

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département de l'Electronique
En vue d'obtention du diplôme Master en Electronique
Option : Réseaux et Télécommunications

THEME :

**Canal de transmission optique : étude des
éléments de la chaîne de transmission et de leurs
bruits respectifs**

Travail réalisé par :
Mr: SBARGOUD Mohamed
Mr: REKAI Sofiane

Proposé et dirigé par :
Mr: TAZIBT Slimane

Promotion: 2014



Remerciement

À travers ce modeste travail, nous tenons à remercier notre promoteur Mr TAZIBT. S pour son encadrement et ses conseils précieux et aussi pour l'intéressante documentation qu'il a mis à notre disposition

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail

Nous tenons aussi à remercier Mr TERDINE.A chef du centre d'amplification² de l'entreprise Algérie télécom Tizi-Ouzou pour son soutien et ces explications

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A ma mère « Zohra » symbole de sacrifice et pour
son dévouement pour mon bonheur*

A la mémoire de mon père « Ahmed »

A mes chers frères et sœurs

A toute la famille

A tous mes amis

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

SBAËGOUD M

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

A ma très chère mère, et mon très cher père, à leur grand sacrifice et le dévouement pour mon bonheur.

A mon cher frère

A mes chères sœurs

A toute la famille.

A mes amis et toute personne qui ma aidée de près ou de loin.

Rekai Sofiane

Sommaire

Introduction général	1
-----------------------------------	---

CHAPITRE I : Emetteur optique et ses bruit : diode laser

I.1.1 Introduction.....	4
I.1.2 Les sources optique.....	4
I.1.3 Caractéristiques des sources	4
I.1.4 Exigences imposés aux sources	5
I.1.5 Transition directe et transition in directe	6
a) Transition directe	6
b) transition indirecte	7
I.2 La diode laser a semi-conducteur.....	8
I.2.1 Principe de fonctionnement.....	8
I.2.2 Principe d'émission et d'absorption	8
I.2.3 Absorption.....	9
I.2.4 Emissions	9
a) Emission spontanée	10
b) Emission stimulée	10
I.2.6 Pompage optique	11
I.2.7 Principe de fonctionnement de laser Fabry Perrot	11
I.2.8 Les différents types de laser à semi-conducteur et leur application	12
a) Les lasers Fabry Perrot	12
b) Les lasers distributed feedback(DFB)	12
c) Les lesers distributed Braag reflector	13
d) Les lasers vertical cavity surface emitting laser	13
I.3 Modulation optique	13
I.3.1 Techniques de modulation	13
a) Modulation directe	14
a-1) Modulation d'amplitude	14
a-2) Les composants utilisés	14
a-3) Les limites.....	15
b) Modulation externe	15
b-1) Le modulateur électro-absorbant (MEA)	15
b-2) Le modulateur de Mach-Zehnder	15
b-3) Modulation de phase	16
b-4) Modulation d'amplitude	16
I.3 Effet Pokels	17
I.4 bruit lasers	17
I.4.1 Introduction	17
I.4.2 Origines des bruits laser	17
a) Bruits d'origine technique	17
b) Bruits d'origine quantique	18
I.4.3 Etude des bruits du laser	18
I.4.4 Bruit de grenaille.....	19
I.4.5 Réduire le bruit d'origine quantique	19
I.1.6 Réduire le bruit d'origine technique	19
I.4 Conclusion	20

CHAPITRE II : Canal optique comportant un amplificateur et ses bruits

II.1.1 Introduction.....	21
II.1.2 Description.....	21
II.1.3 Notions importantes.....	21
II.1.3.1 L'onde optique	21
II.1.3.2 L'indice de réfraction	21
II.1.3.3 Rayonnement optique	22
II.1.4 propagation dans la fibre	22
II.2 Les différents types de la fibre optique	23
II.2.1 Fibre multimode	23
II.2.1.1 Fibre multimode à saut d'indice.....	23
II.2.1.2 Fibre multimode à gradient d'indice	25
II.2.2 Fibre monomode	26
II.3 Caractéristiques de la fibre optique.....	27
II.3.1 L'atténuation	27
II.3.1.1 causes d'atténuation	28
a) Perte par absorption moléculaires	28
b) Perte par diffusion RAYLEIGH	28
c) Perte par micro-courbure	28
d) Perte par courbure	29
II.3.2 Dispersion	29
II.4 Régénération du signal	29
II.4.1 Atténuation	29
II.4.2 Dispersion	30
II.5. L'effet Kerr.....	30
II.6 Les fenêtres de transmission.....	31
II.6.1 La fibre en télécommunications	31
II.6.2 Utilisation des différents types de fibres optiques.....	31
II.6.3 Les applications de la fibre monomodes	32
II.7 Les avantages et inconvénients de la fibre optique	32
a) Les avantages	32
b) Les inconvénients.....	33
II.8 Les amplifications optiques	33
II.8.1 Introduction	33
II.8.2 L'amplificateur en ligne des systèmes de communication optique.....	34
II.8.3 Intérêt de l'amplificateur optique	34
II.8.4 Caractéristiques des amplificateurs optiques à fibre optique dopée à l'Erbium	36
II.8.5 Caractéristiques des amplificateurs optiques à semi-conducteur	38
II.8.6 Comparaison entre les deux méthodes	39
II.9 Bruits des amplificateurs optiques.....	39
II.10 Conclusion	40

CHAPITRE III : Récepteur optique et ses bruits : photodiode.

III.1 Introduction	42
III.2 Le photo-détecteur.....	42
III.3 Caractéristiques d'une photo-détection	43
III.3.1 Le coefficient d'absorption	43

III.3.2	Le rendement quantique	44
III.3.3	La sensibilité	45
III.3.4	Temps de réponse.....	46
III.4	coefficient de réflexion	46
III.5	Choix de matériaux	46
III.6	Les différents types des photo-détecteurs	47
III.6.1	Cellule photovoltaïque- la photodiode	47
III.6.1.1	Calcul de photo-courant	49
III.6.1	Photodiode PIN	50
III.6.2	Photodiode PDA (à avalanche)	51
III.6.3	Photodiode Schottky	54
III.7	Détection directe	54
III.8	Bruit de photo-détecteur.....	54
III.9	Conclusion.....	55

CHAPITRE IV: Facteur de bruit

IV.1	Introduction	56
IV.2	Facteur de bruit de la liaison optique	56
IV.3	Conclusion	57
Conclusion général		58

Introduction générale

Introduction générale

Les premières expériences de transmission optique datent de la fin du XIX^{ème} siècle avec la modulation de l'intensité de la lumière par un signal acoustique. Faute de savoir guider efficacement la lumière jusqu'au destinataire, ces moyens ne sont pas développés pour la transmission, mais donnent naissance à l'enregistrement optique du son.

Utilisant le principe connu depuis longtemps des fontaines lumineuses, les fibres optiques, minces cheveux de verre très transparents, ont fait l'objet d'applications (décoration, éclairage...).

L'invention de laser en 1960 allait fournir le premier de ces éléments et permettre d'envisager, grâce à la puissance et à la directivité de cette source des systèmes optiques potentiellement intéressants.

C'est en 1966 que sera lancée l'idée de transporter sur de grandes distances des signaux optiques sur une fibre. Cependant, il faudra des années pour maîtriser les procédés de fabrication et contrôler la composition des matériaux. On parviendra alors à obtenir des atténuations assez faibles, pour que devienne possible la transmission des signaux sur des distances suffisamment grandes pour présenter un intérêt pratique et rendre la technique optique compétitive. Certes, les fibres optiques étaient déjà utilisées, mais sur des très courtes distances, par exemple pour l'endoscopie où l'atténuation n'est pas un paramètre critique. Partie en 1960 de 1000dB/km l'atténuation est descendue à 20dB/km dans les années 70, puis 0.2dB/km pour une longueur d'onde de 1,55 μ m.

La fibre multi-mode des débuts a cédé ensuite la place à la fibre monomode dont la bande passante plus élevée. Les systèmes de transmission ont donc gagné en débit et en portée.

Comparé aux autres supports de transmission, la fibre présente une atténuation quasiment constante sur une énorme plage de longueurs d'onde et offre ainsi l'avantage de bande passante gigantesque permettant d'envisager la transmission de débit numérique très important, exigé par la multiplication des services.

Dès 1978 furent installés des systèmes travaillant avec une longueur d'onde optique de 0.8 μ m acheminant un débit compris entre 50 et 100Mbits/s avec un espacement, entre répéteurs (amplificateurs-régénérateurs).

La seconde génération de transmission sur fibre optique, apparue dans les années 1980, découle directement la mise au point du laser à semi-conducteur à $1.3\mu\text{m}$ longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est minimale.

Des débits supérieurs à 1Gbits/s avec un espacement entre répéteurs de plusieurs dizaines de kilomètres, sont alors atteints. Les portées de ces systèmes sont limitées par les pertes de la fibre de 0,5dB/Km, dans le meilleur cas. C'est ainsi qu'est apparue l'idée de développer, pour la fibre optique à base de silice, des sources émettant à la longueur d'onde $1.55\mu\text{m}$, pour laquelle l'atténuation est minimale et en utilisant, de plus, des fibres à dispersion décalée permettant ainsi un débit supérieur à 2Gbits/s.

Dans tous les pays, on considère aujourd'hui que les futurs réseaux d'interconnexion seront optiques, utilisant des systèmes capables de transmettre des débits de plusieurs Gbits/s (actuellement des Tbits/s), car dans le domaine des liaisons internationales, les câbles sous-marins en fibre optique, dont le premier TAT8, a été posé en 1989, ont permis d'augmenter la capacité, ainsi que l'espacement entre répéteurs. Mais malgré des progrès très importants, les répéteurs se révélaient difficiles à utiliser, et en particulier à insérer en lignes. C'est la raison pour laquelle les amplificateurs optiques (amplificateurs à fibre dopée) ont été introduits.

L'amplification optique à base de fibre dopée, annoncée en 1987, constitue aujourd'hui un dispositif clé des futurs systèmes optiques. Aisément insérable en lignes, il est possible d'accroître la capacité de transmission sans changer la configuration physique du réseau de transport. Les futures générations de câbles sous-marins qui franchiront les 6500 Km de l'atlantique ne comporteront plus aucun répéteur-régénérateur, mais seulement des amplificateurs optiques à intervalles réguliers de 100 km. De plus, ils permettent de compenser les pertes introduites par les coupleurs, les commutateurs, etc., et de distribuer le signal à un grand nombre d'utilisateurs, car la bande passante est énorme. Ceci permet d'envisager l'amplification simultanée de plusieurs porteuses optiques juxtaposées dans le spectre, constituant ce que l'on appelle un multiplex.

Ainsi naît le concept de multiplexage en longueur d'onde (WDM: Wavelength Division Multiplex), qui consiste à superposer sur une même fibre des signaux optiques ayant des porteuses de différentes longueurs d'onde. De plus, il permet également d'augmenter la capacité de transmission des informations au meilleur coût, et contribuer ainsi au développement croissant des télécommunications optiques.

Enfin avec plus de 10 millions de kilomètres fabriqués par an, les fibres optiques sont désormais une technologie à maturité, qui se diffuse dans les domaines d'application de plus en plus vastes.

Chapitre I

Emetteur optique et ses bruits : la diode laser

I.1.1 Introduction

L'apparition de la fibre optique a totalement révolutionné le monde des télécommunications. La conception des systèmes de transmission à très grande capacité est désormais possible. De plus, les échanges à travers ces systèmes sont devenus nombreux et la demande de services de plus en plus élevée. Mais son apparition a nécessité la conception et le développement de nouveaux composants optiques ou optoélectroniques performants. L'architecture d'une liaison, quelque soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée des mêmes blocs de base, à savoir, un émetteur, un canal de transmission et un récepteur. Dans ce cas, l'émetteur, qui est la diode laser, joue un rôle de modulateur, tout en assurant le rôle de convertisseur électro-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 optique véhiculé en effectuant une conversion optique-électrique.

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

Les caractéristiques des télécommunications sur fibre optiques dépendent du support de transmission qui doit avoir des distorsions et des atténuations faibles valeurs et de type de dispositif électronique utilisé pour la transmission de la lumière et sa détection.

I.1.2 Les Sources optiques

Les sources optiques sont des composants actifs dans le domaine de la communication par fibre optique. Leurs fonctions fondamentales sont de convertir une énergie électrique en une énergie optique (conversion électro-optique) avec un rendement satisfaisant et assurer un bon couplage avec la fibre.

I.1.3 Caractéristiques des sources

Largeur spectral

Le spectre d'émission de la source à une grande importance, car sa largeur dépend l'effet de dispersion chromatique et donc de la bande passante de la liaison.

Duré de vie

La durée de vie d'une source est un paramètre important pour la fiabilité d'un système de transmission.

Intensité

le paramètre qui exprime l'intensité lumineuse émise par une source est le rayonnement défini par la puissance optique émise par unité d'angle solide et par unité de surface exprimée en $W/cm^2 \cdot sr$, telle que le stéradian sr est l'unité d'angle solide correspondant à un angle au sommet de 1 radian (57°).

Fréquence de modulation

Pour l'utilisation des LED et laser dans les systèmes de transmission, un autre paramètre important, est la fréquence maximale à laquelle peuvent être modulés les LED et les lasers ; cette fréquence dépend du procédé physique qui génère l'émission lumineuse.

I.1.4 Exigences imposées aux sources optiques

▪ Longueur d'onde

Pour optimiser l'utilisation des fibres, il est nécessaire que la source émette des ondes optiques à la longueur d'onde où la fibre présente un minimum d'atténuation et de dispersion. De plus, il faut aussi s'assurer de la disponibilité des détecteurs à ces longueurs d'ondes.

▪ Puissance de sortie

Le niveau de puissance émise à une grande influence sur la portée de la liaison. Pour l'augmenter, on doit émettre la plus grande puissance possible, sachant que les sources disponibles dans le domaine des télécommunications émettent des puissances (quelques dBm) très inférieures au seuil de non linéarité ($20kW/cm^2$).

Dans une même fibre on peut injecter plusieurs signaux différents permettant de transmettre plusieurs informations différentes (multiplexage en longueur d'onde).

▪ Dimensions :

Les dimensions des sources optiques doivent être comparables à celles de la fibre. L'idéal serait que toute la puissance émise par la source soit totalement injectée dans le cœur de la fibre.

- **Effets de concentration énergétique**

Le diagramme de rayonnement de l'onde émise doit être le plus directif possible afin d'assurer le meilleur couplage entre la source et la fibre.

- **Linéarité**

Les sources optiques doivent être parfaitement linéaires pour une utilisation en modulation d'amplitude, ce qui permet d'éviter la création d'harmoniques.

- **Bande passante**

Pour augmenter la bande passante de la fibre, il est nécessaire de minimiser la dispersion chromatique, ce qui conduit à utiliser des sources de faibles largeurs spectrales.

Le choix d'émetteur (source) pour une communication optique s'est porté essentiellement sur les semi-conducteurs vus leurs faibles dimensions et leurs grandes fiabilités de transmissions.

En télécommunication optique la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix des sources à spectres réduites telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL). Ces deux sources sont réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct, le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électron-trou.

I.1.5 Transition direct et indirect

a) Transition directe

On appelle transition directe le passage d'un électron d'un niveau énergétique à un autre sans que sa quantité de mouvement ne soit modifiée. Sur la figure (I.1.a), on a représenté la transition directe d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence dans un semi-conducteur à bande interdite directe (direct gap), ce même semi-conducteur dans lequel le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont caractérisés par le même vecteur d'onde.

b) Transition indirecte

On appelle transition indirecte le passage d'un électron d'un niveau énergétique à un autre nécessitant une modification de sa quantité de mouvement. Sur la figure (I.1.b), on a représenté la transition indirecte d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence dans un semi conducteur à bande interdite indirecte (indirect gap), dans lequel le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont caractérisés par des vecteurs d'onde k différents [1]

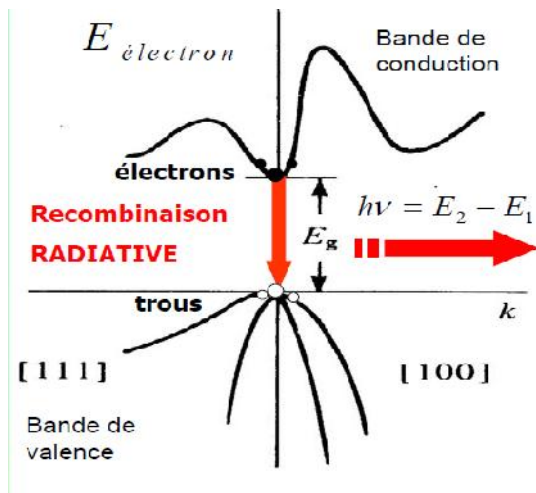


Figure : (I.1.a) : Semi-conducteur à gap directe

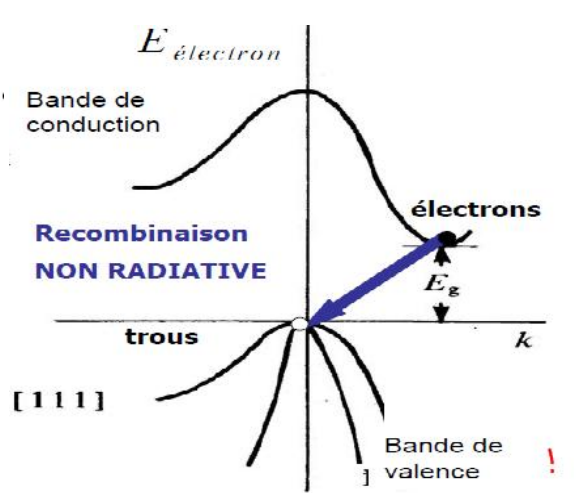


Figure : (I.1.b) Semi-conducteur à gap indirecte

La diode laser (DL) est une source cohérente et monochromatique. Elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance (faible largeur spectrale, bande passante importante). La cohérence exprime l'étroitesse du spectre de fréquence.

