donc la puissance est obtenue par intégration de $\gamma_{esa}(\nu)$ sur la bande du signal :

$$P_{esa} = n_{sp}(G-1)h\nu_s B \quad (\text{II.8})$$

Contrairement au bruit de grenaille, le bruit d'émission spontanée amplifiée est un bruit additif.

Comme un amplificateur électronique, l'amplificateur optique peut être caractérisé par son facteur de bruit, défini comme le quotient du rapport signal sur bruit en entrée et du rapport signal sur bruit en sortie de l'amplificateur.

Le rapport signal sur bruit (purement quantique) à l'entrée de l'amplificateur est donné par la relation

$$\rho_e = \frac{\eta P}{h\nu_s B} \quad (\text{II.9.a})$$

En prend $\eta=1$ on obtient :

$$\rho_e = \frac{P}{h\nu B} \quad (\text{II.9.b})$$

C'est donc le rapport signal sur bruit qui serait obtenu en détectant le signal dans un récepteur parfait, de rendement quantique unitaire et sans bruit thermique.

Le rapport signal sur bruit en sortie tient compte du bruit d'émission spontanée amplifiée ajouté à la traversée de l'amplificateur et s'écrit :

$$\rho_s = \frac{GP}{h\nu_s B + n_{sp}(G-1)h\nu_s B} \quad (\text{II.10})$$

le facteur de bruit s'écrit donc :

$$F_a = \frac{\rho_e}{\rho_s} = n_{sp} \frac{G-1}{G} + \frac{1}{G} \quad (\text{II.11})$$

Si G très grand, F_a est pratiquement égal à n_{sp} . On vérifie que dans un amplificateur idéal dont le paramètre d'inversion serait égal à l'unité le facteur de bruit serait égal à 1. En pratique, la fibre active dans laquelle se produit le phénomène d'amplification est reliée à l'extérieure par des connecteurs, caractérisés par des facteurs de transmission en puissance C_1 (en entrée) et C_2 (en sortie). Le facteur de bruit de l'amplificateur est évidemment mesuré en prenant comme points d'entrée et de sortie les connecteurs correspondants. Dans l'hypothèse toujours vérifiée d'un gain élevé le facteur de bruit est :

$$F_a = \frac{n_{sp}}{C_1} \quad (\text{II.12})$$

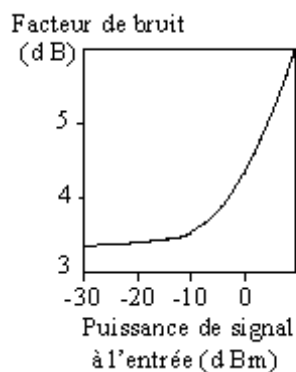


Figure (II.13) : Facteur de bruit en fonction de la puissance de signal entrant dans un amplificateur optique.

Une courbe caractéristique du facteur de bruit en fonction de la puissance d'entrée a l'allure tracée sur Figure (II.13) comme la détection directe (détection quadratique) utilisée dans

l'immense majorité des systèmes de communications optiques. Le facteur de bruit est défini comme $2\frac{n_{sp}}{C_1}$ soit deux fois la valeur donnée par la relation (II.12)

Le facteur 2 provient du double produit qui apparaît dans la détection quadratique.

Figure (II.13) montre une augmentation du facteur de bruit avec la puissance d'entrée.

La diminution du paramètre d'inversion de population dégrade le facteur de bruit. En effet, pour les puissances élevées, à mesure que la saturation augmente, une fraction des photons de signal pompe les ions de l'état fondamental à l'état métastable.

II.4 Conclusion

Les amplificateurs à semi-conducteur tout comme les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) peuvent amplifier les signaux dans une bande de fréquence assez large dans la région située autour de 1550 nm.

Cependant, ils peuvent être utilisés pour amplifier dans une fenêtre autour de 1300 nm, ce qui pourrait les rendre utiles dans les réseaux où on utilise ces longueurs d'onde.

En fait, à cause de la demande croissante en débit, les futurs systèmes utiliseront probablement les deux régions, 1300 et 1550 nm, et les amplificateurs à semi-conducteur auront un important rôle à jouer dans de tels systèmes.

Chapitre III

Récepteur du signal optique et ses bruits :

Le photodétecteur

III.1 Généralités sur les photodétecteurs

III.1.1 Introduction

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique. Ce rôle est assuré par le photodétecteur, qui se comporte comme un compteur de photons. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité : il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10 Gbits/s voire même 40 Gbits/s. La troisième propriété demandée est un rapport signal sur bruit (S/B) maximum.

Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles. Dans ce qui suit, nous rappellerons le principe de la photodétection avant d'entamer plus précisément l'étude du phototransistor InP/InGaAs.

III.1.2 Les concepts de base

La transmission par fibre optique des données nécessite des conversions électriques - optiques et optique - électrique du signal. L'interface optique de réception, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur qui, pour simplifier, se comporte comme un compteur de photons. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité : il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10 Gbits/s voire 40 Gbits/s. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit.

Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles. Dans le paragraphe suivant, nous rappellerons le principe de la photodétection avant d'étudier plus précisément un exemple de photodétecteur : la photodiode PIN.

III.1.3 Principe de la photodétection

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou. Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher l'électron de retomber dans son état le plus stable. Sous

l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés [7].

Pour effectuer la photodétection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large. D'où l'intérêt de la photodiode PIN.

III .1.4 Caractéristiques d'une photodétection

Tout photon ne subira pas automatiquement la photodétection.

