

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche
Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série:

Faculté des Sciences et Technologie
Département des Sciences et Technologie

Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie électrique

Spécialité : Maintenance en instrumentation industrielle

THEME:

***Etude des Composants Optoélectroniques
Utilisés dans les Systèmes de
Communications Optiques***

PAR:

Sidahmed OULD MOHAMED

Mohamed Yeslem KHALIL MOHAMED MOULOUD

Jury:

M^r: Kada BITEUR

Maitre Assistant B Univ. Ghardaïa

Encadreur

ANNEE UNIVERSITAIRE: 2013/2014

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail a :

- ✚ ma très chère mère **ZAINEB** et mon cher père **MOHAMED** qui m'ont encouragé à être ce que je suis, pour leur amour, leur temps, leurs sacrifices et leur support continu
- ✚ Spécialement pour ma très cher sœur **Fatimatou**
- ✚ Tous mes frères **Ahmed, Abdouallah, sidi mohamed**
- ✚ Mes oncles
- ✚ Mon cher binôme **Yeslem mohamed khallil**
- ✚ Tous mes amis spécialement : **Sidi ahmed ould lekbar, Didi, Faredj, Si khider, Mohamed, Abdeallah, Chibani, Sidi ethman, Sidi Mohamed, Mohamed N, Hamza h, Amirouche, yassine, Said, Tiziri, baya, Salka, Salima, Iman, Amina, Yema djamilla, Fatim**
- ✚ Et sans oublier mes professeurs qui m'ont soutenue durant toutes mes années d'étude.

Et tous les responsables et les travailleurs de l'université de Ghardaia

En fin, je suis reconnaissante à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sidahmed



Remerciements

Parce que personne n'arrive jamais seul

Avant tout, nous remercions DIEU tout puissant, maître des cieux et de terre, qui nous a permis de mener à bien ce travail.

*Tout d'abord on tient surtout à adresser nos plus vifs remerciements au Monsieur **Biteur Kada**, maître-assistant à l'université de Ghardaïa. Qui nous a permis de réaliser ce travail sous sa direction. Nous ne saurons jamais oublier sa disponibilité, son assistance et ses conseils judicieux durant la réalisation de ce travail.*

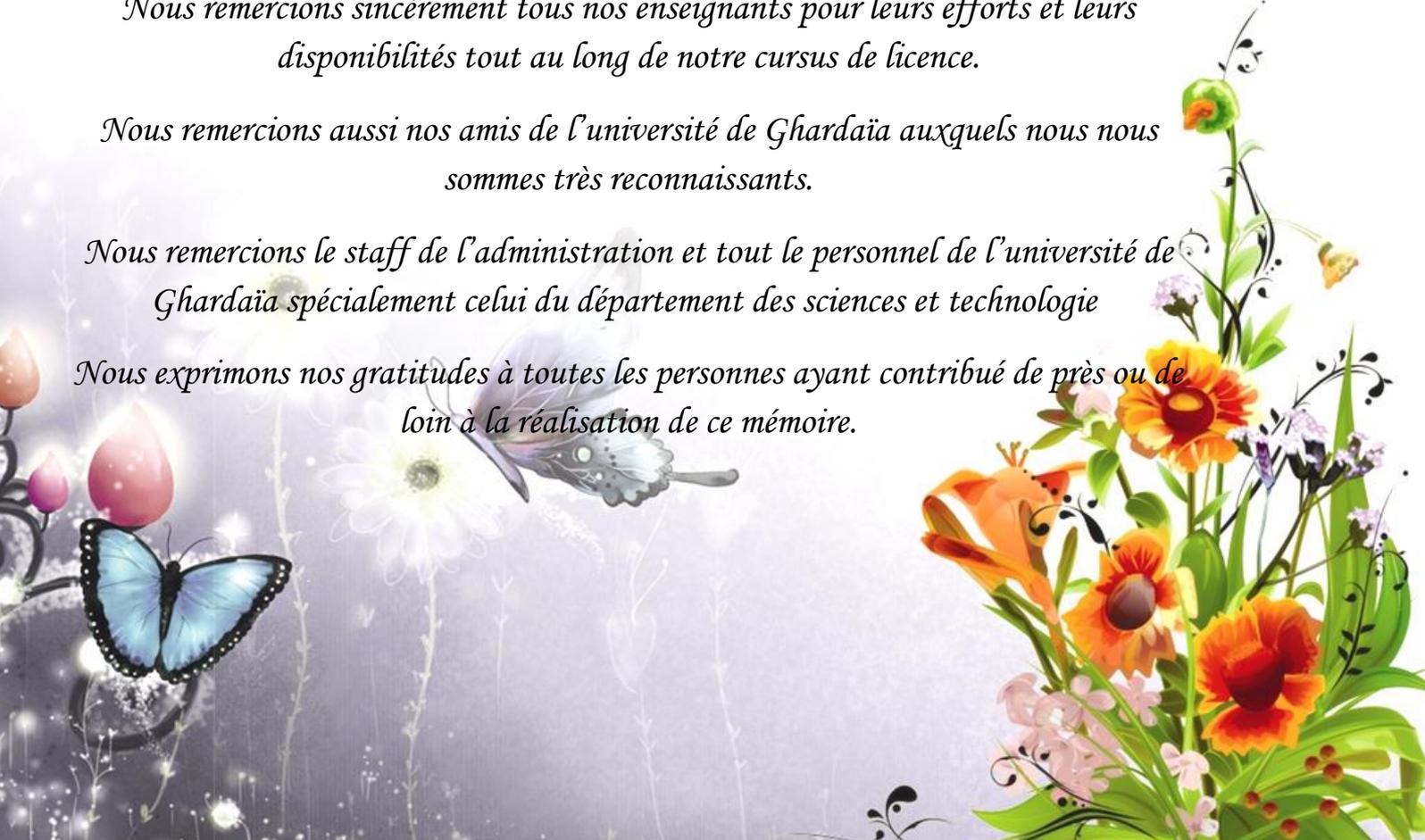
*Nos remerciements vont aussi **Akarmi et Djellouli**. Des Maîtres assistants à l'université de Ghardaïa, pour leurs aides et leurs conseils*