La DEL est une source incohérente et polychromatique. Elle présente, contrairement à la diode laser, un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif. Elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grande bande passante.

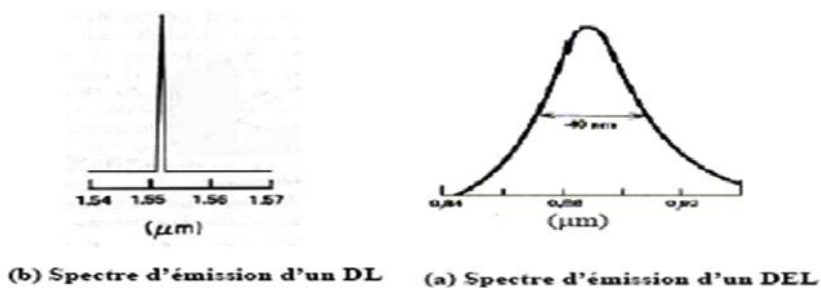


Figure (I. 2) : Spectre d'émission d'une source

L'intensité globale de la lumière émise par la diode est fonction du courant de polarisation. L'allure de la courbe de variation de cette intensité est représentée en échelle linéaire sur la figure (I-3). Lorsque ce courant est faible le laser se comporte comme un LED et il émet de la lumière non cohérente. Lorsque se courant appliqué dépasse une limite appelé courant de seuil I_s on commence à avoir l'émission stimulée et le laser émis une lumière cohérente avec un spectre très fin.

Le courant de seuil est un paramètre très important, que les concepteurs des diodes lasers cherchent à minimiser.

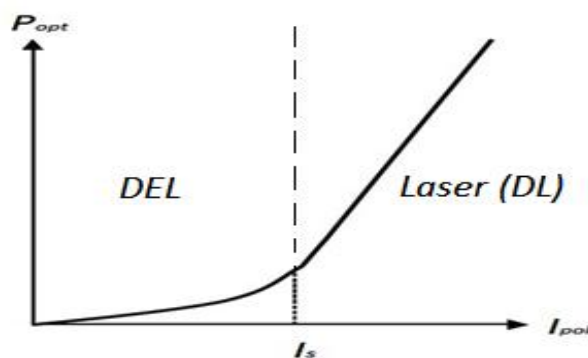


Figure (I.3) : Caractéristique de la puissance optique du laser en fonction du courant de polarisation

I.2 La diode laser à semi-conducteur

I.2.1 Principe de fonctionnement

On a vu précédemment que la diode laser est la mieux adaptée dans les systèmes de télécommunication optique (bande passante importante, cohérence...). Cette dernière se base sur trois processus fondamentaux dans l'interaction onde-matière. Ces processus sont : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée :

I.2.2 Principe d'émission et l'absorption

L'absorption et l'émission d'énergie sont obtenues à partir des électrons d'un niveau d'énergie vers un autre niveau. La longueur d'onde de la radiation est liée à la différence d'énergie entre ces deux niveaux :

$$\Delta E = E_c - E_v = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (I.1)$$

E_c : Énergie de la bande de conduction.

E_v : Énergie de la bande de valence.

h : constante de Planck.

ν : Fréquence de photon.

c : la vitesse de la lumière.

λ : Longueur d'onde.

I.2.3 Absorption :

Sous l'effet de l'agitation thermique où tout apport d'énergie extérieure, par exemple provenant d'un photon, un électron peut être arraché à son atome d'origine pour se déplacer de manière quasi libre dans le cristal. L'électron passe ainsi de la bande de valence à la bande de conduction, figure (I.4).

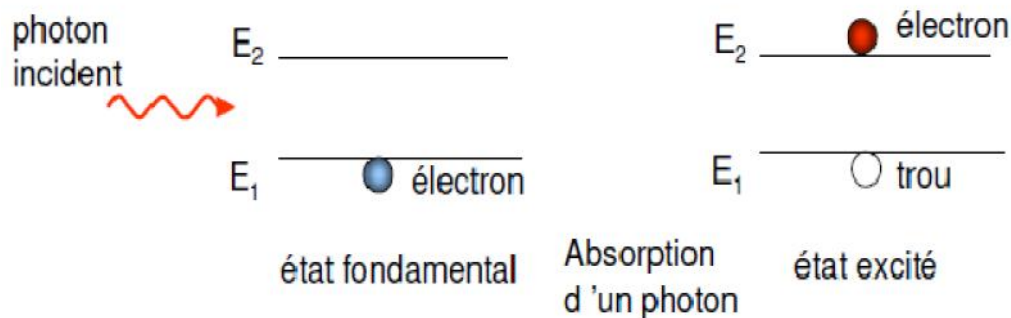


Figure : (I.4) : Absorption.

I.2.4 Emission :

Un électron excité, situé dans la bande de conduction, peut passer vers le niveau d'énergie plus bas en émettant un photon dont la fréquence de rayonnement est donnée par :

$$\nu = \Delta E / h \quad (I.2)$$

On distingue deux types d'émission : l'émission spontanée et l'émission stimulée.

a) Emission spontanée :

Lorsqu'un électron transite, sans action extérieure, d'une orbite élevée (plus énergétique) vers une autre moins élevée (moins énergétique), une radiation lumineuse (ou photon) est émis. Cependant, ce type d'émission se traduit par une faible directivité et une faible puissance, Figure : (I.5).

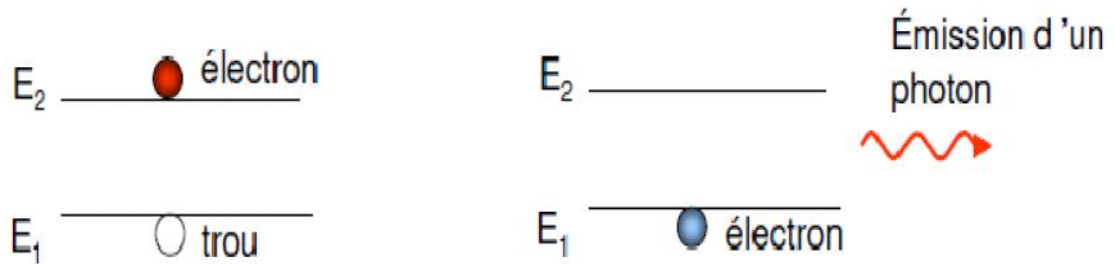
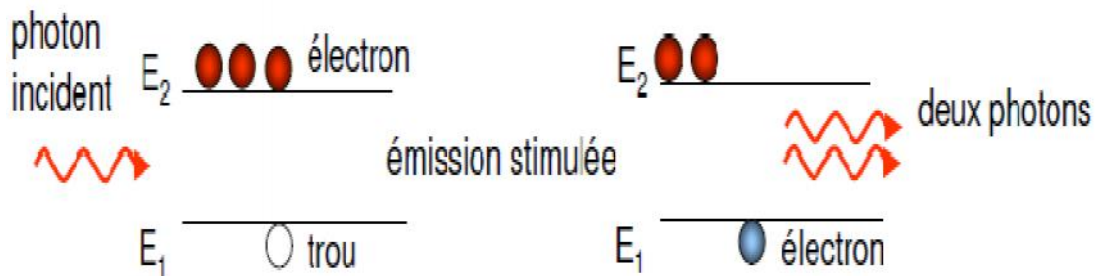


Figure : (I.5) : émission spontanée

b) Emission stimulée :

Entrant en collision inélastique avec un photon, un atome, à l'état excité, retombe dans l'état fondamental en émettant un autre photon, identique au photon incident. Le nouveau photon, émis, par émission stimulée, a la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et aussi la même directivité spatiale. La lumière ainsi émise est dite cohérente, figure(I.6).



Figure(I.6) : émission stimulée.

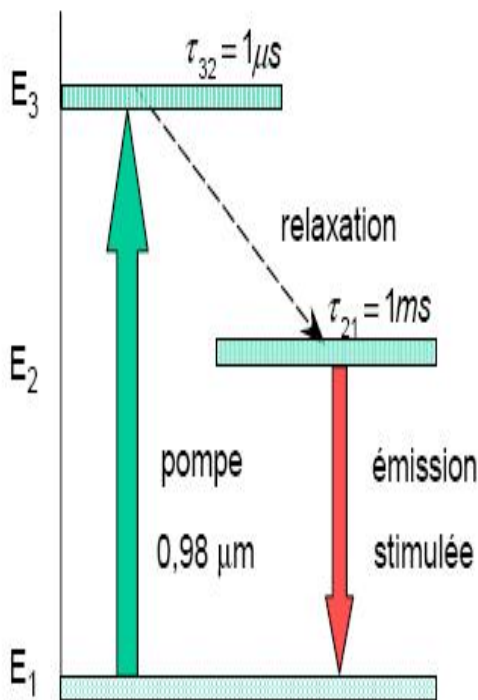
Pour obtenir l'effet laser, il est nécessaire de privilégier l'émission stimulée. Deux conditions doivent être réalisées pour favoriser cette émission :

1) Il est nécessaire qu'il y ait suffisamment d'électrons dans le niveau d'énergie supérieur (état excité). Pour cela il faut créer une inversion de population qui consiste à mettre des électrons dans la bande de conduction. Dans les semi-conducteurs, on obtient cette inversion de population par pompage électrique (ou par injection de porteurs).

2) Il faut qu'il y ait suffisamment de photons excitateurs. Pour cela, on astreint l'énergie lumineuse à s'accumuler dans le semi-conducteur, placé dans une cavité résonnante de type Fabry Perrot.

I.2.6 Pompage optique

Le pompage permet d'amener une majorité des particules à l'état excité (excitation optique, décharge électrique, thermique ...). Il ya ensuite accumulation d'électrons sur le niveau métastable, c'est l'inversion de population. Celle-ci favorise l'émission stimulée. [2 3] Pour obtenir une inversion de population suffisamment importante entre les deux niveaux impliqués dans la transition laser, le milieu doit comporter au moins 3 niveaux d'énergie la figure (I.4), ci-dessous représente le système à trois niveaux d'énergie utilisé pour le pompage des ions



Les électrons sont « pompés » à partir du niveau fondamental E_1 sur un niveau E_3 (groupe de niveau très rapproché ou bande) en utilisant un rayonnement de longueur d'onde $\lambda_p = 0,98 \mu\text{m}$.

La durée de vie τ_{32} , pour les transitions $E_3 \rightarrow E_2$ étant très courte devant la durée de vie de τ_{21} pour les transitions $E_2 \rightarrow E_1$, les électrons vont s'accumuler sur le niveau E_2 .

Le niveau intermédiaire E_3 ne sert qu'à faciliter l'inversion de population.

Figure(I.7) Niveaux d'énergie des ions E_r dans la silice

I.2.5 Principe de fonctionnement de Laser Fabry Perrot

Le principe du laser repose sur trois éléments essentiels :

- le milieu amplificateur (d'onde lumineuse),
- la cavité résonnante (ou boucle de contre-réaction),
- la pompe (ou source d'excitation).

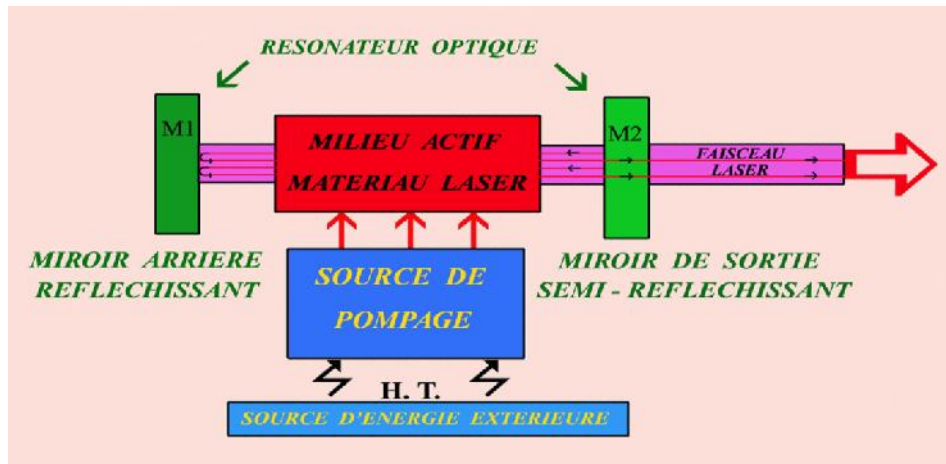


Figure (I.8): laser à cavité de type Fabry Perrot

Le résonateur « Fabry-Perrot » est constitué d'une cavité formée de deux miroirs parfaitement parallèles (faces clivées contenant le milieu amplificateur). L'injection des porteurs majoritaires dans la jonction PN produit une inversion de population et provoque : une émission spontanée et une émission stimulée. L'introduction de la jonction dans la cavité, permet d'obtenir, au-dessus d'un certain seuil de polarisation, un gain supérieur aux pertes de la cavité.

I.2.6 Les différents types de laser et leurs applications

A cause de la diversité de l'application des lasers, il n'est évidemment pas possible de rendre compte en détail de cette révolution technologique, et c'est pourquoi on se contentera de donner les applications les plus connus. On va donner une simple description de chaque type de laser.

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

a) Les lasers Fabry-Pérot (FP)

Ces lasers sont peu performants en bruit, mais peu coûteux. Ils sont de plus multi-modes 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.

b) Les lasers Distributed Feedback (DFB)

Ils ont de très bonnes performances en bruit et sont largement utilisés pour les télécommunications. Ils sont monomodes et leur longueur d'onde atteint également les 1550nm.

c) 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 présente un coût élevé.

d) 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 série (en grand nombre). Cependant, la technologie de fabrication des VCSELs à 1550 nm n'est pas encore mature. Ils présentent de plus quelques inconvénients en comparaison aux DFBs. Leur puissance émise est plus faible et leurs propriétés spectrales et en bruit sont moins bonnes.

I.3 La modulation optique

Le modulateur est un dispositif capable de modifier les paramètres d'onde optique (amplitude, phase...). Deux méthodes sont utilisées pour moduler les ondes optiques : la modulation directe et la modulation externe.

Dans la modulation directe, on utilise soit une diode laser (LD), soit une diode électroluminescente (LED). Dans ces deux dernières, on modifie le courant d'injection au sein même de la source optique. Cette technique est simple et peu coûteuse. Quant à la modulation externe, le signal optique provenant de la source optique (laser, LED) est modulé, en amplitude ou en phase, grâce à un modulateur électro-optique, situé à l'extérieure de la source optique [4]. Cette modulation s'obtient à l'aide d'une polarisation continue à laquelle on superpose le signal modulant.

I.3.1 Techniques de modulation

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques. Il existe principalement 2 techniques : la modulation directe et la modulation externe. Le détail de ces 2 configurations est donné dans ce paragraphe.

a) Modulation directe : [5] [6]

a.1) Modulation d'amplitude

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

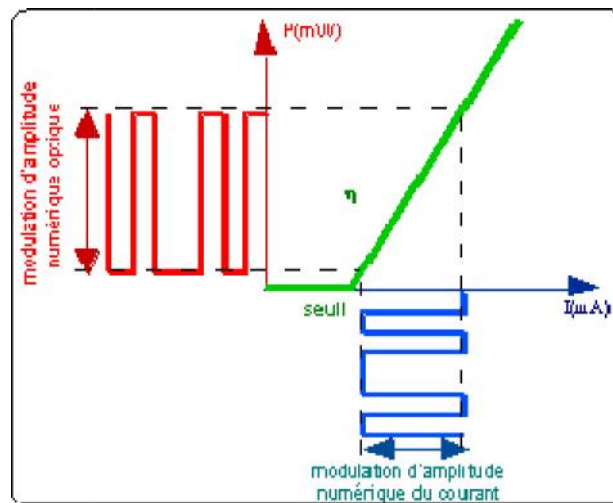


Figure (I.9) : Modulation directe d'une diode laser.

a.2) Les composants utilisés

Cette solution de modulation requiert assez peu de composants. En dehors de la source optique, le laser, seuls un générateur de courant et un driver sont nécessaires Figure (I.7). Le premier va émettre à un débit donné une séquence de données, expression de l'information à transmettre. Le rôle du driver est de commander la source optique au niveau des puissances émises (en fixant les valeurs du courant d'alimentation). Pour cela, il modifie, transforme les niveaux du courant issu du générateur.