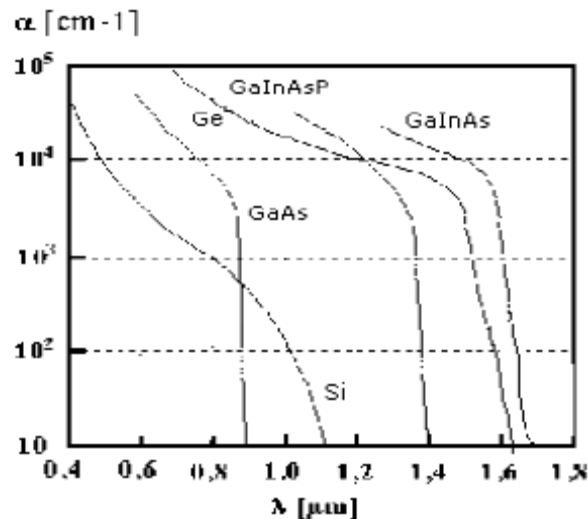
Tout d'abord, il doit posséder une énergie E_{photon} égale ou supérieure à la hauteur de la bande d'énergie interdite E_g pour faire passer l'électron de la bande de valence à la bande de conduction. Cela implique une longueur d'onde de coupure λ_c au-delà de laquelle le matériau devient transparent à ce rayonnement. λ_c est déterminée par l'énergie de bande interdite E_g du semi-conducteur selon la relation suivante :

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \Rightarrow \lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (\text{III} - 1)$$

Ensuite, il peut traverser le détecteur sans être absorbé. Le coefficient d'absorption du semi-conducteur est donc un facteur essentiel qui va déterminer le rendement du photodétecteur.

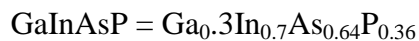
III .1.4.1 Le coefficient d'absorption

Dans le domaine de l'optoélectronique, un paramètre essentiel à la compréhension des phénomènes de générations / recombinaisons de porteurs, est la notion du coefficient d'absorption figure (III .1). Ainsi pour une énergie incidente inférieure à l'énergie de bande interdite, le matériau est "transparent" au rayonnement incident, et le coefficient d'absorption est très faible.



Figure(III.1) : Coefficient et longueur d'absorption des matériaux semi- conducteurs

Avec:



Ce coefficient dépend du matériau utilisé et de la longueur d'onde. Mais il y a d'autres propriétés encore qui caractérisent un photodétecteur .

III .1.4.2 Le rendement quantique

Le rendement quantique (η) qui est le rapport du nombre de paires de porteurs " photo créés et collectés " au nombre de photons incidents. Il ne peut être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante figure (III -2).

III .1 .4 .3 La sensibilité

La sensibilité (S) de la photodiode exprimée en ampères par watt et définissant le rapport de la photo courant I_{ph} au flux énergétique (puissance optique P_{opt}) reçu.

Ces grandeurs sont reliées par les relations suivantes, avec e représentant la charge élémentaire de l'électron, h la constante de Planck, l la longueur d'onde et c la vitesse de la lumière :

$$\eta = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/hv} \quad (\text{III} - 2)$$

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \eta \cdot \frac{e\lambda}{hc} \quad (\text{III - 3})$$

Le courant créé est proportionnel à la puissance lumineuse, ce qui signifie que la puissance du signal électrique est proportionnelle au carré de la puissance optique. Il s'agit d'une détection quadratique.

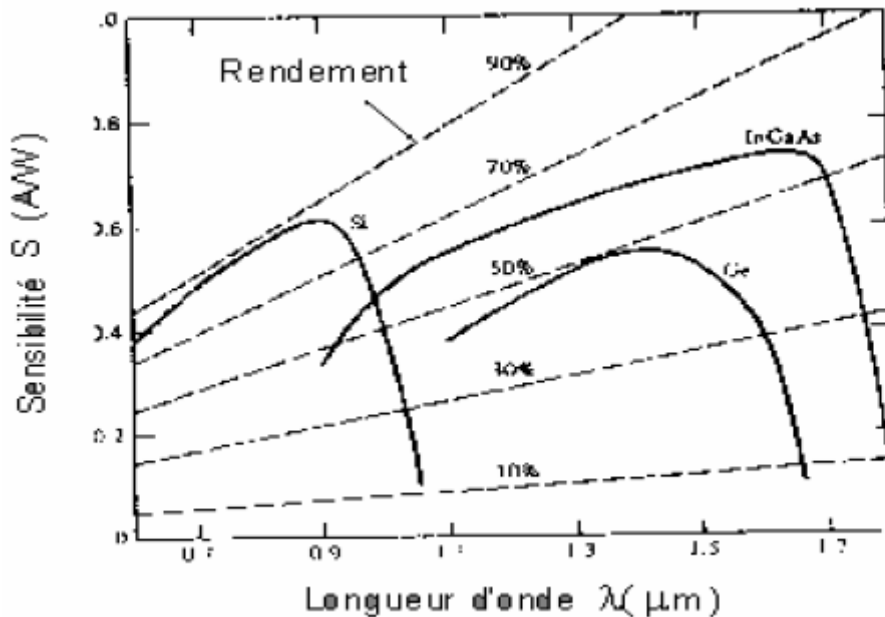


Figure (III.2) : Courbes de sensibilité et de rendement selon les longueurs d'onde pour divers matériaux. [8]

En tenant compte des figures (III.1) et (III.2), on observe que la sensibilité S augmente avec λ , puis décroît au-delà de la fréquence de coupure. Il apparaît donc pour chaque matériau une longueur d'onde pour laquelle la sensibilité est maximale. On observe que le silicium sera plutôt employé dans le domaine du visible alors que les hétérostructures comme le GaInAs sont utilisés dans les transmissions par fibre optique dans le domaine IR (infra rouge).

III .1.5 Les différents types des photodétecteurs

Dans cette partie nous présentons brièvement les différents types de photodétecteurs ainsi que les principales notions physiques à l'origine de leur fonctionnement:

III .1.5.1 La photodiode

Une photodiode et avant tout est une diode ; c'est-à-dire un composant constitué de deux matériaux semi –conducteur accolés et dopés l'un par des donneurs (type N) l'autre des accepteurs (type P). Dans le cas où les deux matériaux sont de même nature, on parle d'homojonction. Dans le cas contraire on parle d'hétérojonction figure (III .3).