Nous remercions sincèrement tous nos enseignants pour leurs efforts et leurs disponibilités tout au long de notre cursus de licence.

Nous remercions aussi nos amis de l'université de Ghardaïa auxquels nous nous sommes très reconnaissants.

Nous remercions le staff de l'administration et tout le personnel de l'université de Ghardaïa spécialement celui du département des sciences et technologie

Nous exprimons nos gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.



Résumé

Résumé

Le travail de ce mémoire de fin d'étude est consacré à l'étude des composants optoélectroniques dans une liaison optique.

Il consiste alors à faire :

1) une étude théorique sur :

- Sources Optiques ;
- la Fibre Optique ;
- Détecteurs Optiques ;

2) Une simulation permettant de mieux comprendre cette étude et connaître les différents composants optoélectroniques, cette simulation est basée sur le logiciel MATLAB.

Mots-clés : Fibre Optique, Sources Optiques, Détecteurs Optique, Simulation.

الملخص:

لقد تم إعداد هذه الدراسة بهدف الاطلاع علي المركبات الالكتروضوئية في الروابط الضوئية وقد تضمنت:

1- الدراسة النظرية التي تناولت: المصادر الضوئية، الخيط الضوئي، الكواشف الضوئية

2- التمثيل البياني الذي يسمح بالفهم الجيد لهذه الدراسة واستيعاب مختلف المركبات الضوئية، وقد تم هذا التمثيل

البياني بالاعتماد على استعمال برنامج "مطلب"

الكلمات المفتاحية: الخيط الضوئي، المصادر الضوئية، الكاشف الضوئي، التمثيل البياني

Sommaire

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Sommaire

Introduction générale.....4

Chapitre I : les sources optiques

I.1 Introduction.....	4
I.2 Différents types des sources.....	4
I.3 Exigences imposées aux sources optiques.....	4
I.3.1 Longueur d'onde.....	4
I.3.2 Puissance de sortie.....	4
I.3.3 Dimensions.....	4
I.3.4 Concentration énergétique.....	5
I.3.5 Largeur spectrale.....	5
I.3.6 Linéarité.....	5
I.3.7 Temps de montée.....	5
I.4 Matériaux utilisés.....	5
I.5 L'émetteur optique.....	6
I.5.1 Diode électroluminescente (DEL).....	6
I.5.1.1 Principe de fonctionnement.....	6
I.5.1.2 Les caractéristiques de la DEL.....	6
I.5.1.2.1 Caractéristique de transfert.....	6
I.5.1.2.2 Le rendement quantique.....	7
I.5.1.2.3 Spectre d'émission.....	7
I.5.2 Diode Lasers.....	8