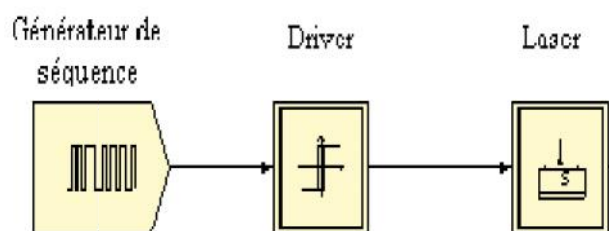


Figure (I.10) : Synoptique de la modulation directe.

a.3) Les limites

La modulation directe connaît beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en œuvre. Mais elle comporte aussi des limites. Les lasers en sont souvent la cause. Leur temps de réaction, les oscillations, le bruit créé font que la modulation directe engendre, pour les hauts et très hauts débits, certaines dégradations sur le signal optique modulé. A cela, la modulation externe constitue un remède.

b) Modulation externe

La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable. Plusieurs types de modulateurs sont disponibles, en particulier nous nous intéresserons au modulateur du type Mach-Zehnder et au modulateur à électro-absorbant.

b.1) Le modulateur électro-absorbant(MEA) :

Le principe de fonctionnement du modulateur à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur soumis à un champ électrique. Cet effet est connu sous le nom d'effet Franz-Keldysh [7] dans un matériau massif et d'effet Stark confiné dans un matériau quantique. Une caractéristique particulièrement intéressante des modulateurs à électro-absorption est qu'ils peuvent être facilement intégrés avec des diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation.

b.2) Le modulateur de Mach-Zehnder (MMZ)

Les modulateurs du type Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques que l'on place directement en sortie du laser figure (I.11). Ils sont fréquemment utilisés pour les applications de télécommunication large bande.

En réalité, les effets électro-optiques sont à la base de ce type de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique [7]. Ce phénomène est appelé effet Pockels si les effets électro-optiques sont linéaires, c'est-à-dire que la variation d'indice est proportionnelle au champ appliqué, et effet Kerr quand elle est proportionnelle au carré du champ.

L'effet Pockels est prépondérant dans certains matériaux et permet des modulations de phase et d'amplitude de la lumière.

Un des principaux impératifs est d'utiliser des matériaux transparents à la longueur d'onde de fonctionnement et présentant des coefficients électro-optiques aussi élevés que possible. De tels modulateurs fonctionnant à $1,5 \mu\text{m}$ ont été réalisés sur substrat de niobate de lithium (LiNbO_3) ainsi que dans des matériaux semi-conducteurs (GaAs , ...). Grâce à ce modulateur, on peut obtenir une modulation d'amplitude à travers une modulation de phase à l'intérieur du composant.

b.2.1) Modulation de phase

Le champ électrique appliqué change l'indice de réfraction du matériau, ce qui a pour conséquence de faire varier la phase de l'onde guidée et d'engendrer un retard variable de l'onde optique. Un déphasage dépendant de la tension électrique est ainsi créé (modulation de phase en alternatif).

b.2.2) Modulation d'amplitude

Cela consiste à réaliser une interférence [8] dans laquelle il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras par l'application d'une tension contrôlée sur le matériau électro-optique.

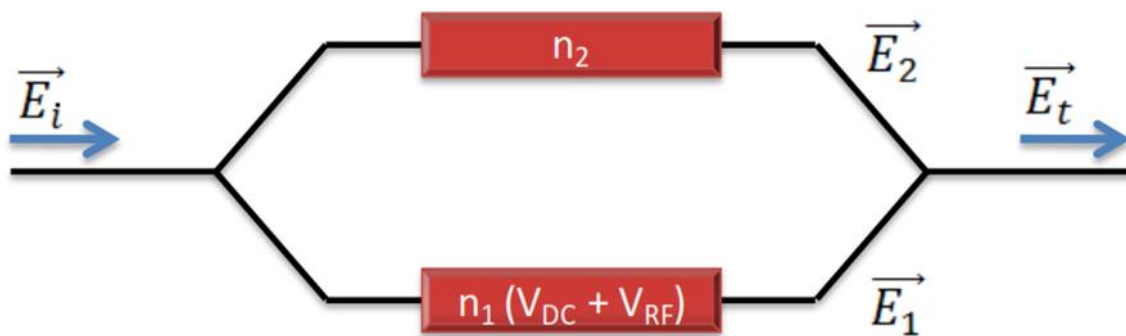


Figure (I.11) : Le modulateur de Mach-Zehnder

En conclusion, la modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc de transmettre des débits plus élevés. Le bruit, le chirp ... ne sont pas inexistantes dans les modulateurs de Mach-zehnder mais leurs valeurs sont nettement plus faibles que dans les lasers. Les limites de capacité de transmission sont donc repoussées vers des fréquences plus importantes.

I.3.2 Effet Pockels

C'est l'effet électro-optique linéaire, obtenu lorsqu'on applique un champ externe quasi statique ($w=0$). Cet effet est utile pour moduler la lumière. L'indice de réfraction change avec l'application d'un champ électrique. Il a été découvert par Kundt et Röntgen indépendamment l'un de l'autre en 1883. Il n'existe que pour les cristaux qui n'ont pas de symétrie d'inversion (non centro-symétriques). La théorie générale a été formulée par Pockels en 1893.

I.4 Bruit du laser

I.4.1 Introduction

Un laser à semi-conducteur constitue un générateur de fréquences optiques particulièrement imparfait émettant des ondes dont le champ électrique est affecté par des bruits d'amplitude ou d'intensité et des bruits de fréquence ou de phase, même lorsque le laser est polarisé en continu d'une façon très stable. Ces fluctuations imposent une limite ultime aux performances de n'importe quel système de communication optique.

L'origine de ces fluctuations est à chercher d'abord dans l'émission spontanée puis dans la nature discrète des processus d'émission et d'absorption de photons et des processus de génération et de recombinaison des porteurs.

I.4.2 Origines des bruits Laser

Pour arriver à réduire les bruits laser et à lire une courbe de bruit, 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 peuvent être classées dans deux catégories : les bruits d'origine technique et les bruits d'origine quantique. Les bruits extrinsèques aux lasers seront reliés à la mesure.

a) Bruits d'origine technique

Les chercheurs 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 bruit d'origine technique sont causés par :

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

b) 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 le type de cavité choisi et c'est rarement l'obtention d'un laser ayant de faible bruit en guide de conception.

Si dans le domaine de l'électronique, la limite inférieure de 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.
- ✚ le coupleur de sortie d'un laser.
- ✚ les pertes dans une cavité.

I.4.3 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 I 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 des interactions entre les électrons N et les photons P , sont donc modifiés par l'introduction d'un terme additif concernant le bruit appelé force de Langevin [9].

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{q} - \frac{N}{\tau_n} - G \cdot P + F_n(t) + F_n \cdot \frac{1}{f}(t) \quad (I.3)$$

$$\frac{dp}{dt} = G \cdot P + R_{sp} - \frac{p}{\tau_p} + F_p(t) \quad (I.4)$$

Ou $F_n(t)$, F_n , $1/f(t)$ et $F_p(t)$ sont des forces de Langevin.

On définit ainsi le **bruit relatif d'intensité RIN** (de l'anglais « Relative Intensity Noise ») comme le rapport entre la densité spectrale des fluctuations de nombre de photons et le nombre de photons au carré, ou entre la densité spectrale de fluctuations de puissance optique et carré, de la puissance optique moyenne :

$$RIN(f) = \left\langle \frac{\Delta P_{opt}^2}{P_{opt}^2} \right\rangle \quad (I.5)$$

ΔP_{opt}^2 : La moyenne carrée des fluctuations de la puissance optique.

P_{opt} : la puissance optique moyenne.

Le RIN s'exprime en Hz^{-1} et généralement en dB/hz .

I.4.4 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.

I.4.5 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
- Pompage soit au dessus du seuil de laser

I.4.6 Réduire le Bruit d'origine technique

- Avoir un bon contrôle de la température.
- Avoir une cavité stable optiquement.
- Avoir un laser isolé des sources de vibrations acoustique et mécaniques dont celle du sol

- ✚ Avoir un laser de pompe peu bruyant.

I.4.7 Conclusion

Dans les télécommunications par fibres optiques, le but recherché est une émission centrée dans les fenêtres de transparence et de faible dispersion des fibres, $\lambda = 1,3\mu\text{m}$ et $\lambda = 1,5\mu\text{m}$, une grande brillance c'est -à-dire une forte luminosité à partir d'une faible surface, compatible avec les dimensions des fibres, et enfin une bonne possibilité de modulation.

Chapitre II

Canal à fibre optique comportant
un amplificateur et ses bruits

II.1.1 Introduction

Une fibre optique est une structure cylindrique, inhomogène, fabriqué à base de verre (silice) ou de plastique, très fine (de la taille d'un cheveu humain). Par ailleurs, elle présente la propriété de propager la lumière. Elle sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. De plus, elle offre un débit d'information, allant jusqu'au Térabits/s, très nettement supérieur à celui des câbles classiques (câbles coaxiaux et lignes téléphoniques). Elle porte un réseau par lequel peut transiter aussi bien la télévision, le télégraphe, la vision-conférence ou les données informatiques.

II.1.2 Description

Une fibre optique à saut d'indice, guide d'onde optique permettant de propager la lumière sur une grande distance, est constituée de deux diélectriques concentriques (Figure. II.1):

- Un diélectrique interne : le cœur d'indice de réfraction n_1 .
- Un diélectrique externe : la gaine d'indice de réfraction n_2 , légèrement inférieure à celui du cœur.

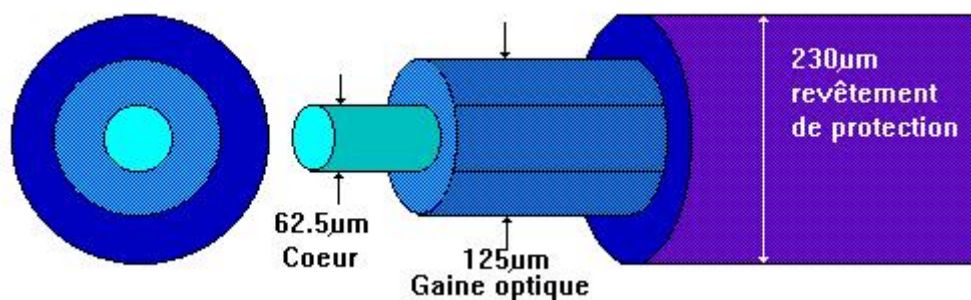


Figure (II.1) : Structure d'une fibre optique

II.1.3 Notions importantes

II.1.3.1 L'onde optique

C'est une onde électromagnétique qui se propage dans la fibre, caractérisée par:

- un champ électrique \vec{E}
- un champ magnétique \vec{H}
- une direction de propagation, caractérisée par son vecteur d'onde \vec{k} .

II.1.3.2 L'indice de réfraction

Un milieu de propagation quelconque est caractérisé par un indice de réfraction.

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (\text{II.1})$$

ϵ_r : la permittivité diélectrique relative de milieu.

μ_r : la perméabilité magnétique relative de milieu.

II.1.3.3 Le rayon optique

C'est la trajectoire de l'onde électromagnétique correspondant à la direction de vecteur d'onde.

II.1.4 Propagation dans la fibre

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre, en empruntant un parcours en zigzag (Figure II.2).

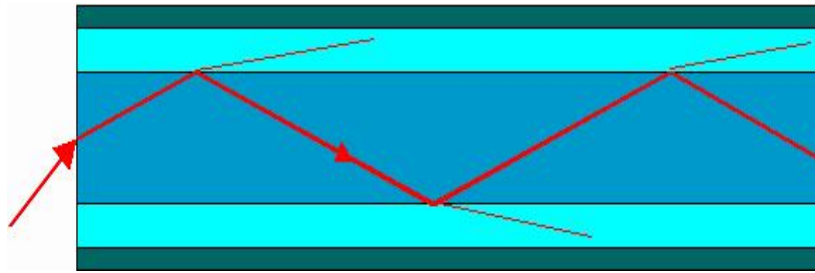


Figure (II.2) : Chemin parcouru par un rayon lumineux dans une fibre optique.

La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée.

Une fibre optique est décrite selon deux paramètres. Le premier est la différence d'indice normalisée, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine.

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (\text{II.2})$$

Le second est l'**ouverture numérique** de la fibre (N.A. pour Numerical Aperture), (Figure II.3). Concrètement, ce paramètre est le sinus de l'angle du cône d'acceptance de la lumière dans la fibre pour que celle-ci puisse être guidée. Cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre.

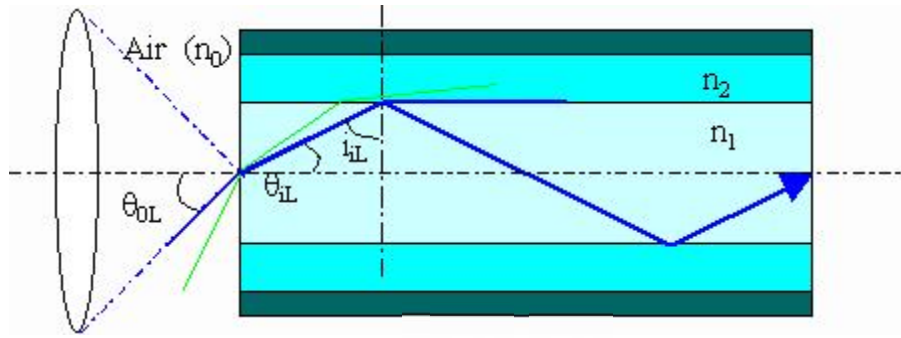


Figure (II.3): Ouverture numérique d'une fibre optique

$$ON = \sin(\theta_{OL}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (II.3)$$

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

II.2. Les différents types de fibre optique

Les fibres qui intéressent le domaine des télécommunications sont de deux types :

- Les fibres multi-modes
- Les fibres monomodes.

Ces deux types de fibres se distinguent par les dimensions du cœur. Il est de $50 \mu\text{m}$ pour les fibres multi-modes et de $10 \mu\text{m}$ pour les monomodes, ainsi que par le seuil d'indice de réfraction entre cœur et gaine.

II.2.1 Fibre optique multi-mode

Un rayon lumineux pénétrant dans le cœur de la fibre, à l'une des ces extrémités se propage longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit due aux indices de réfraction entre le cœur et la gaine, et se divisent en deux catégories :

II.2.1.1 La fibre multi-mode à saut d'indice

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction n_1 reste constant dans tout le cœur, puis décroît brusquement à une valeur $n_2 < n_1$, dans la gaine. (Figure II.4)

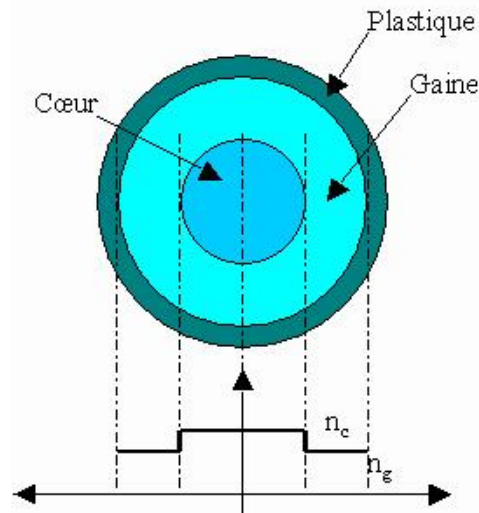


Figure (II.4) Section et profil d'indice d'une fibre multi-modes à saut d'indice

Dans la fibre à saut d'indice les rayons ayant la même longueur d'onde se propagent dans la fibre en empruntant des chemins différents avec une vitesse de valeur constante $v=c/n_1$. Il est donc évident que les rayons arrivent à destination avec des temps différents selon les parcours effectués, donc les modes de propagation. Ceci provoque une forte dispersion du signal lumineux qui est due à la multiplication des modes de propagation provoquant ainsi la distorsion de l'impulsion à l'extrémité de la fibre. (Figure II.5)

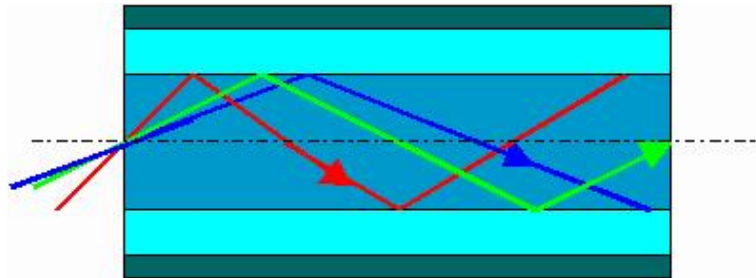


Figure (II.5) Chemins optiques empruntés par les rayons lumineux.