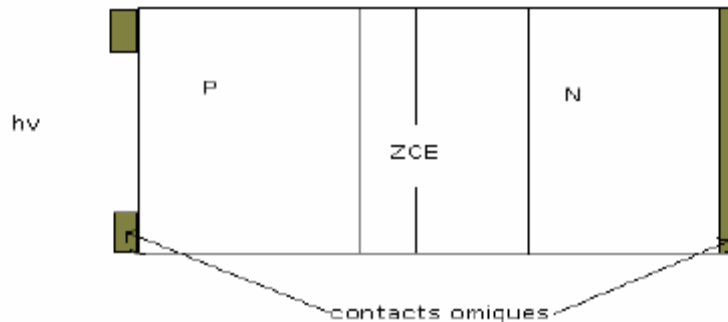


Figure (III.3) : la photodiode PIN [9]

Il apparaît donc à l'équilibre au voisinage immédiat de la jonction une zone vide de porteurs libres, semblable à un condensateur chargé, du côté N, les donneurs ionisés positivement et du côté P, les accepteurs ionisés négativement c'est la ZCE (zone de charge d'espace). La présence des donneurs et accepteurs chargés produit un champ électrique, qui forme en équilibre, une barrière d'énergie. La largeur de la zone de charge d'espace est une fonction décroissante des niveaux de dopage du matériau.

Une paire électron –trou produite dans cette ZCE est donc séparée par l'effet du champ électrique interne de la jonction et ne donne pas lieu à une recombinaison. Ce sont ces porteurs qui contribuent au photocourant. La structure de bande de la jonction implique que le photocourant soit constitué de porteurs minoritaires. Pour cette raison, le photocourant circule dans le sens de polarisation inverse de la diode, ou le sens direct est par définition le sens d'écoulement des porteurs majoritaires (de la région N vers la région P, et inversement pour les trous). Les photodiodes trouvent leurs utilités dans la détection rapide des signaux faibles, l'asservissement, la photométrie, les instruments de mesure, la télécommunication par fibre optique et l'imagerie médicale.

III .1.5.2 La cellule photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (Solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie. La conversion photovoltaïque a été réalisée pour la première fois dans le laboratoire Bell en 1954 sur une simple jonction P-N au Silicium. Par suite, plusieurs semi-conducteurs ont été utilisés pour ce but.

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont des dispositifs de conversion d'énergie de la lumière. Trois processus élémentaires interviennent dans l'effet photovoltaïque :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

Le principal matériau à utilisation photovoltaïque était le Silicium monocristallin. Les Jonctions réalisées grâce à ce matériau permettent en effet de transformer les photons en un courant électrique avec des rendements de conversion η qui sont à l'heure actuelle, de l'ordre de 15% au niveau industriel, mais qui ont atteint 20% dans le laboratoire. Comme le Silicium monocristallin. Des composés tels que le GaAs ont abouti à des rendements assez importants (Plus d'un quart de la puissance incidente est convertie par ce type des cellules à base de GaAs). [10]

III -1-5-3 Photodiode PDA (à avalanche)

Une photodiode à avalanche est avant tout une structure PIN, à laquelle on applique une polarisation inverse proche (mais inférieure en valeur absolue) à la tension de claquage. La photo porteurs créés dans la zone de charge d'espace sont alors multipliés par l'effet d'avalanche. Les photodiodes à avalanche sont des dispositifs attractifs car ils bénéficient d'un gain interne dû à la multiplication des porteurs générés par l'absorption de la lumière incidente. En effet, lorsque ces porteurs traversent une région où règne un champ électrique élevé ($>10^5$ V/cm), ils peuvent acquérir une énergie suffisante pour ioniser les atomes du réseau cristallin créant ainsi de nouvelles paires électron trou qui immédiatement dissociées, pourront à leur tour créer d'autres paires électron trou, entraînant juste une amplification du photocourant primaire. [11]

III .1. 5 .4 Photodiode Schottky

Une photodiode Schottky est constituée d'un substrat de silicium de type n, sur lequel est déposée une couche mince métallique, généralement de l'or. On réalise ainsi une barrière Schottky.

Lorsque le rayonnement crée des paires électrons trous dans la zone de charge d'espace du semi-conducteur, la diode est le siège d'un photocourant de génération analogue à celui d'une photodiode à jonction P-N. L'avantage de la photodiode Schottky réside dans le fait que la couche métallique, si elle est suffisamment mince (10nm) pour le passage de la lumière, est transparente au rayonnement dans le domaine du proche ultra violet, ce qui n'est pas le cas de la zone frontale des autres types de photodiode. La zone de déplétion est si proche du plan d'incidence que les photons de grande énergie et de courte longueur d'onde peuvent y être absorbés. Les porteurs libres ainsi créés sont rapidement balayés par le champ élevé. Ceci permet au dispositif d'avoir, d'une part une grande sensibilité dans le bleu et le violet, et d'autre part une grande vitesse de réponse. L'inconvénient d'une telle structure est dans La réponse aux grandes longueurs d'ondes du rouge et de l'infrarouge qui est par la grande réflectivité de la couche d'or dans cette partie du spectre. [11]

III .1. 5. 5 Photodétecteur à transfert de charge (CCD)

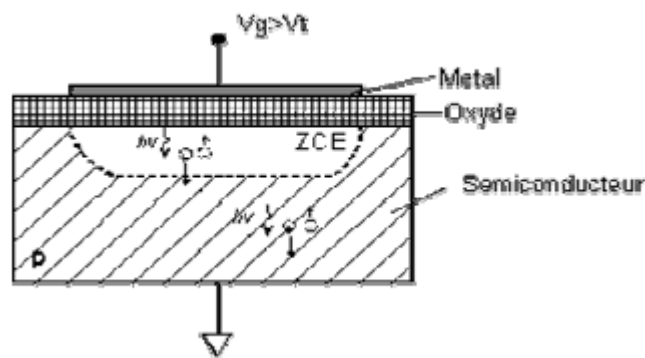
Les dispositifs à transfert de charge (Charge Coupled Device en anglais) consistent en un ensemble de capacité M.O.S. (Métal Oxyde Semiconducteur) réalisées sur la même plaquette et dont les grilles sont très voisines les unes des autres. Le principe de fonctionnement est le suivant : créer sous l'une des grilles un puits de potentiel dans lequel on va piéger des porteurs minoritaires, qui sont créés par la lumière, puis par polarisation convenable de la grille voisine, faire transférer ce paquet de charge sous celui-ci.