I.5.2.1 Introduction.....	8
I.5.2.2 Principe des lasers.....	8
I.5.2.2.1 Fonctionnement en régime transitoire.....	8
I.5.2.2.2 Fonctionnement en régime stationnaire.....	9
I.5.2.2.3 Absorption stimulée.....	9
I.5.2.2.4 Emission spontanée.....	9
I.5.2.2.5 Emission stimulée.....	10
I.5.2.3 Le résonateur FABRY-PEROT.....	10
I.5.2.4 Seuil d'oscillation LASER.....	11
I.5.2.5 Notion de stabilité.....	12
I.5.2.6 Le gain dans la diode Laser.....	13
I.5.2.7 Les caractéristiques de laser.....	13
I.5.2.7.1 Cohérence temporelle.....	13
I.5.2.7.2 Cohérence spatiale.....	13
I.5.2.7.3 Paramètres électriques.....	13
I.5.2.7.4 Paramètres optiques.....	13
I.5.2.7.4.1 Largeur du spectre.....	13
I.5.2.7.4.2 Rendement.....	14
I.5.2.7.4.3 Rapidité.....	14
I.5.2.7.4.4 La puissance.....	14
I.6 Modulation.....	15
I.6.1 La modulation directe.....	15
I.6.2 La modulation externe.....	15
I.7 Conclusion.....	16

Chapitre II : la fibre optique

II.1 Introduction.....	18
II.2 La fibre optique.....	18

II.3 Les différents types de fibres optiques.....	18
II.3.1 Fibre Multimode.....	18
II.3.1.1 La fibre à saut d'indice.....	19
II.3.1.2 La fibre à gradient d'indice.....	19
II.4 Propagation dans une fibre optique.....	19
II.4.1 Fibre à saut d'indice.....	20
II.4.2 fibre à gradient d'indice.....	20
II.4.3 Fibre Monomode.....	21
II.5 L'ouverture numérique.....	21
II.6 La longueur d'onde.....	22
II.7 Multiplexeur/Démultiplexeur.....	23
II. 7.1 La technologie WDM et DWDM.....	23
II.8 Les Imperfections De La Fibre Optique.....	25
II.8.1 L'affaiblissement.....	25
II.8.2 L'atténuation.....	25
II.8.3 La dispersion.....	26
II.8.3.1 Dispersion chromatique.....	26
II.8.3.2 Dispersion modale.....	26
II.9 La Bande Passante.....	26
II.9.1 Exemple.....	26
II.10 Les avantages et les inconvénients des fibres optiques.....	27
II.10.1 Les avantages de la fibre optique.....	27
II.10.2 Les inconvénients de la fibre optique.....	28
II.11 Conclusion.....	28

Chapitre III : Les détecteurs optiques

III.1 Introduction.....	30
III.2 Photodiodes.....	30

III.2.1 Généralité sur les photodiodes.....	30
III.2.2 Les types des photodiodes.....	31
III.2.2.1 La photodiode p-n.....	31
III.2.2.1.1 Principe.....	31
III.2.2.1.2 Temps de réponse d'une photodiode pn.....	33
III.2.2.2 La photodiode PIN.....	33
III.2.2.2.1 Principe et temps de réponse.....	33
III.2.2.2.2 Choix des matériaux.....	35
III.2.3 La photodiode à avalanche.....	36
III.3 Conclusion.....	38

Chapitre IV : Simulations et résultats

IV.1 Introduction.....	40
IV.2 MATLAB.....	40
IV.2.1 Syntaxe.....	40
IV.2.2 Vecteurs/matrices.....	40
IV.2.3 Outils et modules.....	41
IV.3 Diode DEL.....	41
IV.4 Diode LASER.....	43
Conclusion générale.....	47
Liste des figures.....	49
Table des acronymes et abréviations.....	52
Références bibliographiques.....	54

Introduction générale

Introduction générale

Avant l'optique, ni les systèmes à câbles coaxiaux, ni les systèmes micro-ondes, ne permettaient de transmettre un débit supérieur à 100 Mb/s en moyenne. Le système coaxial le plus évolué était capable de transmettre un débit de 274Mb/s, mais à condition de prévoir l'installation de répéteurs tous les kilomètres ... une amélioration substantielle des performances était pressentie si l'on réussissait à transmettre l'information sur une porteuse optique de l'ordre de la centaine de THz, au lieu de la dizaine de Ghz des porteuses micro-ondes.