Cette dispersion modale traduit l'étalement de spectre d'entrée :

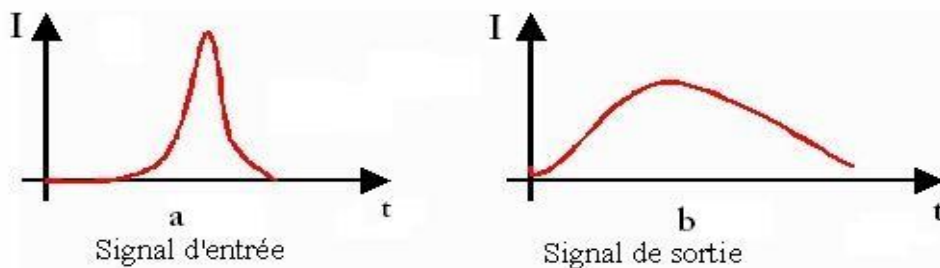
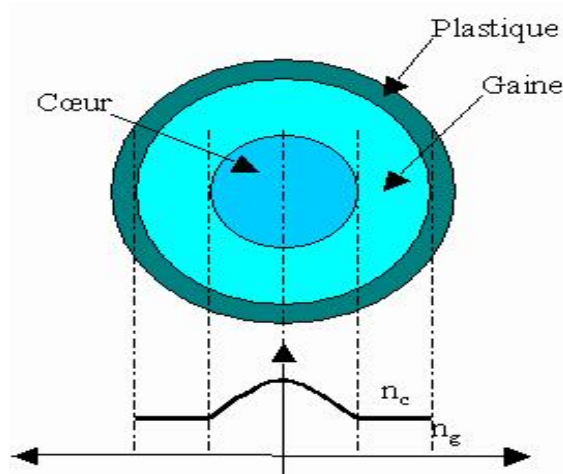


Figure (II.6): Etalement du signal optique dans une fibre multi-modes à saut d'indice.

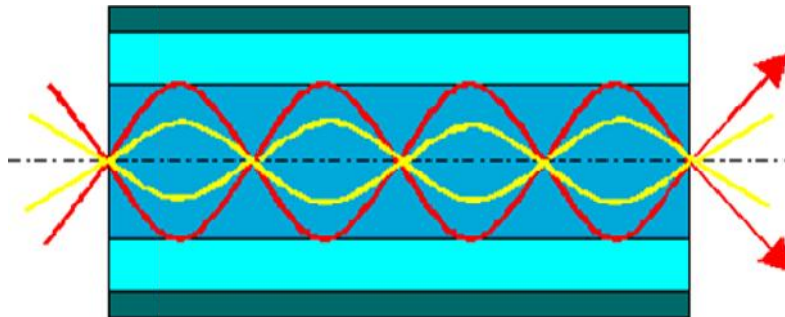
II.2.1.2 Fibre multi-mode à gradient d'indice

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction n n'est pas constant mais décroît graduellement du centre de la section du cœur jusqu'à la limite de la surface de séparation entre le cœur et la gaine



Figure(II.7) : Section et profil d'indice d'une fibre multi-modes à gradient d'indice

Les rayons se propagent d'une manière quasi hélicoïdale à cause des variations de l'indice de réfraction dans le cœur.



Figure(II.8) : Chemins optiques empruntés par les rayons lumineux.

L'avantage du profil à gradient d'indice réside dans le fait que les rayons relatifs aux parcours les plus longs (ceux qui sont à proximité de la gaine) voyagent dans un milieu de faible indice de réfraction donc avec une vitesse élevée ($v=c/n$) par contre les rayons qui font des parcours plus brefs (ceux qui sont à proximité du centre du cœur) voyagent dans un milieu d'indice de réfraction de valeur plus élevée, donc avec une vitesse faible. Dans ce cas, toutes les composantes de l'impulsion effectuant des parcours différents atteignent en même temps le récepteur générant ainsi une impulsion peu déformée.

Ce type de Fibre ayant pour ouverture numérique des valeurs comprises entre 0.20 et 0.24 fut développé à l'origine pour une application dans les télécommunications à des longueurs d'onde de 850 et 1300 nm. [10]

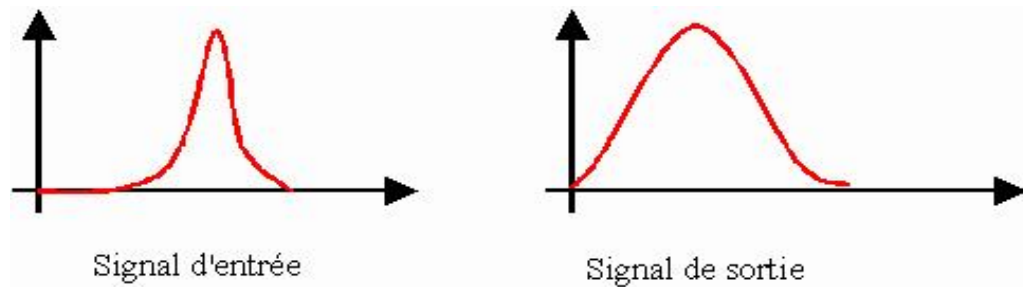


Figure (II.9) : Etallement du signal optique dans une fibre multi-modes à gradient d'indice

II.2.2 Fibre monomode

Dans ce mode, on obtient un seul mode grâce à la très faible dimension du cœur (diamètre de 10µm 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 :

$$m = \frac{2d}{\lambda} ON \quad (\text{II.4})$$

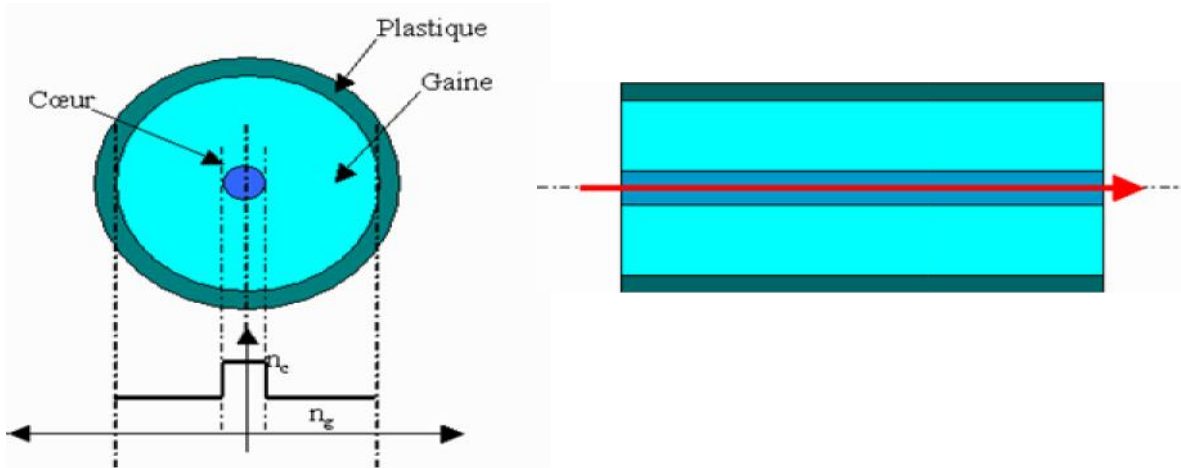
Avec

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 le diamètre d suffisamment faible, il y a possibilité d'avoir un seul mode de propagation (m=1 dans fibre monomode). Le chemin de propagation est ainsi unique et parallèle à l'axe de la fibre Figure (II.10). 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 multi-modes.



Figure(II.10) : Section et profil d'indice d'une fibre monomode chemin optique emprunté par les rayons lumineux est unique.

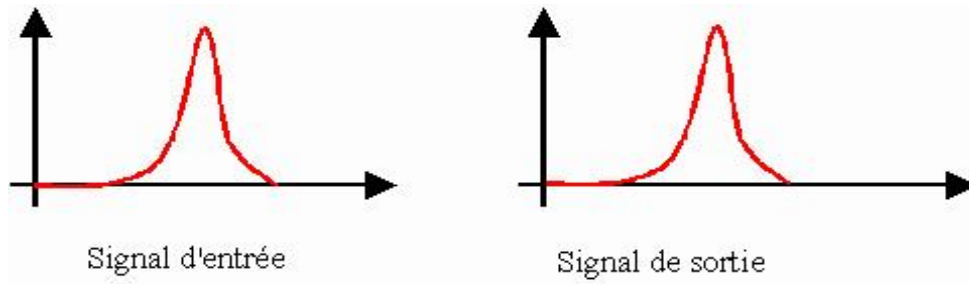


Figure (II.11): Etalement du signal optique dans une fibre monomode.

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 ($d \leq 10 \mu m$) nécessite une grande puissance d'émission, donc des diodes au laser qui sont relativement onéreuses.

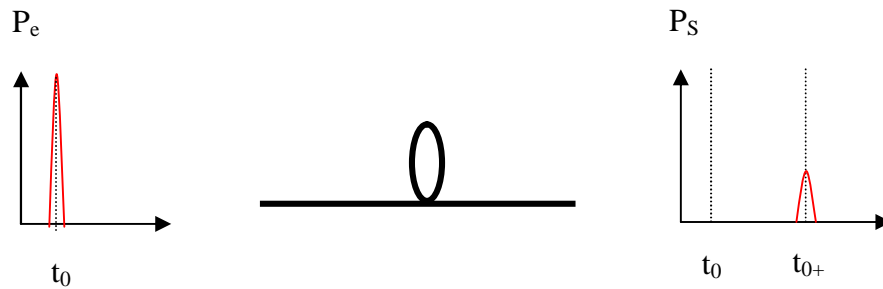
II.3 Caractéristiques de la fibre optique

La dégradation du signal dans la fibre optique est causée principalement par l'atténuation et la dispersion :

II.3.1 Atténuation

Lorsqu'on injecte, à l'entrée d'une fibre optique, une puissance P_e sous forme d'une onde électromagnétique, cette puissance décroît avec la longueur L de la fibre optique en fonction de son atténuation Γ . A la sortie, on récupère une puissance P_s . Figure(II.12) :

$$\alpha \text{ (dB)} = 10 \cdot \log(P_S / P_e) \quad (\text{II.5})$$



Figure(II.12) : Phénomène d'atténuation

II.3.1.1 Causes de l'atténuation

L'atténuation est l'une des principales contraintes de performance. Elle joue un rôle important dans la détermination de la distance maximale entre un émetteur et un récepteur. L'atténuation totale d'une fibre en silice provient de plusieurs origines :

a) Pertes par absorption moléculaires

Elles sont causées par l'absorption des rayons optiques par la silice et les impuretés contenues dans celle-ci.

b) Perte par diffusion RAYLEIGH

Elle est due aux fluctuations locales de l'indice de réfraction qui diffuse la lumière dans toutes les directions. Cette perte, étant intrinsèque à la fibre, détermine la limite ultime de perte dans une fibre. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\alpha_{Ray} = 10 \cdot \log [e^{Y_{RL}}] \quad (\text{II.6})$$

Y_R : Coefficient de diffusion de Rayleigh.

L : Longueur de milieu de propagation exprimé en mètres.

c) Pertes par micro-courbures

Elles sont dues principalement aux techniques de fabrication. Elles se traduisent par des irrégularités à l'interface cœur-gaine.

d) Pertes des courbures

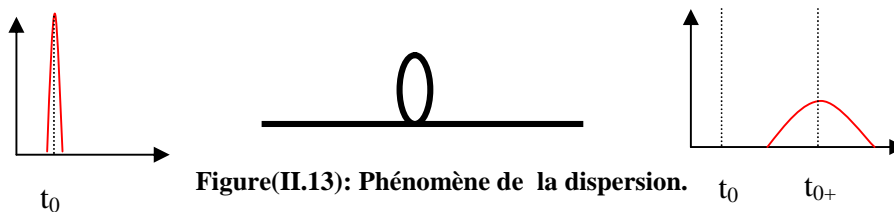
En générale, les fibres optiques sont fabriquées avec des longueurs de quelques kilomètres. Ces longueurs, souvent insuffisantes, conduisent à connecter deux fibres entre elles avec un minimum d'atténuation.

II.3.2 Dispersion

Le phénomène de la dispersion se traduit par un élargissement des impulsions au cœur de la fibre(II.13). Cet élargissement limite la bande passante du canal de fibre optique. Il existe deux types de dispersion :

La **dispersion chromatique** ou intra-modale résulte de la différence de vitesses de phase des différentes composantes spectrales des modes de propagation du signal de transmission.

La **dispersion intermodale** résulte de la différence des vitesses de groupe donc des temps de propagation de groupe des différentes modes qui se propagent dans la fibre multi-mode [11].



Figure(II.13): Phénomène de la dispersion.

II.4 Régénération du signal

En se propageant dans une fibre, un signal subit des détériorations dues aux distorsions d'amplitude (dues aux pertes) et aux distorsions de phase liées aux phénomènes de dispersion. Ces distorsions peuvent entraîner des erreurs lors de la détection et doivent être corrigées par une remise en forme périodique du signal (numérique) transmis.

II.4.1 Atténuation

L'affaiblissement du signal est corrigé par la disposition d'amplificateurs sur la ligne de transmission. Auparavant, l'amplification était faite par voie électronique. A partir des systèmes de télécommunication optique de quatrième génération, l'amplification se fait de façon optique grâce aux amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (EDFA).

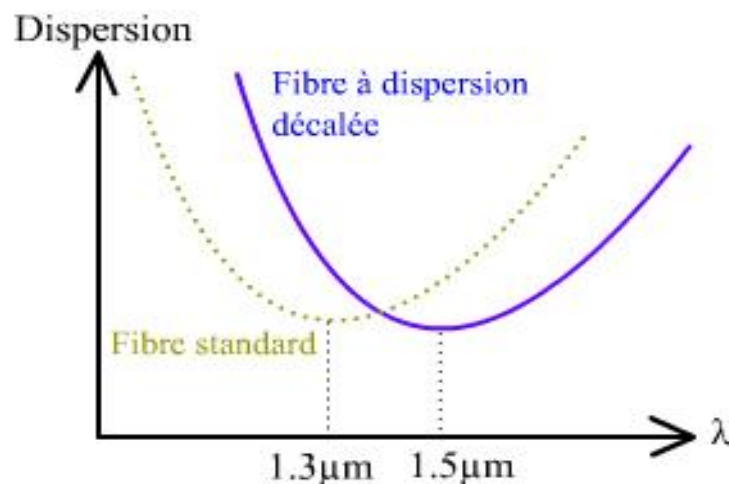
II.4.2 Dispersion

Les effets de la dispersion peuvent être minimisés en utilisant une fibre présentant une dispersion faible à la longueur d'onde d'utilisation, c'est à dire $1,55\mu\text{m}$ pour les systèmes de troisième génération. Il s'agit des fibres à dispersion décalée (figure I.14). Néanmoins, il est possible d'éliminer les effets de la dispersion en utilisant une fibre à compensation de dispersion que l'on ajoute à la liaison initiale. Cette fibre doit posséder un coefficient de dispersion de signe opposé à ce celui de la fibre initiale.

Si L_1 est la longueur de la fibre standard initiale dont le coefficient de dispersion est D_1 et L_2 la longueur de la fibre à compensation de dispersion dont le coefficient de dispersion est D_2 , si l'on satisfait la relation suivante :

$$L_1 D_1 + L_2 D_2 = 0 \quad (\text{II.7})$$

Alors la dispersion totale est nulle et les impulsions en sortie de fibre sont identiques aux impulsions émises à l'entrée du canal. [12]



Figure(II.14):Le minimum de dispersion est à $1,3\mu\text{m}$ pour une fibre standard, il passe à $1,5\mu\text{m}$ pour une fibre à dispersion décalée.