Structure de base : Le bloc de base du CCD est une capacité M.O.S. montré dans la figure (III.4) polarisée avec une tension supérieure à la tension de seuil (régime de déplétion profonde). Quand cette cellule est excitée par la lumière il y a absorption et génération de photoporteurs. Si la génération se produit dans la région de charge d'espace, les électrons et les trous sont séparé par le champ électrique ; les charges positives descendent a l'électrode en bas tandis que les charges négatives sont piégées à l'interface SiO₂/Si.

Si l'absorption se produit hors ZCE, les charges positives vont ou bien se recombiner ou bien contribué au signal par diffusion.

En même temps que les électrons dus à la lumière s'établissent à l'interface, d'autres électrons dus au phénomène de génération thermique viennent s'y ajouter. On définit un temps de stockage le temps nécessaire pour l'établissement de la couche d'inversion, pour le Silicium ce temps est de l'ordre de la seconde. Ce temps est atteint si la charge accumulée est égale à la charge positive de l'électrode. Tant que le temps est très inférieur au temps de stockage, les charges dues aux générations thermiques sont négligeables de sorte les charges accumulées constituées sont proportionnelles à la lumière reçue.

Si on met une deuxième capacité MOS a coté de la première, on peut faire transiter les charges accumulées de l'une à l'autre. C'est le principe de transfert de charge



Figure(III.4) coupe transversale d'une cellule MOS[11]

III .1.5.6 Les photodiodes PIN

La principale qualité d'une photodiode PIN (dopée P, Intrinsèque, dopée N est que la composante d'entraînement du photocourant domine sur la composante diffusive simplement parce que la plupart de la puissance optique incidente est absorbée à l'intérieur de la zone I. (ou intrinsèque)

En effet, la zone I est placée entre la zone P et la zone N d'un semi-conducteur différent dont la bande interdite est choisie afin que les photons incidents soient absorbés seulement dans la zone I de la photodiode (figure III.5).

Une photodiode PIN utilise généralement du matériau InGaAs pour la région I et du matériau InP pour les couches P et N.

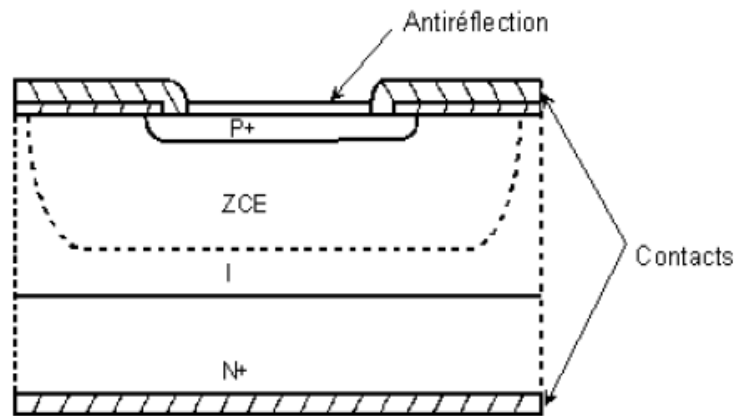


Figure (III.5) Coupe transversale d'une photodiode PIN [12]

Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode PIN sont la sensibilité, le courant d'obscurité et le temps de réponse.

Le photocourant I_{ph} est directement proportionnel à la puissance optique incidente P_{opt} selon la relation (1.4) : [12]

$$I_{ph} = S P_{opt} + I_{obs} \quad (III.4)$$

Où S est la sensibilité de la photodiode en A/W. S est typiquement proche de 0,9 A/W, mais peut être un peu plus faible suivant le photodétecteur et la longueur d'onde d'attaque λ . En effet, S s'exprime en fonction du rendement quantique η :

$$S = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q}{hc} \lambda \quad (III.5)$$

I_{obs} est le courant d'obscurité qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement. Ce courant ne provient donc pas des photons transmis par la fibre. Il peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite. Dans la plupart des applications ce courant est négligeable ($I_{obs} < 10$ nA). En ce qui concerne le temps de réponse, les meilleurs photodétecteurs actuels sont utilisables jusqu'à plus de 100 GHz [13]. Le choix d'une photodiode PIN s'imposait car le rapport signal à bruit est généralement meilleur qu'avec une photodiode à avalanche, pour peu que le niveau optique d'attaque soit assez fort.

III.2 Bruits du photodétecteur

Certains électrons du courant utile peuvent être générés sans qu'un photon n'a été absorbé. Ils s'ajoutent aux photoélectrons et parasitent le courant.

Dans la notion de rapport signal sur bruit (S/B) d'une liaison à fibre optique, ces électrons permettant alors de caractériser le dénominateur de ce rapport. La qualité du signal dépend bien évidemment de la source émettrice et de la qualité des fibres optiques.

Les principales composantes de bruit liées aux récepteurs optiques sont les suivantes : le bruit de grenaille (de l'anglais, « shot noise »), le bruit thermique, le bruit en 1/f et le bruit de courant d'obscurité.

Nous allons maintenant définir les caractéristiques de chacune de ces composantes de bruit.

III.2.1 Le bruit de grenaille ou « shot noise »

Le bruit associé au passage de porteurs à travers une barrière de potentiel est normalement connu comme bruit de grenaille.