L'intérêt de la communication par fibre optique par rapport aux systèmes classiques de transmission (Hertzien, par câble, par satellite, micro-onde, propagation de la lumière en atmosphère...) est l'absence d'interférence extérieure perturbatrice (en effet, la fibre protège de l'entrée de lumière parasite et est insensible aux perturbations atmosphériques et aux champs électromagnétiques), ainsi que la plus grande fréquence de la porteuse qui permet de lui faire transporter beaucoup plus de canaux ou d'en augmenter la bande passante.

Les télécoms par voies optiques sont basées sur l'utilisation de quatre éléments essentiels :

- Une source qui produit un rayonnement de faible largeur spectrale pouvant être facilement modulée en intensité, en fréquence ou en phase (pour les sources cohérentes)

- Une fibre optique monomode en silice à faible taux d'absorption

- Un amplificateur tout optique (répéteur), apparu récemment (~1995), qui permet de régénérer le signal lors du transport long distance

- Une photodiode (Si, Ge ou In Ga As) qui transforme les photons incidents en pair électron trou, donc en courant électrique, avec un excellent rendement et un bruit de fond minimal.

Partout dans le monde, les systèmes hertziens (sauf dans les régions peu accessibles), tant dans le domaine terrestre que sous - marin. A ce stade cependant, la formidable bande passante disponible sur la fibre monomode est loin d'être exploitée à son maximum. En effet, l'atténuation de la fibre est faible sur une plage de fréquences de plusieurs dizaines de THz et cette propriété est mise à profit par les systèmes de 4ème génération qui introduisent quelques années plus tard le multiplexage en longueur d'onde.

Celui-ci permet d'augmenter le débit global d'une liaison en propageant plusieurs porteuses optiques de longueurs d'onde différentes sur une même fibre. Parallèlement, la mise au point de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium permet d'augmenter la distance entre répéteurs, conduisant à la conception de réseaux optiques à l'échelle planétaire, d'une capacité de plusieurs centaines de Gb/s. en moins de 20 ans, l'optique a donc provoqué une révolution complète, non seulement de la transmission des informations d'un bout à l'autre de la planète, mais également de l'architecture des systèmes. Le multiplexage en longueur d'onde offre de grandes possibilités de routage optique et

les liaisons point à point cèdent progressivement la place à des véritables réseaux interconnectant des points repartis sur l'ensemble de globe .

Nous examinerons dans ce rapport particulièrement les études théoriques des composants clés de la chaîne de transmission et de traitement de l'information. Et nous essayons à la base des résultats théoriques de rapprocher le système de transmission optique à des modèles.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous apportons toutes les informations nécessaires aux systèmes détecteurs optiques. Le second chapitre traite la fibre optique et les différentes techniques de transmission. Le troisième chapitre étudie les différents types des détecteurs optiques. Enfin, dans le quatrième chapitre nous effectuons de nombreuses simulations des composants optoélectroniques sous MATLAB. Enfin une conclusion viendra clore ce travail de fin d'études.

Chapitre I : Les Sources Optiques

I.1 Introduction

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

Le signal lumineux reçu doit être supérieur à un certain seuil de puissance et doit présenter une largeur de bande minimale.

I.2 Différents types des sources

Les sources que l'on peut utiliser dans le domaine des transmissions optiques sont les sources à spectres réduits (diodes laser et diodes électroluminescentes). En télécommunication optique, la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix de sources à spectres réduits telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL).

I.3 Exigences imposées aux sources optiques

I.3.1 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 ainsi qu'un minimum de dispersion. Il faut également s'assurer de la disponibilité de détecteurs à ces longueurs d'ondes. Pour la fibre en silice, il existe principalement trois fenêtres de transmission qui se situent entre 0.85 μm , 1.32 μm et 1.55 μm . Il est à noter que les différentes longueurs d'ondes émises sont produites par différents matériaux photo-émissifs [1].