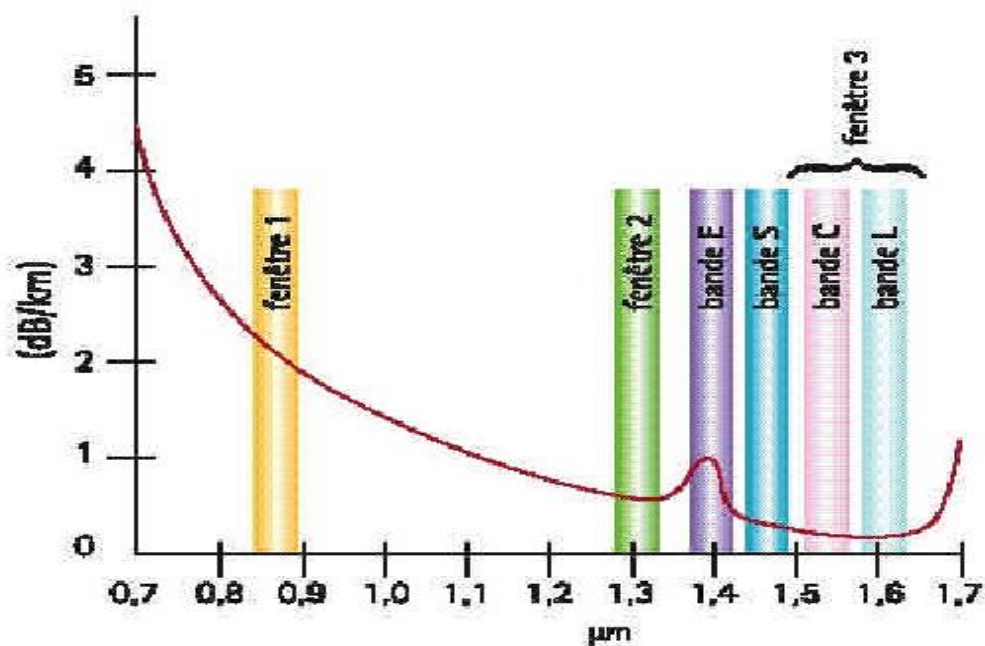
II.5 L'effet Kerr

L'effet Kerr est dû à la variation de l'indice de réfraction de la silice en fonction de l'intensité optique. L'effet Kerr traduit la dépendance de l'indice de réfraction n de la silice en fonction de l'intensité du champ.

II.6 Les fenêtres de transmission

On transmission optique on définit 3 fenêtres de transmission Figure(II.15).

- Les fenêtres 1 et 2 résultent d'un compromis techno-économique entre l'atténuation apportée par la fibre et les composants optoélectroniques utilisés en fonction des applications.
- La fenêtre 3 correspond à l'atténuation minimale mais exige des composants électroniques très performants, elle est réservée aux applications à haut débit et longues distances



Figure(II.15) : Bandes des longueurs d'ondes utilisées dans les fibres

II.6.1 La fibre en télécom

II.6.2 Utilisation des différents types des fibres optiques

Fibre monomode	Fibre multi-mode
Faible dispersion	Forte dispersion
Connexion délicate	Connexion facile
Faible atténuation	Forte atténuation
Hauts débits, longues distances	Réseaux locaux

II.6.3 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 où la fibre optique est notamment utilisée :
 - En chirurgie, pour transporter le faisceau laser jusqu'au tissus à traiter.
 - En endoscopie, pour éclairer l'intérieur du corps et retransmettre 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).

II.7 Les avantages et les inconvénients des fibres optiques

a) Les avantages de la fibre optique

Ils sont nombreux et on peut les classer comme suit :

- ✚ Performances de transmissions : très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible de plusieurs signaux et de plusieurs utilisateurs, elles permettent que les systèmes aient une portée et une capacité très supérieure à celles des câbles classique à base de conducteurs.
- ✚ Avantages de mise en œuvre : très petite taille, grande souplesse, faible poids appréciables aussi bien en télécommunications que pour le câblage en informatique, aéronautique, application industrielle.
- ✚ 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.
- ✚ Avantages économique : contrairement à l'idée encore répandue, le coût global d'un système sur fibres optiques et de plus en plus souvent inférieur à celui d'un système sur cuivre.

b) Les 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 se protéger les yeux.
- ✚ Il est indispensable de porter des verres de protection infrarouge pour travailler de près sur un dispositif en fonctionnement.
- ✚ Pertes de Raccordement entre différents composants optiques du système. Parmi celles-ci, on trouve :
 - les 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.
 - les pertes d'épissure : elles sont dues à la discontinuité de rayon, à l'erreur d'espacement, à l'erreur d'excentricité, à l'erreur d'alignement angulaire.

II.8 Les amplificateurs optiques**II.8.1 Introduction**

Depuis la réalisation en 1970, des premières fibres optiques à faible pertes prédites par C.Kao et G.Hocham, et s'appuyant sur le développement des lasers et photodiodes à semi-conducteur, les télécommunications optiques ont pu progresser selon une « loi de Moore optique » à la fin des années 80. L'état de l'art permettait de transmettre un débit de 1Gbit/s sur une centaine de kilomètres de fibre. Mais un obstacle majeur se dressait sur la route : à cause de l'atténuation de la fibre, la nécessité de régénérer périodiquement les signaux par une conversion optique/électrique/optique, aussi complexe que limitée en bande passante.

C'est autour de cette période que des chercheurs proposent et explorent une approche révolutionnaire : régénérer les signaux au cœur même de la fibre, au moyen de l'amplification optique par émission stimulée. Avec une bande passante supérieure à 10000GHz, l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) permet de régénérer simultanément dans la fibre des signaux transmis à différentes longueurs d'onde, sans aucune interférence mutuelle.

Les réseaux télécom connaissent alors une véritable révolution en terme de la bande passante de la fibre, de portée globale (>10000Km sans électronique !). Les câbles transocéaniques véhiculent des trafics de données allant jusqu'à 10000G bit/s par simple fibre, l'équivalent de 250 DVD simultanés. A ce jour, le trafic internet annuel est estimé à 50 exabyte.

Dans ce monde physique, la route << toile >> www est constituée par le maillage, et dont l'essentiel du trafic est optiquement régénéré par l'amplificateur EDFA.

II.8.2 L'amplification en ligne des systèmes de communication optique

Un des souhaits d'un concepteur de systèmes de transmission est de pouvoir allonger au maximum la distance séparant un émetteur optique du récepteur optique. La technologie a évolué dans cette direction en passant de la fibre multi-mode à la fibre monomode, supprimant ainsi la dispersion intermodale et en passant de la longueur d'onde de 1330 nm à 1550 nm, minimisant ainsi l'atténuation. Celle-ci demeure pourtant la première limitation des liaisons à longue distance.

Dès lors que la distance sur laquelle on doit transmettre devient supérieure à la portée du système, on est obligé d'utiliser des répéteurs régénérateurs optoélectroniques qui convertissent le signal optique en signal électrique, le régénèrent et le convertissent à nouveau en signal optique en vue de le transmettre vers un autre répéteur ou terminal de ligne.

Le régénérateur optoélectronique comprend un laser, une photodiode et un grand nombre de circuits intégrés.

Tous ces composants, devant fonctionner à grands débits, sont chers, complexes, délicats à réaliser et à interfacer. Malgré les progrès incontestables de l'électronique à large bande, il y a lieu de penser que le développement de ce type de régénérateurs à des débits supérieurs à 2.5 Gbits/s sera coûteux. Pourtant, les besoins en débit ne cessent d'augmenter. Cette course à la capacité semble devoir se ralentir pour des raisons technologiques liées à la faisabilité des régénérateurs optoélectroniques; d'où le grand engouement vers les systèmes non régénérés avec l'utilisation de l'amplification optique.

II.8.3 Intérêt de l'amplificateur optique

L'amplificateur optique est un composant qui assure l'amplification du signal tout en restant dans le domaine optique. Deux types d'amplificateurs optiques ont aujourd'hui des applications clairement identifiées : l'amplificateur optique à semi-conducteurs et l'amplificateur optique à fibre dopée (EDFA par exemple). Ces deux types d'amplificateurs optiques fonctionnent, quelque peu, sous le même principe physique : un faisceau lumineux incident est amplifié grâce à un apport extérieur d'énergie appelé pompage.

L'amplificateur optique présente de nombreux intérêts qualitatifs par rapport au répéteur régénérateur qui doit être conçu pour un débit bien spécifique. En effet, dans un amplificateur optique, la bande passante n'est plus limitée par l'électronique et peut atteindre plusieurs centaines de gigahertz. L'amplificateur optique offre l'avantage d'amplifier les signaux dont la longueur d'onde incidente correspond à la plage des longueurs d'onde, peuvent être amplifiés par celui-ci sans tenir compte du débit de transmission et du format de modulation utilisé. Cependant, l'amplificateur optique ne régénère pas le signal et n'effectue pas non plus la mise en forme du signal à amplifier. Il amplifie le signal au même titre que son bruit. L'amplification optique peut avoir lieu en trois points d'une liaison qui correspondent aux applications principales d'un amplificateur optique comme indiqué à la figure (II.16).

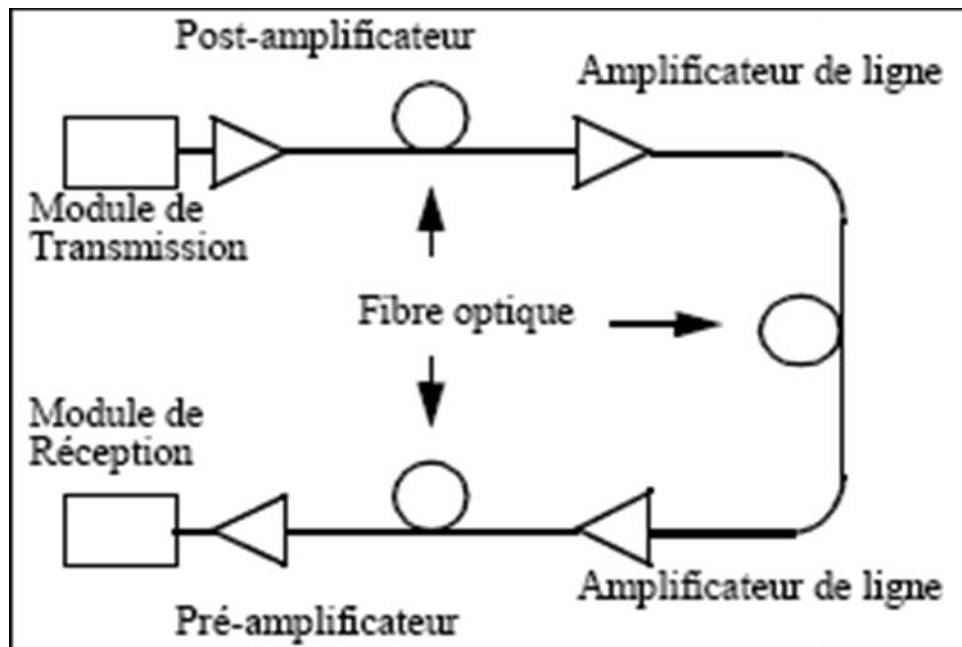


Figure (II.16) : Applications de l'amplificateur optique.

L'objectif des études de système de transmission est l'identification des points de fonctionnement possibles pour le débit à transmettre et la longueur de la liaison. Le post-amplificateur placé à la sortie du module de transmission a pour rôle d'augmenter la puissance de sortie de l'émetteur et donc d'accroître d'autant de la liaison. Les amplificateurs en ligne ont pour fonction de compenser l'atténuation du signal par la fibre et les différentes pertes du canal optique. Le préamplificateur situé à l'entrée du module de réception permet d'augmenter en même temps la sensibilité du récepteur et. Ici la minimisation du facteur de bruit est très recherchée.

II.8.4 Caractéristiques des Amplificateurs optiques à Fibre optique dopée à l'Erbium (EDFA)

Le milieu amplificateur est constitué par le cœur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terre rare. Pour l'amplification autour de 1550 nm, fenêtre de faible atténuation des fibres optiques à base de silice. Les dopants sont des ions E_r^{3+} (cations). Le pompage est réalisé optiquement par couplage dans la fibre optique d'un flux lumineux puissant provenant d'une diode laser de pompe. Les longueurs d'onde de pompe sont celles qui permettent les transitions vers les états excités de l'erbium. Les longueurs d'onde 980nm et 1480 nm sont les mieux adaptées au pompage optique. De plus, les diodes lasers à ces longueurs d'onde sont disponibles sur le marché. La comparaison de leur intérêt respectif montre que le pompage à 980 nm permet une inversion de population maximale et introduit un minimum de bruit, tandis que le pompage à 1480 nm est aujourd'hui le mieux maîtrisé avec des puissances élevées de pompage et de saturation.

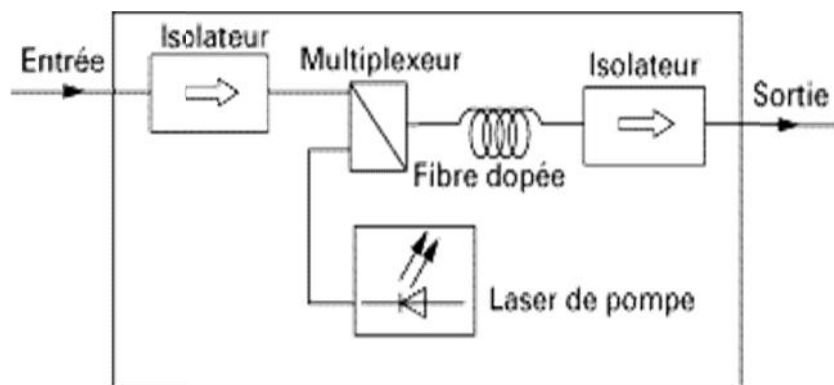


Figure (II.17) : Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec pompage optique

La figure (II.17) illustre l'exemple de configuration de ce type d'amplificateur. L'EDFA consiste en un morceau de fibre optique monomode dopée, de longueur d'environ 10 - 20 m et d'un laser de pompe. La lumière provenant de la pompe excite les ions E_r^{3+} au niveau d'énergie supérieur, ce qui permet de réaliser l'inversion de population. Le multiplexeur optique sélectif en longueur d'onde effectue le couplage dans la fibre dopée à l'erbium du signal à transmettre et du signal de pompe. Celui-ci doit présenter une perte d'insertion faible aux deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. Les isolateurs optiques permettent d'éviter les oscillations et d'assurer la stabilité des caractéristiques de gain en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de réflexion (retour vers l'aval). Le signal de pompe peut être couplé dans la fibre en Co-propagation ou en contre-propagation.

La figure (II.18) met en évidence une large bande passante permettant une amplification simultanée de plusieurs signaux multiplexés en longueur d'onde (WDM). Le multiplexage en longueur d'onde permettra d'augmenter la capacité sans rendre le système plus complexe. La transmission d'impulsions de type soliton est une alternative permettant d'éviter la déformation des signaux le long de la ligne.

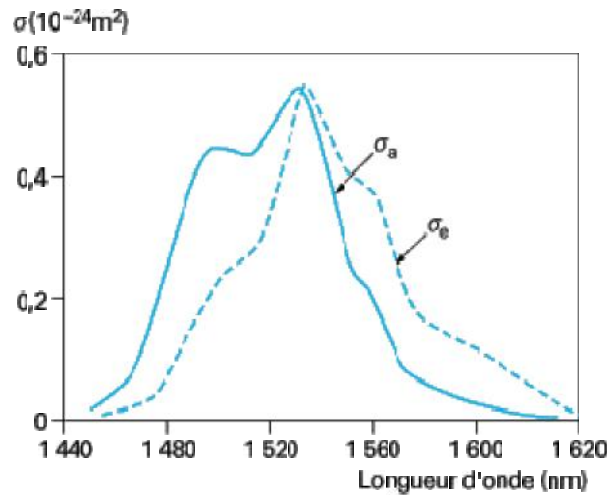


Figure (II.18) : Sections efficaces d'émission et d'absorption de l'ion erbium dans une matrice de verre fluoré

Une courbe caractéristique de gain en fonction de la puissance d'entrée est illustrée par la figure (II.19). Pour les faibles puissances d'entrée, le gain est constant et le régime de fonctionnement est linéaire : on parle alors de gain en petit signal. À forte puissance, l'amplificateur commence à saturer, c'est-à-dire que la puissance de sortie augmente de moins en moins avec la puissance d'entrée et tend vers une valeur asymptotique. La saturation d'un amplificateur optique est produite par la diminution de l'inversion de population : il y a de moins en moins d'ions excités.

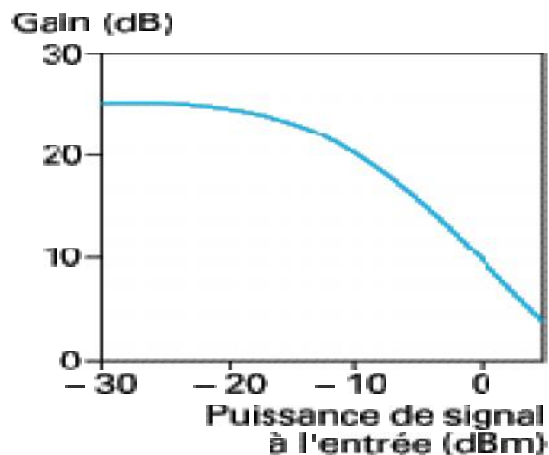


Figure (II.19) : Gain en fonction de la puissance de signal entrant dans un amplificateur optique

II.8.5 Caractéristiques des amplificateurs optiques à semi-conducteurs

En principe, tout laser à semi-conducteur peut servir d'amplificateur optique. Il suffit de supprimer les miroirs et d'y injecter de la lumière d'une source externe comme dans l'amplificateur à fibre. Les travaux sur l'amplification optique à semi-conducteur datent d'au moins une quinzaine d'années. Ils sont mis à profit depuis longtemps dans le domaine des lasers de puissance. Les applications couvrent une gamme de longueurs d'onde assez étendue, incluant 1330 et 1550 nm.