Dans le cas d'un photodétecteur, il est impossible d'effectuer une distinction entre le bruit de grenaille quantique qui dérive des photons détectés par la photodiode et le bruit de grenaille électronique qui dérive du flux de photocourant dans la jonction p-n à l'intérieur de la photodiode. La densité spectrale normalisée du bruit de grenaille en courant s'écrit de la façon suivante :

$$I_n^2(f) = 2 q I_{ph} \quad (\text{en A}^2/\text{Hz}) \quad (\text{III} - 6)$$

où :

- I_{ph} est le photocourant ;
- $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C est la charge d'un électron.

III.2.2 Le bruit thermique

Le bruit thermique, ou bruit Johnson, est le résultat des fluctuations aléatoires des porteurs à l'intérieur d'une résistance par cause de l'agitation thermique et il est tout à fait comparable au mouvement brownien des particules.

La densité spectrale de courant de bruit thermique liée à la résistance de charge de la photodiode est donnée par la relation suivante :

$$I_{th}^2(f) = \frac{4KT}{R} \quad (\text{en A}^2/\text{Hz}) \quad (\text{III} - 7)$$

Où :

- $k = 1,38.10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann ;

- T est la température en Kelvin;

-R est la résistance de charge de la photodiode.

III.2.3 Le bruit en 1/f

Les deux types de bruit précédents étaient des bruits blancs. Mais il existe d'autres types de bruits fondamentaux dont la densité spectrale n'est pas constante en fréquence. Il s'agit principalement de bruits à basse fréquence. Le plus connu est le bruit « en 1/f », connu aussi par bruit de scintillation (ou flicker noise) . Ce dernier est présent dans tout composant parcouru par un courant et est proportionnel à ce courant à la puissance β .

$$I_{1/f}^2(f) = K \frac{I_0^\beta}{f^\gamma} \quad (\text{en A}^2/\text{Hz}) \quad (\text{III} - 8)$$

Avec $\gamma \approx 1$ et $\beta \approx 2$ suivant les composants et les matériaux.

III.2.4 Le bruit de courant d'obscurité

Comme il a été expliqué antérieurement, avec ou sans illumination, le photodétecteur présente un courant de pertes qui dérive dans le cas d'une photodiode de la présence de recombinaison en surfaces et de parcours de fuite dans le matériau massif. Ce type de courant non souhaité et qui doit être de très faible valeur est appelé courant d'obscurité. La densité spectrale normalisée du bruit de courant d'obscurité s'écrit de la façon suivante :

$$I_{\text{obs}}^2(f) = 2 q I_{\text{obs}} \quad (\text{En A}^2/\text{Hz}) \quad (\text{III} - 9)$$

Où I_{obs} est la valeur moyenne du courant d'obscurité.

III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous localisons notre composant le photodétecteur dans le module de réception dans un chaîne de transmission par fibre optique, ainsi nous exposons d'une façon générale les types des différents photodétecteurs qui existe dans l'électronique et leur principe de fonctionnement, justifiant ainsi le choix de la photodiode PIN (objet de notre recherche) .Ce chapitre donne également un aperçu sur les interactions entre la lumière et les matériaux semi-conducteurs.

Chapitre IV :

Le facteur de bruit

IV.I Introduction :

Le facteur de bruit est une mesure de la dégradation du rapport signal à bruit dans un système.

IV. 1.1 Facteur de bruit

Nous continuons notre étude en examinant le facteur de bruit de la liaison optique et plus précisément de chaque composante de cette liaison optique.

Le facteur de bruit est défini comme le rapport signal à bruit à l'entrée par rapport au rapport signal à bruit à la sortie, ce rapport indique la qualité du signal. Lorsque ce facteur de bruit F est grand le signal en sortie est très bruité.

Ce rapport est souvent utilisé dans les circuits électriques :

$$F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} \quad (\text{IV.1})$$

Ce terme peut s'écrire après simplification de la façon suivante:

$$F = \frac{N_s}{GN_i} \quad (\text{IV.2})$$

N_i est la densité spectrale du bruit à l'entrée du dispositif qui est le bruit de l'agitation thermique.

N_s est le bruit à la sortie du dispositif.

Ou G est le gain du dispositif en question. Ce terme peut s'écrire en faisant apparaître le bruit rajouté par le système :

$$F = \frac{GN_i + N_e}{GN_i} = 1 + \frac{N_e}{GN_i} \quad (\text{IV.3})$$

N_e le bruit rajouté par le dispositif à sa sortie.

Cette définition était utilisé dans les circuits électriques ou les entrées et les sorties sont électriques, nous voulons l'appliquer dans le cas d'une liaison optique ou l'on a un système hybride, avec une entrée électrique et une sortie optique dans le laser, ou l'inverse dans la photodiode .Dans notre modèle nous allons proposer une définition du facteur de bruit pour chaque bloc, et ensuite pour la liaison complète.

IV.1.2 Facteur du bruit du laser

Dans notre étude nous voulons étudier le facteur du bruit du laser en partant de la relation (IV.3), sachant que le bruit ajouté par le dispositif est relatif au bruit RIN. Dans notre modèle, il s'exprime par :

$$N_e = R_0 \langle i_{opt} \rangle^2 = R_0 \langle \alpha_c P_{opt} \rangle^2 = R_0 RIN \cdot \alpha_c^2 P_{opt,DC}^2 \quad (IV.4)$$

Pour étudier le facteur du bruit de la liaison complète, nous commençons par le laser qui est le premier élément, et qui est donc l'élément qui contribue le plus au bruit de la liaison.

Nous allons caractériser le laser en bruit, en introduisant une nouvelle définition de son facteur de bruit basée sur la représentation du laser en quadripôle équivalent.