I.3.2 Puissance de sortie

Le niveau de la puissance émise a une grande influence sur la portée de la liaison. Il est évident que pour augmenter la portée d'une liaison on doit émettre la plus grande puissance possible sans néanmoins dépasser un certain seuil, au-delà duquel la fibre se comporte comme un élément non linéaire. Actuellement, les sources disponibles dans les domaines des télécommunications émettent des puissances (quelques dBm) très inférieures au seuil de non-linéarité. Si bien que l'on peut injecter dans une même fibre, grâce au multiplexage plusieurs signaux optiques différents permettant ainsi de transmettre en même temps plusieurs informations différentes.

I.3.3 Dimensions

Elles doivent être comparables à celle de la fibre. L'idéal serait que toute la puissance émise par la source soit totalement injectée dans le cœur de la fibre.

I.3.4 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.

I.3.5 Largeur spectrale

Elle intervient, dans une grande mesure, sur la bande passante que peut transmettre une fibre.

Rappelons que pour augmenter cette bande passante, il est nécessaire de minimiser la dispersion chromatique ce qui revient à utiliser des sources de faibles largeurs spectrales.

I.3.6 Linéarité

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

I.3.7 Temps de montée

Il doit être le plus faible possible pour une utilisation en transmission numérique lorsque la bande passante utilisée est importante.

I.4 Matériaux utilisés

Lors de la conception des émetteurs optiques, il faut toujours chercher les matériaux qui produisent le meilleur rendement quantique et une bande interdite (GAP) qui correspond à la longueur d'onde souhaitée. Les matériaux semi-conducteurs utilisés dans les dispositifs optoélectroniques peuvent être classés en quatre types de composés. Tous ces composés se différencient par la largeur de bande qui fixe la longueur d'onde du signal.

Notons qu'il est rare de disposer d'un matériau correspondant à une utilisation souhaitée. Par contre, il est possible d'ajuster le GAP en agissant sur la concentration des dopants.

<i>Composé</i>	<i>Type</i>	<i>GAP E_g (ev)</i>	<i>λ (μm)</i>	<i>Type de GAP</i>
<i>GaAs</i>	Binaire	1.43	0.87	Directe
<i>InAs</i>	Binaire	0.35	3.54	Directe
<i>Ga_x In_{1-x} As</i>	Ternaire	1.43 – 0.35	0.87 – 3.54	Directe
<i>Al_x Ga_{1-x} As</i>	Ternaire	1.43 – 0.35	0.87 – 3.54	Directe
<i>Ga_x In_{1-x} P_{1-y} As_y</i>	Quaternaire	1.36 – 0.35	0.91 – 3.44	Directe

Tableau I.1: Matériaux utilisés pour différentes GAP [1]

I.5 L'émetteur optique

L'émetteur optique utilisé dans les systèmes de communication analogique ou numérique doit assurer une fonction de conversion électrique-optique. Il contient principalement le composant optoélectronique d'émission qui peut être une diode DEL ou une diode LASER. L'interface optique d'émission contient également un circuit de modulation ainsi qu'autres circuits d'adaptation et de protection. Il est relié aux câbles par une fibre dite amorce qu'il faut raccorder.

Généralement, il existe deux méthodes qui sont utilisées pour moduler les ondes optiques; la modulation directe et la modulation cohérente.

Dans la modulation directe, on modifie le courant injecté (polarisation) dans la source optique, cette technique est simple et peut coûteuse. Dans la modulation cohérente, le signal optique provenant de la source est mélangée avec un autre signal optique issu d'un oscillateur local, à travers un modulateur optique.

I.5.1 Diode électroluminescente (DEL) [2-4]

I.5.1.1 Principe de fonctionnement

La DEL tout simplement c'est une jonction P-N polarisée en directe, construite dans un semi-conducteur à structure de bande directe.

Dans la DEL, nous sommes en présence d'une émission dite spontanée. On rappelle que la région la plus radiative est la région P de la jonction, c'est la raison pour laquelle est choisie comme une face d'émission dans la majorité des DEL.

I.5.1.2 Les caractéristiques de la DEL [2-4]

I.5.1.2.1 Caractéristique de transfert

Cette caractéristique nous montre la puissance délivrée par la source DEL en fonction de son courant de polarisation.