En pratique, les amplificateurs optiques à semi-conducteurs souffrent des problèmes sérieux qui constituent leurs limites pour certaines applications. Ils permettent d'obtenir un gain élevé jusqu'à 30 dB selon le semi-conducteur, la longueur d'onde du signal amplifié et le courant de polarisation et ce, sur une large bande passante (30 - 50 nm).

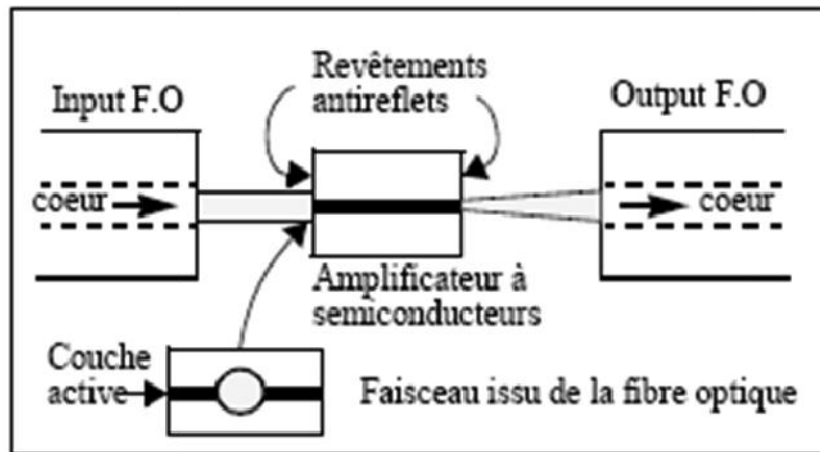
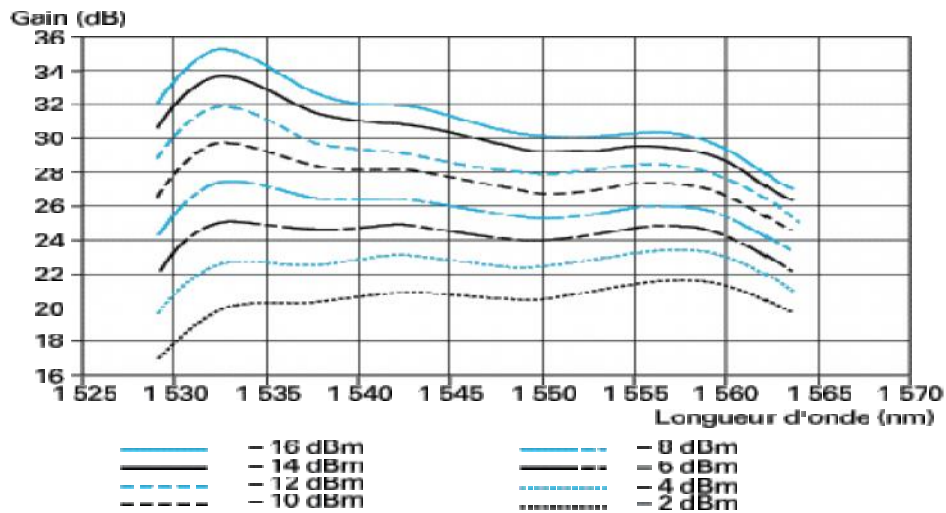


Figure (II.20) : Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteurs.

La figure (II.20) représente une configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur. Les deux facettes de l'amplificateur sont recouvertes d'un revêtement antireflet afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit intégré. La lumière incidente entrant dans le circuit est amplifiée et sort par l'autre bout pour être couplée dans la fibre optique. Idéalement, il n'y a pas de réflexion du signal vers l'amplificateur. Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont très élevées, car le diamètre du faisceau est supérieur à l'épaisseur de la couche active. En plus, le gain de l'amplificateur dépend de la polarisation de la lumière incidente.

Le gain est aussi simulé en fonction de la puissance du signal d'entrée variant de -16 dBm à -2 dBm Figure (II.21). On remarque une bonne sensibilité du gain aux faibles puissances

du signal incident. Le gain est presque constant pour les faibles puissances traversant l'amplificateur.



Figure(II.21) : Spectre du gain d'un amplificateur optique pour différentes puissances du signal entrant

II.8.6 Comparaison entre les deux méthodes

Les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium (EDFA) fonctionnent mieux que leurs homologues à semi-conducteurs et présentent plusieurs caractéristiques qui les rendent plus attrayants quant à leur utilisation dans les systèmes de transmission optique à grandes distances et à débits élevés. Ils introduisent de faibles pertes d'insertion et ils ont une très faible distorsion du signal. En effet, le signal à l'entrée est presque similaire à celui qui en sort. La diaphonie et le bruit sont faibles et sont de plus insensibles à la polarisation de la lumière incidente. La supériorité du gain et de la puissance de saturation, les faibles pertes d'insertion et la réduction du facteur de bruit conduisent à préférer les amplificateurs EDFA aux amplificateurs optiques à semi-conducteurs pour les applications de post-amplification, d'amplification en ligne et de pré-amplification. Cependant, les EDFAs sont limités à l'amplification du signal autour de 1550 nm, ce qui constitue leur principale limitation intrinsèque. Les amplificateurs à semi-conducteurs présentent quant à eux l'avantage d'amplifier des signaux sur une plus grande gamme de fréquences. De plus, les amplificateurs à semi-conducteurs se prêtent à l'intégration monolithique, ce qui est difficilement réalisable avec les EDFAs.

II.9 Bruit des amplificateurs optiques

Les limites des systèmes non régénérés à grandes distances sont imposées par le bruit, la puissance de saturation des amplificateurs optiques et par les phénomènes non linéaires inhérents à la propagation dans la fibre.

L'augmentation du débit binaire entraîne une dégradation du rapport signal sur bruit (SNR), Cette augmentation de débit accroît en outre l'influence des phénomènes non linéaires. Ces derniers sont principalement dus à l'effet Kerr du fait de la réduction de la durée de l'intervalle de temps binaire et de l'encombrement spectrale du signal.

Le passage de la longueur d'onde 1330 nm correspondant au zéro de dispersion à 1550 nm où le coefficient de dispersion est d'environ 18 ps/km.nm est un autre facteur limitatif surtout à de grandes distances ou même à des débits élevés. Les nouveaux systèmes de communication optique devant être réalisés à cette longueur d'onde, la compensation de la dispersion constitue une étape importante à franchir.

L'émission stimulée est à l'origine de l'amplification optique d'un faisceau de photons incidents. Quant à l'émission spontanée, elle peut être amplifiée à son tour par l'émission stimulée: il s'agit alors d'émission spontanée amplifiée (ASE), à l'origine du bruit des amplificateurs optiques. Ce bruit est caractérisé par sa densité spectrale de puissance est donnée par :

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

Avec :

$H\nu_s$: énergie du photon

h : constante de Planck

ν_s : fréquence optique

G : gain en puissance

Contrairement à l'émission spontanée, l'ASE dépend de la longueur d'onde et de la puissance de pompe injectée dans la fibre. Elle se comporte comme un bruit vis à vis du signal utile. Ce bruit est un facteur qui limite la mise en cascade des amplificateurs optiques puisqu'à chaque étage d'amplification. Outre cela, le bruit local s'ajoute au bruit amplifié créé par l'étage précédent. L'ASE accumulée est proportionnelle au gain de chaque amplificateur et à leur nombre. Son spectre est celui de l'émission spontanée modifiée par le profil de gain de la chaîne amplificatrice.

II.10 Conclusion

En plus des avantages qualitatifs des amplificateurs optiques (OAs), par rapport aux répéteurs régénérateurs constitués d'un grand nombre de composants électroniques, ceux-ci

permettent de réduire le coût global des installations, car le coût de maintenance est réduit par la diminution du nombre d'éléments. L'augmentation de la puissance d'émission grâce à l'emploi du post-amplificateur renforcée par l'utilisation du préamplificateur engendre un accroissement de la portée possible des systèmes non régénérés. L'utilisation de la fibre à dispersion décalée (recommandation G.653 de l'UIT-T) présente l'avantage de repousser la limitation due à la dispersion chromatique. Les amplificateurs optiques s'adaptent à l'évolution du réseau vers les hauts débits jusqu'à quelques dizaines de Gbits/s.

Chapitre III

Récepteur optique et ses bruits : photodiode

III.1 Introduction

Les systèmes de transmission par fibre optique nécessitent des récepteurs optiques devant remplir certains critères :

- Une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement.
- Une grande bande passante (réponse à grande vitesse).
- Bruit minimum (courant d'obscurité le plus faible possible).
- Bonne stabilité en température.
- Faible coût.

De nombreux efforts ont été fournis pour rendre les modules de réception de plus en plus performants. Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels. On y retrouve trois parties :

- Le bloc de '**premier étage**' composé du photo-détecteur. Il peut être accompagné d'un préamplificateur, qui a pour but de rendre le photo-courant généré suffisamment important malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photo-détecteur.
- Le bloc '**linéaire**', composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre, réducteur de bruit.
- Le bloc '**recupération des données**', correspondant au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme, appelé également circuit de synchronisation.

III.2 Le photo-détecteur

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir (ou traduire) le signal lumineux (ou optique) en signal électrique, en le dégradant le moins possible. Ce rôle est tenu par le photo-détecteur. Pour simplifier, ce dernier se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. 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 à 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 photo-détecteurs à semi-conducteur. Bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles, ces derniers présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser. Dans ce paragraphe, nous rappellerons le principe de la photo-détection avant d'étudier plus précisément des exemples de photo-détecteurs : la photodiode PIN et la photodiode à avalanche (PDA).

III.3 Caractéristiques d'une photo-détection

Tout photon ne subira pas automatiquement la photo-détection. Tout d'abord, il doit posséder une énergie E_{PHOTON} suffisante 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. Cette longueur d'onde (λ_c) est déterminée par l'énergie de bande interdite E_g du semi-conducteur selon la relation suivante :

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

Le coefficient d'absorption du semi-conducteur est donc un facteur qui va déterminer le rendement du photo-détecteur.

III.3.1 Le coefficient d'absorption

Dans le domaine de l'optoélectronique, un paramètre essentiel à la compréhension des phénomènes de générations/recombinaison des 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, est le coefficient d'absorption est très faible.

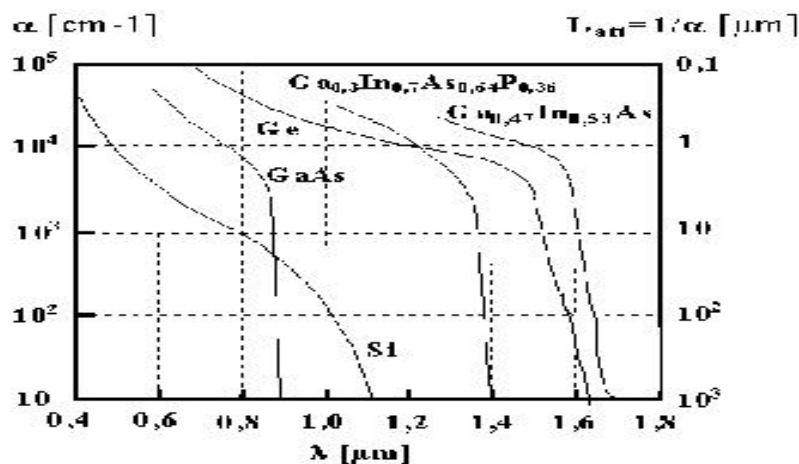
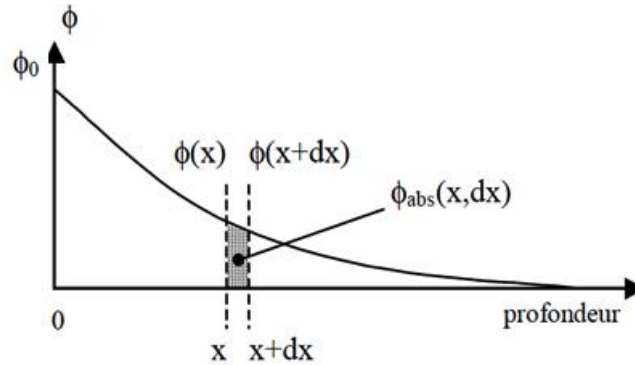


Figure (III.1) : Coefficient et longueur d'absorption des matériaux semi-conducteurs.

Avec $\text{GaInAsP} = \text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.7}\text{As}_{0.64}\text{P}_{0.36}$ et $\text{GaInAs} = \text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.47}\text{As}_{0.53}$.

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



Figure(III.2) : Absorption de la lumière dans un matériau

Le coefficient d'absorption en fonction de la profondeur de matériau, représente la fraction du flux lumineux par le semi-conducteur, par unité de profondeur (mètre).

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

Avec :

$\Phi(x)$: Flux lumineux présent à une profondeur x ($\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

Φ_0 : Flux lumineux sous la surface ($x=0$) ($\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

α : Le coefficient d'absorption de la lumière (m^{-1})

Donc l'absorption de la lumière suit une loi exponentielle

III.3.2 Le rendement quantique

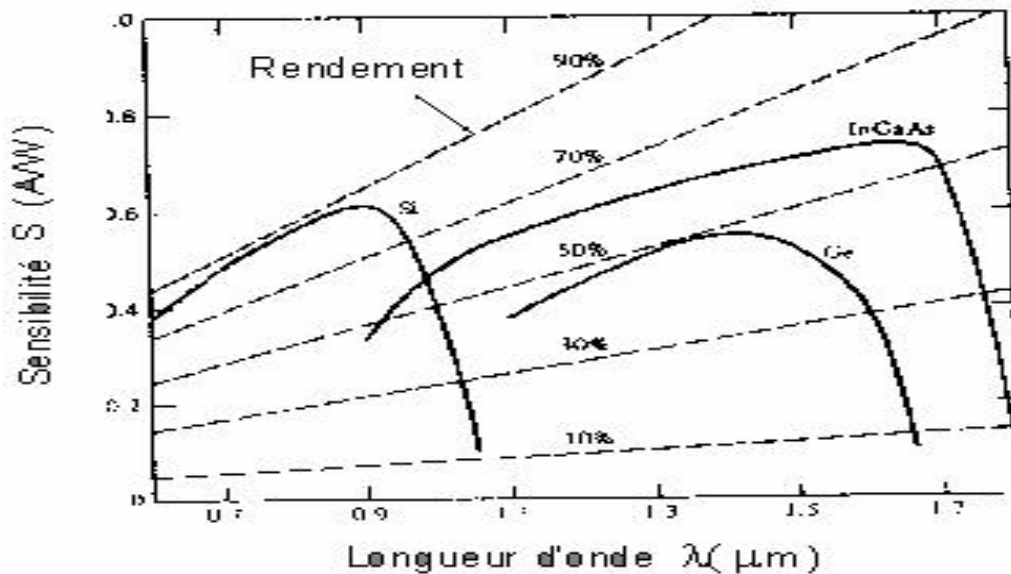
Le rendement quantique (η) qui est le rapport du nombre de paires de porteurs photo-générés et collectés au nombre de photons incidents. Il ne peut être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante figure (III.3).

$$\eta = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/h\nu} = \frac{h\nu}{e} \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \quad (\text{III.2})$$

III.3.3 La sensibilité

La sensibilité $S(\lambda)$ de la photodiode exprimée en ampères par watt et définissant le rapport de photo-courant I_{ph} au flux énergétique (puissance optique P_{opt}) reçue. Ces grandeurs sont reliées par les relations suivantes, avec « e » représentant la charge élémentaire de l'électron, h la constante de Planck, λ la longueur d'onde et c la vitesse de la lumière (célérité):

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



Figure(III.3) : Courbes de sensibilité et de rendement selon les longueurs d'onde pour divers matériaux. [13]

En tenant compte des figures (III.1) et (III.3), on observe que la sensibilité $S(\lambda)$ 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 est plutôt employé dans le domaine du visible alors que les composés ternaires comme le GaInAs sont utilisés dans les transmissions par fibre optique dans le domaine IR (infra rouge).

III.3.4 Temps de réponse

Compte tenu de la double origine du photo-courant, le temps de réponse de la photodiode est conditionné d'une part par la diffusion des photo-porteurs minoritaires des régions neutres vers la zone de charge d'espace, et d'autre part par le temps de transit des

porteurs à travers la zone de charge d'espace. Le premier phénomène est relativement lent et se traduit par une constante de temps de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-9} s. Quant au second phénomène, il peut être très rapide si la tension de polarisation inverse de la diode est importante. Dans ce cas, les porteurs traversent la zone de charge (ZCE).