D'après (IV.3) et (IV.4), et en exprimant le gain par le gain optique, le facteur de bruit du laser s'exprime par :

$$F_{OMlaser} = 1 + \frac{R_0 \cdot RIN \cdot \alpha_c^2 P_{opt,DC}^2}{G_{OM} \cdot KTB} \quad (IV.5)$$

La puissance de bruit d'entrée est le bruit thermique dont la densité spectrale est exprimé par :

$$N_i = KTB$$

Avec K la constante de Boltzmann, T est la température en (°K), B est la bande de fréquence.

On fait dans la suite notre étude sur une bande de fréquence égale à 1Hz.

Ce facteur de bruit augmente avec la fréquence, et sa valeur augmente en réduisant la valeur du courant de pompe.

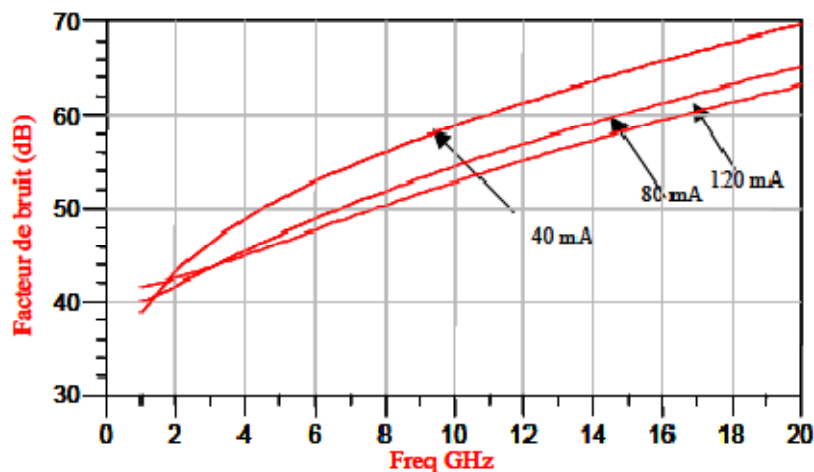
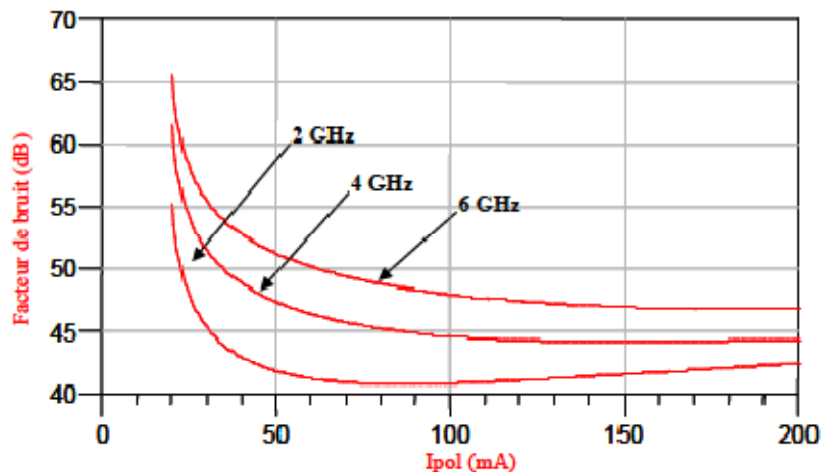


Figure (IV.1) : Facteur de bruit optique-microonde du laser en fonction de la fréquence de modulation pour plusieurs courants de polarisation du laser.

Nous représentons les variations du facteur de bruit, mais cette fois ci en fonction du courant de polarisation, pour plusieurs fréquences. D'après la Figure (IV.2), nous constatons que chaque fréquence du signal modulée à un courant de polarisation optimal pour lequel il a un facteur de bruit minimal, par exemple pour envoyer une fréquence de 2 GHz, le courant de polarisation optimal pour avoir un minimum de facteur de bruit est de 90 Ma.



Figure(IV.2) : Facteur de bruit du laser en fonction du courant de polarisation du laser.

IV.1.3 Facteur de bruit optique

Le facteur de bruit optique est utilisé dans les applications optiques pour caractériser les amplificateurs optiques, le processus utilisé est d'abord d'envoyer le signal optique dans un photodétecteur idéal [14], [15], [16] (d'efficacité quantique égale à 1) et de mesurer le rapport signal à bruit qui est considéré comme le rapport signal à bruit à l'entrée de l'amplificateur. Ensuite de le faire passer dans l'amplificateur optique et de mesurer ce rapport après que le signal soit détecté par un photodétecteur idéal comme indiqué dans la Figure (IV.3) :

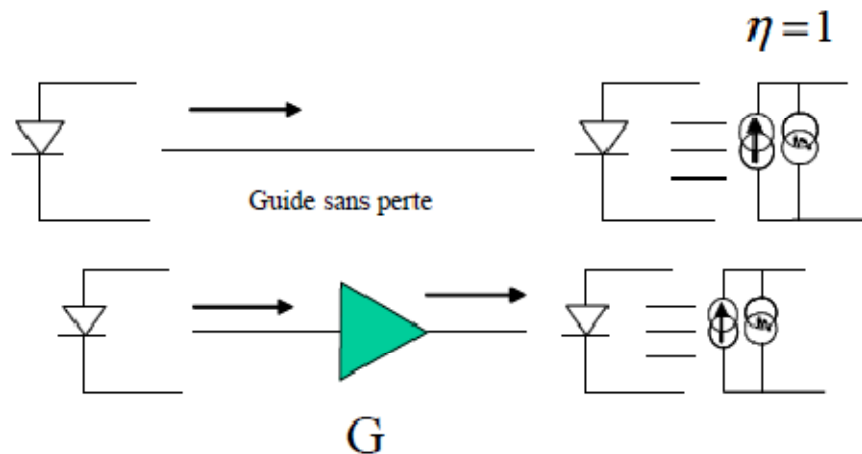


Figure (IV.3) : Mesure du facteur de bruit d'un amplificateur optique

Et dans ce cas là, le rapport signal à bruit à l'entrée est calculé par :

$$SNR_{in} = \frac{\langle i_{in} \rangle^2}{\langle \Delta i_n^2 \rangle} = \frac{\langle i_{ph} \rangle^2}{\langle \Delta i_n^2 \rangle} = \frac{R_{ph}^2}{2qR_{ph}P_{in}B} = \frac{nP_{IN}}{2hvB} \quad (IV.6)$$

B est la bande de fréquence.

La responsivité R_{ph} est calculée par :

$$R_{ph} = \frac{nq}{hv} \quad (IV.7)$$

Le détecteur est supposé idéal donc $n = 1$, ce qui donne la valeur de ce rapport à l'entrée

$$\text{par : } SNR_{in} = \frac{P_{in}}{2hvB} \quad (IV.8)$$

D'après cette relation, le bruit de Grenaille $2hv$ est pris comme bruit d'entrée pour les dispositifs optiques.

Pour un amplificateur qui n'a pas de bruit propre le rapport à la sortie s'écrit :

$$SNR_{out} = \frac{\langle i_{out} \rangle^2}{\langle \Delta i_{out}^2 \rangle} = \frac{GP_{in}}{2hvB} \quad (IV.9)$$

Et dans ce cas le facteur de bruit est le gain de l'amplificateur.

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = G \quad (IV.10)$$

Les mêmes démarches peuvent être faites pour une photodiode réelle, et le facteur de bruit dans ce cas sera son efficacité quantique [16].

IV.1.4 Facteur de bruit d'une photodiode

Ce facteur ne varie pas beaucoup avec la fréquence, car c'est le bruit de grenaille qui est prépondérant et il dépend du courant photoélectrique moyen, qui est proportionnel à la puissance optique moyenne.

Le facteur de bruit de la photodiode augmente avec la puissance incidente comme le bruit de Grenaille dépend de la puissance optique moyenne.

Dans la figure (IV.4) l'évolution du facteur de bruit de la photodiode est représentée en fonction de la fréquence, pour une puissance optique moyenne de 10 Mw.

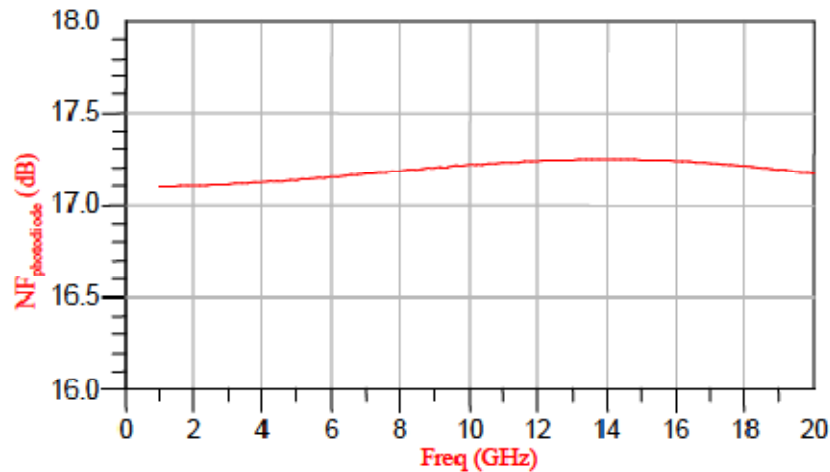


Figure (IV.4) : Facteur de bruit d'une photodiode pour une puissance moyenne incidente de 10 MW.

IV.2 Facteur de bruit de la liaison optique

Après avoir fait des études en terme de bruit du laser et de la photodiode, nous voulons faire l'étude pour la liaison complète, en mettant le laser et la photodiode reliés par la fibre optique.

D'une manière générale, il est possible de négliger le bruit optique additionnel au travers de la fibre. Dans ce cas, le rapport signal à bruit n'est pas dégradé par la fibre et son facteur de bruit est égal à 1. La définition ainsi proposée permet de traiter la fibre optiquement différemment d'un atténuateur électrique pour lequel la formule $F = \frac{1}{G}$ serait vérifiée.

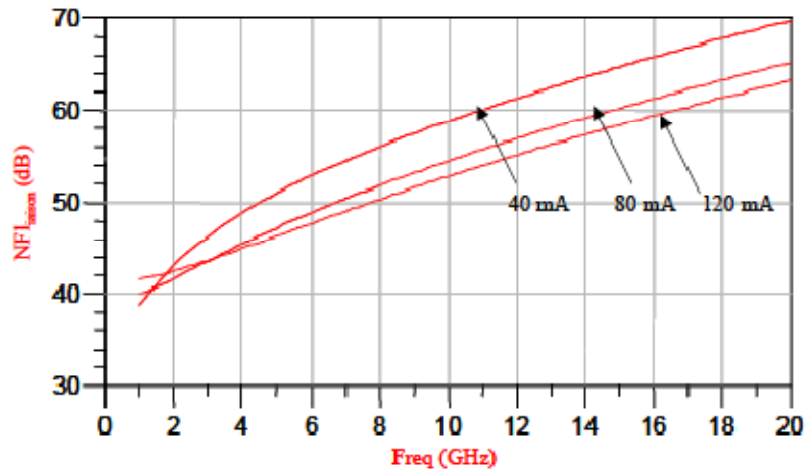
Nous pouvons dire que contrairement aux dispositifs électriques, où on avait un bruit minimal qui est le bruit thermique, dans le cas optique, nous n'avons pas de bruit minimal, et par conséquent le facteur de bruit de la fibre est unitaire.

Ceci va nous permettre d'écrire la relation qui relie le facteur de bruit de la liaison totale en fonction du facteur de bruit de chaque bloc par la formule de FRISS :

$$F_{\text{liaison}} = F_{\text{laser}} + \frac{(F_{\text{fibre}} - 1)}{G_{\text{OMlaser}}} + \frac{(F_{\text{PD}} - 1)}{G_{\text{OMfibre}} G_{\text{OMlaser}}} \quad (\text{IV.11})$$

Le deuxième terme est nul, la Figure(IV.5) représente la variation du facteur de bruit de la liaison complète, pour une longueur de fibre de 1 km.