Pour diminuer au maximum la constante de temps de la photodiode, on a donc intérêt à ce que le rayonnement soit essentiellement absorbé dans la zone de charge d'espace de la jonction, où il crée le courant de génération. On réalisera donc une photodiode avec une zone frontale aussi mince que possible et une zone de charge d'espace « W » suffisamment épaisse pour absorber la majeure partie du rayonnement. On limitera toutefois W à une valeur qui n'augmente pas trop le rapport W/v_s . On choisira $W \sim 1/\lambda$ [1]

III.4 Coefficient de Réflexion

Les photons transmis par la fibre, dans le milieu d'indice de réfraction n_1 , traversent un milieu d'indice n_2 (par exemple air) avant d'atteindre la surface du détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur d'indice de réfraction n_3 . Si leur direction de propagation est perpendiculaire à cette surface ou s'écarte peu de la normale, et si aucune précaution particulière n'est prise pour minimiser les réflexions aux surfaces des deux dioptries (n_1-n_2 et n_2-n_3), un certain nombre d'entre eux sont réfléchis et ne pénètrent pas dans le détecteur. Le coefficient de réflexion, (par exemple entre les milieux d'indice n_2 et n_3), rapport entre les puissances optiques réfléchie $P_{opt,r}$, et incidente $P_{opt,i}$, peut être calculé de la relation de Fersnel [4] :

$$R = \frac{P_{opt,r}}{P_{opt,i}} = \left(\frac{n_3 - n_2}{n_3 + n_2} \right)^2 \quad (\text{III.4})$$

III.5 Choix du matériau

Ce sont les performances des fibres optiques dans la fenêtre $1,3 \mu\text{m}$ - $1,55 \mu\text{m}$ qui justifient l'énorme effort de recherche consenti depuis plusieurs années pour développer des diodes laser, des modulateurs et des photo-détecteurs pour cette gamme de longueur d'onde.

En ce qui concerne le photo-détecteur, le choix du matériau est d'abord dicté par le seuil de détection « $h\nu$ » qui est défini comme la longueur au-delà de laquelle l'absorption de la lumière devient très faible. Ce seuil de détection est déterminé par la largeur de bande interdite E_g du matériau [14] :

$$\lambda_s = \frac{1,24}{E_g [eV]} \quad (\text{III.5})$$

III.6 Les différents types des photo-détecteurs

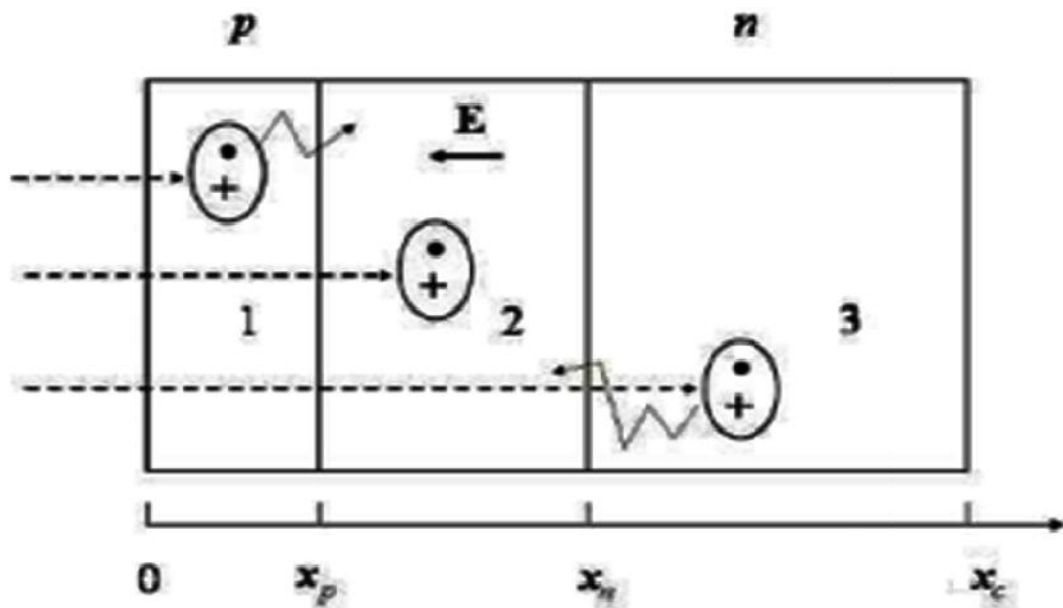
Dans cette partie nous présentons brièvement les différents types de photo-détecteurs ainsi que les principales notions physiques à l'origine de leur fonctionnement :

III.6.1 Cellule photovoltaïque -La photodiode

Les photodiodes sont des composants semi-conducteurs photo-détecteurs (ou transducteurs). Les photodiodes absorbent les photons et génèrent dans un circuit externe, un flux de courant proportionnel à la puissance optique incidente. Les photodiodes peuvent être employées pour détecter la présence ou l'absence de quantités lumineuses très faibles et peuvent être calibrées pour des mesures extrêmement précises d'intensités en-dessous du pW/cm^2 mais aussi des intensités au-dessus $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$.

Une photodiode est formée par une simple jonction P-N photo-réceptrice généralement non amplificatrice. Mais dans certaines conditions une amplification interne peut se produire. Lorsque les photons, pénétrant dans le semi-conducteur, pourvu qu'ils aient une énergie suffisante, peuvent créer des photo- porteurs en excès dans les matériaux. Ces photo- porteurs sont des paires d'électrons trous. Chaque paire créée se traduit par la circulation dans le circuit extérieur d'une charge élémentaire. On observe ainsi une augmentation du courant. Vu que les photo- courants créés sont très faibles, il faut que la jonction soit polarisée en inverse, d'une part pour éviter le courant en direct de la photodiode qui est beaucoup plus important que le photo-courant et d'autre part pour augmenter son rendement.

Le courant inverse d'une jonction PN est fonction d'une part des densités de porteurs minoritaires dans les régions neutres de la diode, et d'autre part de la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace. Dans une photodiode, le rayonnement augmente le courant inverse par la création de porteurs minoritaires dans les régions neutres et la génération de paires électrons-trous dans la zone de charge d'espace (ZCE).

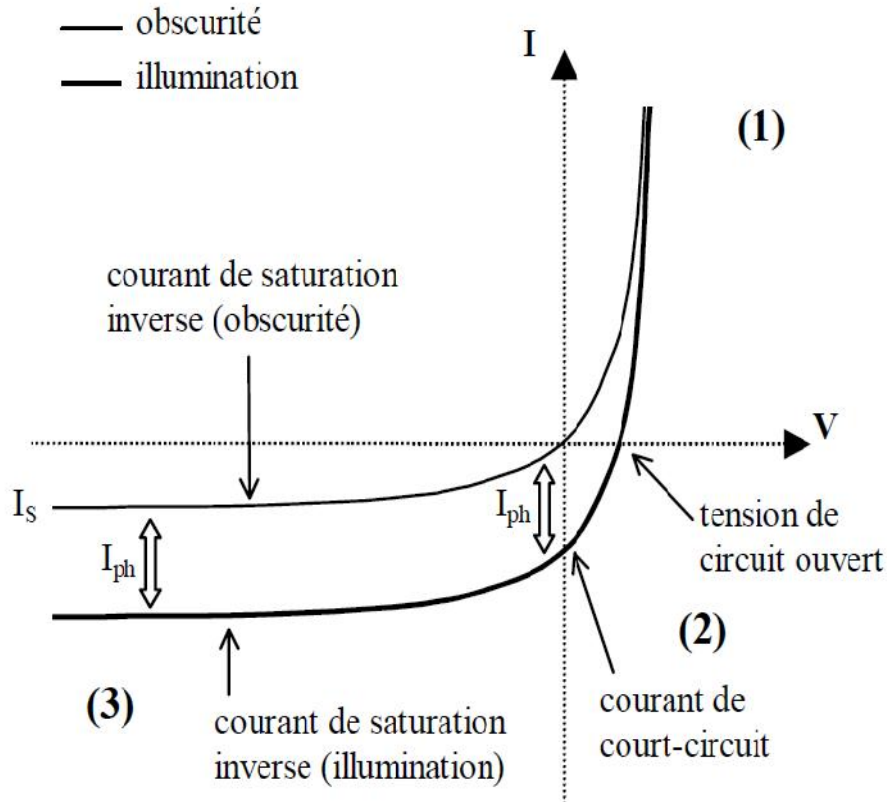


Figure(III.4) : principe de la photodiode

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la figure (III.4). Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions 1, 2 et 3. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les régions électriquement neutres P et N, les photo-porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace (ZCE) sont propulsés par le champ électrique intrinsèque vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion : ils créent un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique intrinsèque, l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération. Ces différentes contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant I qui contribue au courant inverse de la diode. La formule du photo-courant s'écrit [1] :

$$I = I_s (e^{V/kT} - 1) - I_{ph} \quad (\text{III.6})$$

La caractéristique de la photodiode est représentée sur la figure (III.6). Le photo-courant est pratiquement indépendant de la tension de polarisation. Dans la pratique, on mesure soit le courant de court-circuit (I_{CC}), soit la tension en circuit ouvert (V_{CO}).



Figure(III.5) : Courant d'une photodiode.

La diode est polarisée en inverse par une tension négative V_0 . Dans la mesure où $(-V) \gg kT/e$, l'expression (III.6) s'écrit :

$$I = - (I_s + I_{ph}) \quad (III.7)$$

Dans la pratique I_s est très inférieur à I_{ph} de sorte que le courant mesuré est égal au photo-courant et par suite proportionnel au rayonnement incident. Dans le mode photovoltaïque la diode est connectée aux bornes d'un voltmètre, le courant est alors nul et $V = V_{ph}$ le photo-voltage. L'expression (III.3) donne alors :

$$V_{ph} = \frac{kT}{e} \ln (I_{ph}/ I_s + 1) \quad (III.8)$$

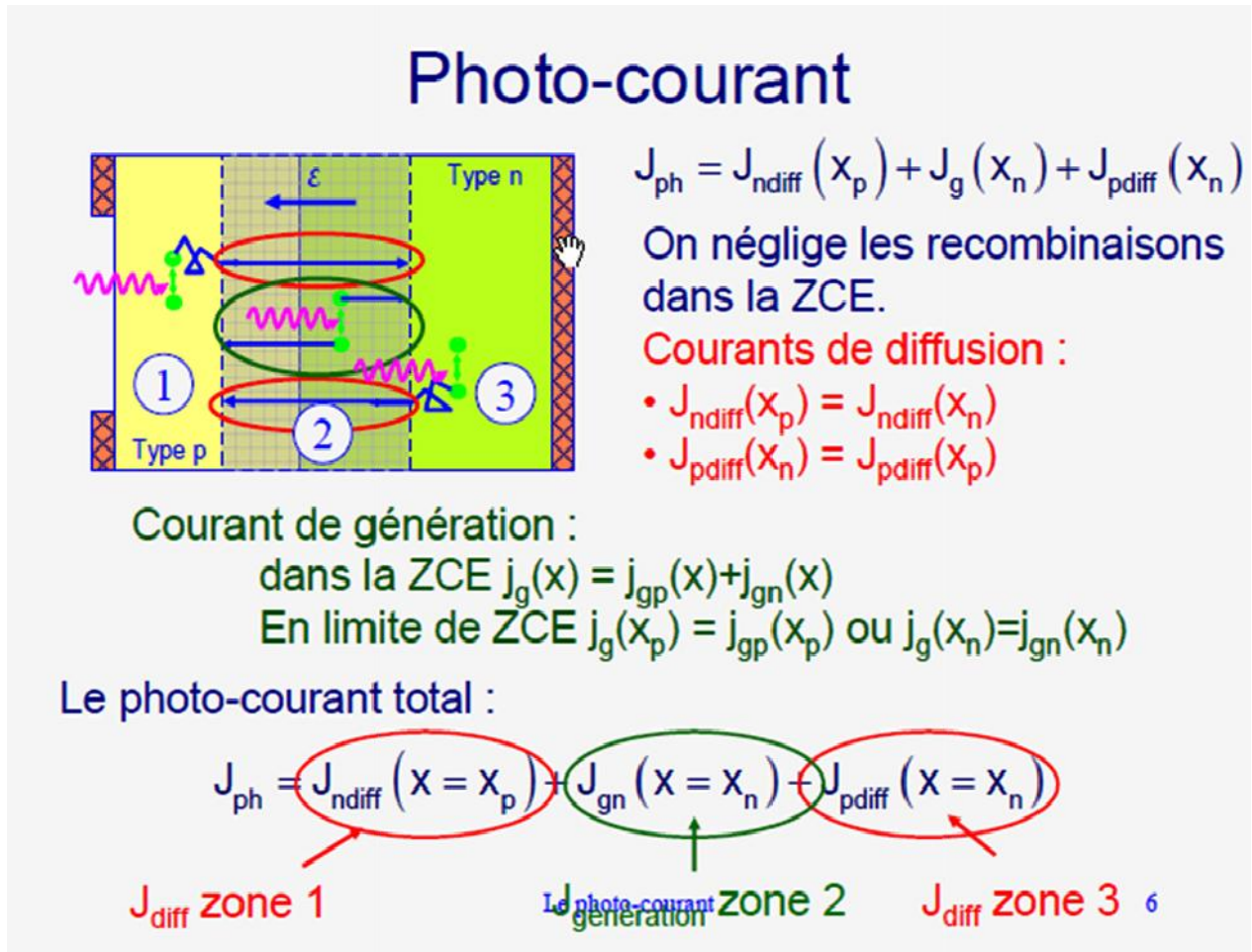
Le photo-voltage varie donc d'une manière logarithmique avec le photo-courant, et par voie de conséquence avec l'intensité de rayonnement.

III.6.2 Calcul du photo-courant [1]

Le photo-courant résultant est la somme de trois composantes, le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type p, le courant de photo-génération dans la zone de

charge d'espace et le courant de diffusion des trous de la région de type n. On obtient le photo-courant total en ajoutant ces trois composantes calculées en un même point, au point x par exemple, Figure (III.6), soit :

$$J_{ph} = J_{ndiff}(x = x_n) + J_g(x = x_n) + J_{pdiff}(x = x_n) \quad (III.9)$$



Figure(III.6) : Les courants dans une photodiode

III.6.1 Photodiode PIN

Pour effectuer la photo-détection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large. D'où l'intérêt de la photodiode PIN Figure (III.7).

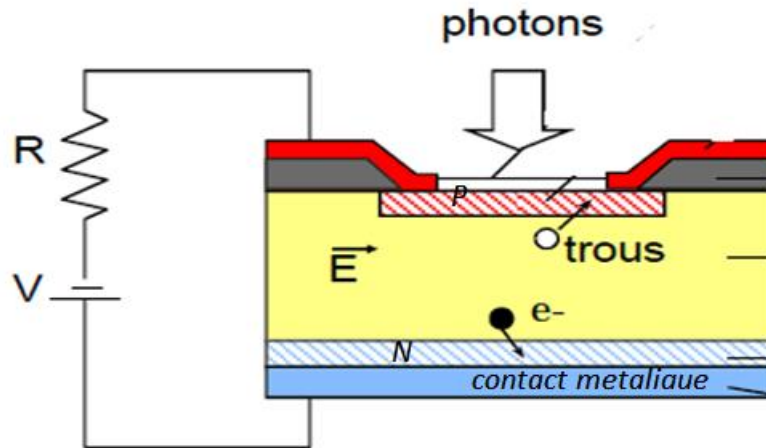


Figure (III.7) photodiode PIN

La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque (I), où règne le champ électrique pratiquement uniforme, qui sépare les porteurs. Une des zones traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau. Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode PIN sont la sensibilité, le courant d'obscurité, le temps de réponse. La sensibilité dépend du rendement, elle varie selon le coefficient d'absorption du matériau, et selon la largeur de la zone intrinsèque.

On peut relever un courant d'obscurité I_{obs} qui circule dans la jonction en l'absence de l'éclairement, ce courant ne provient donc pas des photons transmis de la fibre, Il peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite... L'expression du courant total dans la photodiode est donnée par l'équation suivante :

$$I_{ph} = S(\lambda) \cdot P_{opt} + I_{obs} \quad (III.10)$$

Le temps de réponse de la photodiode doit être très bref. Il est limité par deux facteurs. D'une part, la capacité de jonction est d'autant plus réduite que l'on élargit la zone d'absorption. D'autre part, le temps de transit diminue si on rétrécit cette zone. Un compromis est donc à trouver. On améliore le temps de réponse en augmentant la tension de polarisation inverse, ce qui réduit la capacité et le temps de transit. La longueur de la zone intrinsèque est optimisée afin de maximiser le rendement et le temps de réponse.[15]

III.6.2 Photodiode PDA (à avalanche) [16]

Afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, l'idée d'utiliser le phénomène de multiplication interne pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photoélectron, mais plusieurs, a été soulevée. Ceci a pour objectif d'augmenter la puissance du signal électrique correspondant à une même puissance optique incidente donnée.

En faisant croître le champ électrique dans la jonction PIN, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors et les porteurs se multiplient. Ce photo-détecteur à gain interne est appelé photodiode à avalanche ou PDA (en anglais APD). Le gain de multiplication par ionisation par impact, appelé aussi facteur de multiplication M , est le rapport entre le nombre moyen de porteurs secondaires créés par ionisation et le nombre de porteurs primaires provenant de la photo-détection. La valeur du courant relatif au nombre de photons absorbés devient [22]:

$$I_{PDA} = M(V) * S(\lambda) * P_{opt} \quad (III.11)$$

Le gain augmente avec la différence de potentiel appliquée, mais est limité à une valeur maximale. Si le champ devient trop fort, il y a risque de claquage. Cette valeur limite de tension dépend du matériau et de la structure utilisés.