On voit dans cette relation que le gain (en générale inférieur à 1) de la fibre intervient dans le troisième terme.



Figure(IV.5) : Facteur de bruit de la liaison optique pour une longueur de fibre de 1 km, pour plusieurs courants de polarisation de laser.

En comparant cette courbe au facteur de bruit du laser (Figure IV.1), on voit bien que le bruit provenant du laser est le bruit prédominant de la liaison optique.

IV.3 Conclusion :

Nous avons étudié l'influence de courant de polarisation du laser, la longueur de la fibre optique, sur les caractéristiques générales de la liaison en termes de facteur de bruit.

Un point optimal a ainsi été identifié pour minimiser le facteur de bruit total de la liaison.

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail de mémoire nous avons étudié des composants électroniques qui sont utilisés dans un canal de transmission optique, dans le cas d'une liaison à modulation directe à base d'un laser à semi-conducteur et une détection directe. La photodiode PIN L'étude approfondie du paramètre le plus pertinent du LASER à semi-conducteur, à savoir le bruit, nous renseigne clairement qu'il influe considérablement sur la chaîne de transmission. Ceci exige donc un contrôle des bruits générés par la diode LASER afin d'assurer un bon fonctionnement de la liaison optique.

La fibre optique permet le transport de débits nettement supérieurs à ceux que peuvent véhiculer les autres supports, et ceci avec une meilleure qualité de transmission. Les composants optiques sont les moteurs de la révolution des réseaux optiques qui tendent vers le tout-optique avec ses performances optimales (grandes capacités de transmission, défauts optimisés,...).

L'amplificateur à fibre dopée d'erbium (EDFA) permet de dépasser la limite imposée par l'atténuation de la fibre puisque la puissance envoyée en ligne peut être considérablement augmentée et que le signal peut être réamplifié au cours de sa propagation sans transduction.

Le bruit est un phénomène aléatoire, nous ne nous intéresserons qu'à ses propriétés statistiques: valeur moyenne, variance, corrélations. Nous pouvons représenter le bruit électronique par une puissance, une tension, un courant. La valeur moyenne du courant et de la tension est toujours nulle.

Les semi-conducteurs demeurent indispensables à des fonctions de plus en plus élaborées dans les émetteurs et les récepteurs, mais aussi pour la régénération optique et la conversion de longueur d'onde.

Ce projet de fin d'études, présente ainsi, des résultats théoriques concernant l'influence du bruit sur la transmission haut débit sur fibre optique.

Bibliographie :



[1] **Amar Bdeoui, Anne-Laure Billabert, Nicolas Breuil et Christian Rumelhard**, “Direct modulation of a laser by a microwave signal: A model for 1/f amplitude and phase noises”, Proceedings of the 33rd European Microwave Conference, Munich (Allemagne), 2003, pp. 1409 – 1412.



[2] **C. B. Su, J. Schlafer**, « Explanation of low frequency relative intensity noise in semiconductor lasers », Applied physics letters, vol. 57, no. 9, August 1990.



[3] **R. J. Fronen, L. K. J. Vandamme**, « Low-frequency Intensity Noise in Semiconductors lasers », IEEE Journal of quantum electronics, vol. 24, no. 5, May 1988, pp.724-736.



[4] **P. Signoret, G. Belleville, B. Orsal**, « Experimental investigation of the 1/f amplitude noise of vertical-cavity-surface-emitting-laser », Fluctuation and noise letters, Word scientific publishing company vol. 1, no. 1, L1-L5, 2001.



[5] **E. Milotti**, « Le bruit en 1/f », Pour la science, n°246 Avril 1998, pp 88-93.



[6] **Larry Coldren et Scott Corzine**, “Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits”, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, New York (Etats-Unis), 1995.



[7] **CASSAN E.**, « Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples », Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, EDP Sciences, 2002, Vol. 3.



[8] "Les techniques de l'ingénieur", Techniques de l'ingénieur, Paris, 1999



[9] <http://www.abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs>.



[10] Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque Par: Benaïcha Mouna, magistère en physique option : physique des matériaux métalliques et semi –conducteurs, université de batna.



[11] <http://www.abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs>.



[12] **K. Kawanishi, Y. Yamauchi, N. Mineo, Y. Shibuya, H. Murai, K. Yamada, H.Wada**, « EAM-Integrated DFB laser Modules with more than 40 GHz bandwidth », IEEE photonics technology letters, vol. 13, no. 9, September 2001, pp. 954-956.

Bibliographie :



[13] **Sergei Malyshev et Alexander Chizh**, “State of the art high-speed photodetectors for microwave photonics application”, 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Varsovie (Pologne), Mai 2004, pp. 765 – 7.



[14] E. Desurvire, “The noise figure of optical amplifiers”, IEEE Photonics Technology letters, Vol.11, No.5, May 1999.



[15] A. C. Cockrak, A. Altruncu, “Gain and noise figure performance of erbium doped fiber amplifiers (EDFA)”, Journal of Electrical & Electronics Engineering, Vol, 4, No, 2, 2004.



[16] D.M. Baney, P, Gallion, R,S, Tucker, “Theory and Measurement techniques for the noise figure of optical amplifiers”, Optical fiber Technology 6, 122-154, 2000.

Résumé : Au cours de ce travail de ce mémoire nous avons étudié des composants électroniques qui sont utilisés dans un canal de transmission optique, dans le cas d'une liaison à modulation directe à base d'une diode laser à semi-conducteur et une détection directe. la photodiode PIN. L'étude approfondie du paramètre le plus pertinent du LASER à semi-conducteur, à savoir le bruit, nous renseigne clairement qu'il influe considérablement sur la chaîne de transmission.

Mots clés : canal de transmission optique, modulation optique, bruits, photodiode PIN, fibre optique, diode laser, amplificateur dopé à l'erbium(EDFA).