Tout comme pour les photodiodes PIN, il existe plusieurs structures possibles. Voici à titre d'exemple le cas d'une structure dans le Silicium. Elle résulte d'un compromis entre une zone d'absorption large, et une jonction très abrupte pour obtenir un très fort champ électrique. C'est le principe de la structure **p π PN** Figure (III.8).

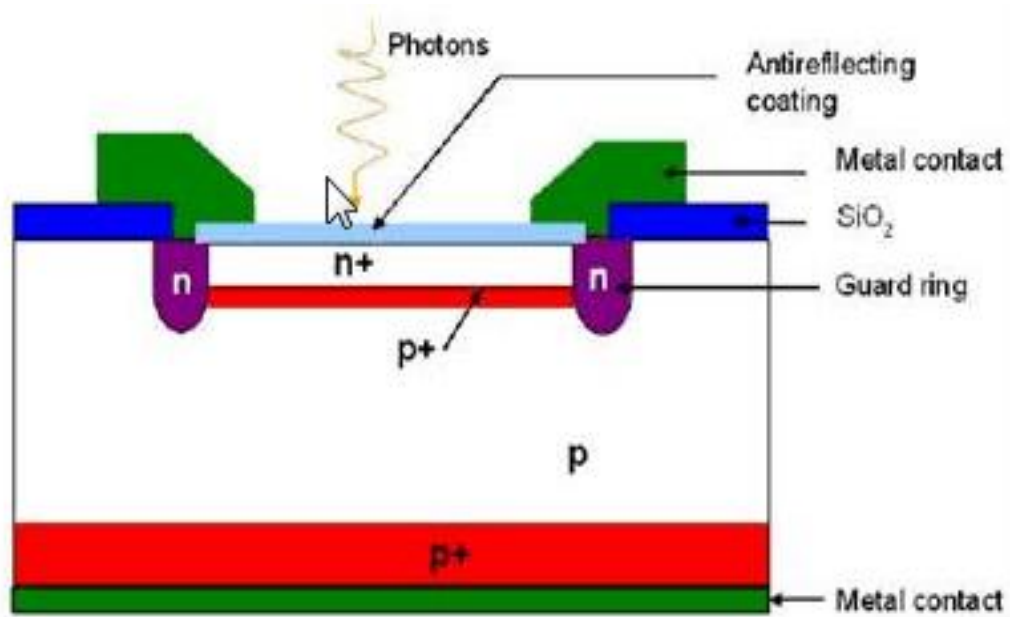


Figure (III.8) : Structure d'une photodiode à avalanche pπPN.

L'absorption a lieu dans une zone large et peu dopée, dite p et la multiplication a lieu dans la jonction abrupte pn+. En outre, pour une tension inverse élevée, la zone de charge d'espace s'étend dans la zone P, dont la résistivité va augmenter avec la tension. Ce principe introduit un effet stabilisateur : le champ électrique et le gain augmentent lentement, ce dernier peut atteindre de fortes valeurs tout en le commandant avec précision. Il est plus facile d'éviter le claquage.

Le courant d'obscurité observé (I_{obs}) est plus important dans une photodiode en régime d'avalanche, mais il reste en général inférieur au gain, M, multiplié par le courant d'obscurité non multiplié. En effet, toutes les composantes de celui-ci ne subissent pas le phénomène d'avalanche

Le courant débité par la PDA vaut :

$$I_{ph}' = M \cdot S \cdot P_{opt} + I_{obs}' \quad (III.12)$$

La rapidité est affectée par le phénomène d'avalanche. Elle est donc inférieure à celle des photodiodes PIN, à cause du temps de multiplication, mais reste élevée (de l'ordre de la nanoseconde).

III.6.3 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 de Schottky. Lorsque le rayonnement crée des paires électron-trou dans la zone de charge d'espace du semi-conducteur, la diode est le siège d'un photo-courant de génération analogue à celui de la photodiode à jonction PN.

L'avantage de la photodiode Schottky réside dans le fait que la couche métallique, si elle est suffisamment mince, est transparente au rayonnement dans le domaine du proche ultraviolet.

III.7 Détection

La détection directe est actuellement le mode de détection le plus courant en optique. Face à la plupart des signaux optiques, dont les spectres et dimensions sont plus ou moins étendus (c'est-à-dire à faible cohérence spatiale et temporelle), c'est le seul mode utilisable. D'autre part, c'est la technique de détection la plus simple à mettre en œuvre.

III.8 Bruit du photo-détecteur

Le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait, il est bruité. Apparaît entre autres le bruit quantique (encore appelé bruit photonique ou de grenaille ou bruit Schottky). Il provient du caractère aléatoire de la création des paires électron-trou. Ce bruit proportionnel à la puissance optique reçue par la photodiode est inévitable. L'expression de la variance du bruit quantique s'écrit sous la forme [18]:

$$\langle I_q^2 \rangle = 2 e S p_{opt} B \quad (\text{III.14})$$

Où e est la charge de l'électron ($e=1,6 \times 10^{-19}$), S la sensibilité de la photodiode, P_{opt} la puissance optique reçue par la photodiode et B la bande passante du signal.

Il est nécessaire de tenir compte aussi du bruit d'obscurité associé au courant d'obscurité.

La variance de ce bruit à pour expression [18]:

$$\langle I_{obs} \rangle = 2 e I_{obs} B \quad (\text{III.15})$$

Est présent également un bruit en $1/f$ (avec f la fréquence du signal) et un bruit thermique, provenant des circuits de polarisation du photorécepteur et notamment du préamplificateur.

Le bruit thermique a pour valeur :

$$\langle i_T^2(f) \rangle = \frac{4kT}{R} B \quad (\text{III.16})$$

(k étant la constante de Boltzmann, T la température et R la résistance du schéma équivalent aux circuits du photorécepteur).

Il est possible d'accroître la sensibilité d'une photodiode par un processus de multiplication interne à effet d'avalanche.

III.9 Conclusion

Les résultats précédents montrent que, lorsque l'on détecte un signal optique au moyen d'une photodiode PIN, le bruit thermique des circuits de charge (résistance de charge) est dominant. La sensibilité de réception est en conséquence limitée par le bruit thermique.

Chapitre IV

Le facteur de bruit

IV.1 Introduction

Le facteur de bruit d'une liaison optique 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. Quand ce facteur de bruit F est grand, le signal en sortie est très bruité. Ce rapport est souvent 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 :

$$F = \frac{Ns}{G Ni} \quad (\text{IV.2})$$

avec:

- N_i : la densité spectrale du bruit à l'entrée du dispositif.
- N_s : le bruit de la sortie du dispositif.
- G : le gain de dispositif en question. Ce terme peut s'écrire en faisant apparaître le bruit rajouté par le système :

$$F = \frac{G Ni + Ne}{G Ni} = 1 + \frac{Ne}{G Ni} \quad (\text{IV.3})$$

- N_e : le bruit rajouté au dispositif à sa sortie.

IV.2 Facteur de bruit de la liaison optique

Pour faire l'étude de la liaison complète en mettant le laser et la photodiode et compris l'amplificateur optique relié par la fibre optique. Il est possible de négliger le bruit optique 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 optique différemment d'un atténuateur électrique pour lequel la formule est : $F = \frac{1}{G}$ serait vérifiée.

La relation qui relie le facteur de bruit de la liaison complète en fonction du facteur de bruit de chaque bloc est donnée par la relation suivante :

$$F_{\text{liaison}} = F_{\text{Mod}} + \frac{(F_{\text{fibre}} - 1)}{G_{\text{OMlaser}}} + \frac{(F_{\text{PD}} - 1)}{G_{\text{OMfibre}} G_{\text{OMlaser}}} \quad (\text{IV.4}) [17]$$

La figure (IV.1) représente la variation du facteur de bruit de la liaison complète pour une longueur de fibre de 1km.

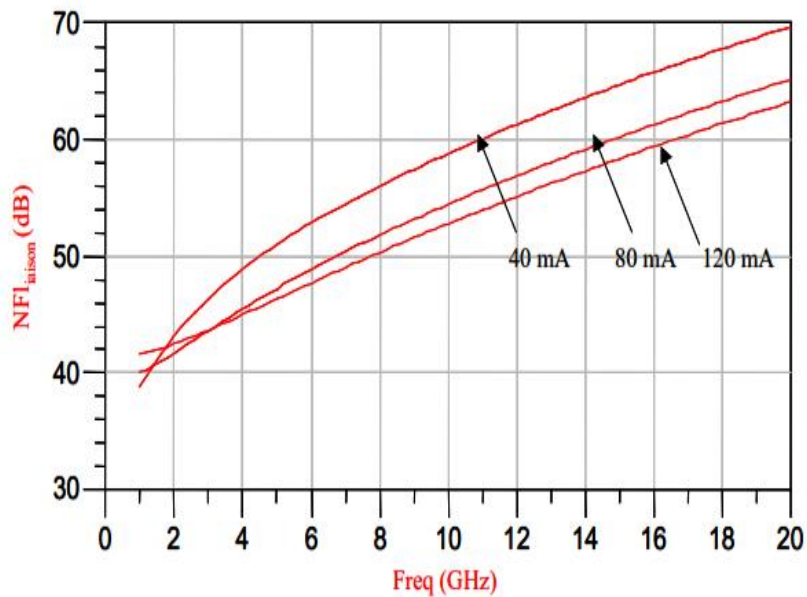


Figure (IV.1) Facteur de bruit de la liaison optique-microonde pour une longueur de 1 km pour plusieurs courants de laser [17]

IV.3 Conclusion

On peut conclure, d'après le graphe illustré par la figure (IV.1), que pour minimiser le facteur de bruit de la liaison, il faut augmenter le courant du laser lorsque la fréquence augmente ($f > 4$ GHz).

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons étudié une chaîne de transmission optique ainsi que le fonctionnement de chaque élément composant celle-ci. Par ailleurs, nous nous sommes intéressés aux bruits inhérents à chaque élément. Ceci permet d'aboutir au facteur de bruit de toute la chaîne de transmission.

Nous avons consacré le premier chapitre à l'étude des fondements concernant les phénomènes physiques relatifs à l'émission spontanée et à l'émission stimulée dans une jonction PN. Ces phénomènes sont à l'origine des émissions de lumière dans les sources optiques, utilisées dans les systèmes de communication.

La source émettrice (diode laser, LED) génère des ondes électromagnétiques dont le champ électrique est affecté par des bruits (fluctuations) d'amplitude et/ou de phase. Ces bruits sont soit intrinsèques, c'est-à-dire inhérent au système, soit extrinsèques, c'est-à-dire provenant de l'extérieur au système. Ces derniers peuvent être réduits fortement à l'aide de blindage. Ces différents bruits imposent une limite ultime aux performances de ce système.

L'origine des bruits intrinsèques sont : Quantique dû au caractère aléatoire de l'émission spontanée, technique dû à la variation lents ou rapides de température (soit de la pièce, soit d'une composantes du laser) de se faite sa stabilité thermique et le choix de matériaux reste une exigence essentielle.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du canal optique, à base de fibre, pouvant comporter un amplificateur, réalisé à l'aide d'une fibre optique dopée (Er). Le canal optique est le milieu de transmission peut être classifié en fibres monomodes et multi-modes. Dans le premier, seul le mode fondamental (HE_{11}) s'y propage tandis que dans le second, plusieurs modes s'y propagent, en plus du mode fondamental.

Outre cela, nous nous sommes penchés sur les différents phénomènes liés à l'atténuation et à la dispersion (intra-modale et intermodale) dans le canal optique. Dans le cas où le canal optique est suffisamment long (distance supérieure à 100 km), la régénération du signal optique s'avère nécessaire. De nos jours, cette régénération peut s'effectuer soit de manière optique à l'aide d'amplificateur optique (EDFA, par exemple) soit en utilisant un amplificateur à semi-conducteur. L'amplificateur optique présente cependant l'inconvénient

d'amplifier à la fois et le signal utile et le bruit dû à l'émission spontanée amplifiée (ESA) qui l'accompagne.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du récepteur optique. Lors de la détection d'un signal optique au moyen d'une photodiode (jonction PN, PIN, ADP). Nous notons que dans la photodiode, le bruit thermique est dominant. Ce dernier est dû aux circuits résistifs.

Par conséquent, la sensibilité du photorécepteur, sans gain interne, est limitée par les différents bruits et en général le bruit thermique. En revanche, ceux à gain interne, tels que les photodiodes à avalanches (APD), fonctionnent grâce au processus de photo-multiplication. En effet, un photon incident engendre plusieurs photoélectrons. Ceci peut être une solution pour augmenter la puissance du signal électrique pour la même puissance optique incidente et améliorer ainsi le rapport signal sur bruit. Toutefois ce phénomène de gain interne s'accompagne aussi d'un bruit de grenaille additionnel. Ce bruit est lié à la nature corpusculaire (ou granulaire) de la lumière reçue, et donc du photo-courant. Néanmoins, le photo-détecteur à gain interne apporte une amélioration au rapport signal sur bruit en dépit du bruit de grenaille additionnel, qui reste cependant négligeable devant le bruit thermique.

Enfin, le quatrième chapitre montre clairement que le facteur de bruit de la liaison complète dépend du facteur de bruit de chaque élément constituant la chaîne optique. Nous notons que, par un choix adéquat des gains de l'amplificateur optique et celui du préamplificateur du détecteur, il est possible à cet effet d'augmenter de manière significative ce facteur de bruit.

Bibliographie

- [1] Henry Mathieu, Hevry Fanet, physique des semi-conducteurs et composants électroniques édition DUNOD, 2009.
- [2] ROMAIN MACIEJKO, Optoélectronique, Montréal, Presse internationale Polytechnique, 2002.
- [3] Luc DETTWILLER, Les lasers et leurs applications, Paris, ellipses, 1998.
- [4] Irène Joindot, Michel Joindot, Les télécommunications par fibre optique, édition DUNOD, 1996.
- [5] CASSAN E., «Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples, J3eA Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, EDP Sciences, 2002.
- [6] FISCHER A., Cours de Télécommunication IUT GTR – Université de Paris XIII, Télécommunications optiques : Chapitre 5 : Physique des lasers.
- [7] CARENCO A., « Composants actifs, Systèmes optiques » Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse, Ecole d'été, Juillet 1991, pp. 93-143.
- [8] K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa, « Millimeter-Wave Ti: LiNbO₃ optical modulators », Journal of lightwave technology, vol.16, no. 4, April 1998, pp. 615-619.
- [9] Larry Coldren et Scot Corzine, “Diode laser and photonic Integrated Circuits”, Wiley series in Microwave and optical Engineering New York (Etat-unis).
- [10] Revue de l'école nationale des postes et télécommunication « Technologie de la fibre optique » Département Télécommunication - laboratoire de transmission Mars 2004.
- [11] Sidi Ali Mebarek Zerouk, « Transmission par fibre optique » OPU 2001.
- [12] <http://www.google.com/patents/WO2008121273A2?cl=en>
- [13] "Les techniques de l'ingénieur", Techniques de l'ingénieur, Paris, 1999.

[14] Jacque Spicher, « photorécepteurs 1,3-1,55 μ m obtenu par intégration monolithique de photodiode PIN et de transistors HEMT » thèse doctorat, école polytechnique de Lausanne, 1996

[15] BOISROBERT Christian, TOFFANO Zeno, *Cours de DESS et DEA d'Optique et Optoélectronique*, Université de Nantes, 2001.

[16] KANEDA T., Silicon and Germanium avalanche photodiodes semiconductor and semimetals , *Lightwave Communications Technology*, Vol. 22, Part D, Photodetectors.

[17] Amar BDEOUI, « Etudes des éléments d'une liaison optique en microonde : modèle de laser avec transposition du bruit 1/f autour de la fréquence de modulation – nouvelle configuration de photo-détecteur à cavité étendue micro-photonique », thèse de doctorat, conservation national des arts et métiers, 27 Avril 2006.

Résumé

Le présent travail a porté sur l'étude d'un canal de transmission tout optique. Ce dernier, étant bruité, est constitué globalement d'un émetteur optique (LD, LED, etc...), d'un canal de transmission par fibre optique, doué ou non d'un amplificateur optique (EDFA) et d'un récepteur optique (photodiode, photodiode PIN, PDA, etc...). Par ailleurs, l'objectif recherché est de déterminer le facteur de bruit du canal optique, fonction des bruits inhérents à de chaque élément dudit canal.

Mots-clés : Laser, Diode Laser (LD), Diode Electroluminescente (LED), Amplification Optique (EDFA), Emission Spontanée Amplifiée (ASE), Photodiode, Photodiode PIN, PDA, Bruits, Facteur de bruit.