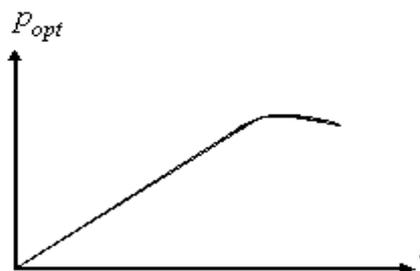


Figure I.1: Caractéristique de transfert

Elle nous permet de conclure que la DEL n'est pas un dispositif à seuil.

I.5.1.2.2 Le rendement quantique

Le rendement quantique η_q est le rapport entre le nombre de photons recueillis et le nombre d'électrons injectés. Le nombre de photons recueillis est proportionnel au rapport entre la puissance optique émise P (mW) et l'énergie du photon ($h\nu$). Le nombre d'électrons injectés est proportionnel au rapport entre le courant injecté i (mA) qui traverse la diode et la charge de l'électron (e).

$$\eta_q = \frac{P/h\nu}{I/e} = \frac{P}{I} \frac{e}{h\nu} = \frac{P \lambda (\mu m)}{I \cdot 1.24} \quad (I.1)$$

I.5.1.2.3 Spectre d'émission

Le spectre d'émission de la DEL est caractérisé par une distribution spectrale de largeur ($\Delta\lambda$) centrée autour de la longueur d'onde de la transition la plus probable, correspondant à une énergie légèrement supérieure à la largeur de la bande interdite du semi-conducteur.

La largeur spectrale est par exemple $\Delta\lambda=40$ nm à 60 nm pour une longueur d'onde d'émission de 0.8 μm ou de 120 nm à 1.3 μm . En général le spectre d'émission d'une source DEL peut être approximé à une fonction gaussienne :

$$P_\lambda = P_{\lambda_0} \exp\left(-\Pi \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right) \quad (I.2)$$

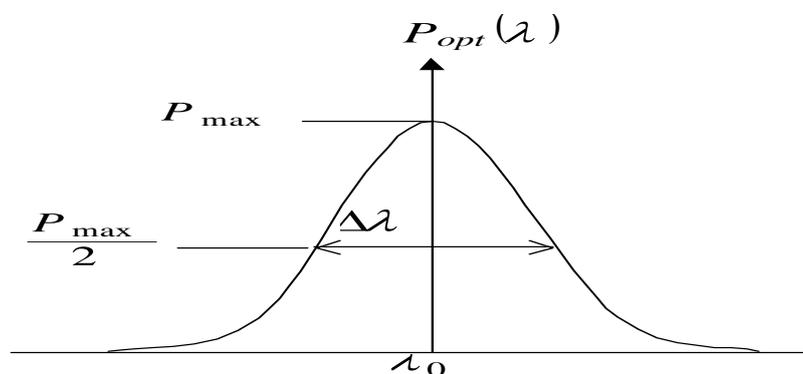


Figure I.2: Spectre d'émission d'une DEL

I.5.2 Diode Lasers

I.5.2.1 Introduction [1-5]

LASER est. l'abréviation de Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation. C'est en fait une cavité résonnante dans laquelle se trouve un milieu (liquide, solide ou gaz) Susceptible d'être excité : c'est le milieu actif. Il fournit un rayonnement cohérent :

- Temporellement
- Spatialement

I.5.2.2 Principe des lasers

Le laser est composé de trois éléments essentiels :

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

Cette cavité forme, avec le milieu actif, un amplificateur.

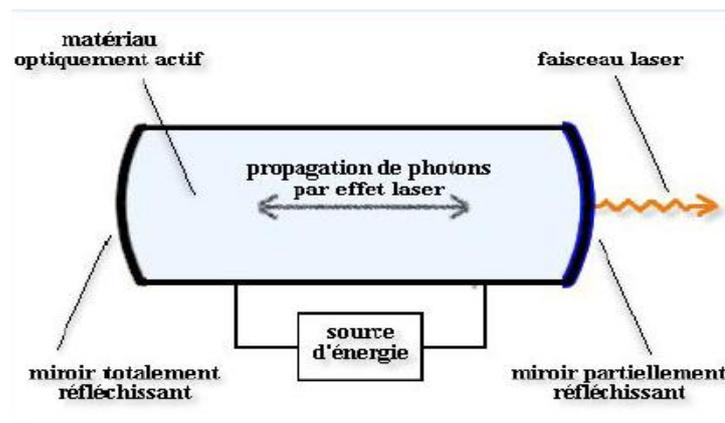


Figure I.3: schéma de principe de laser [5]

I.5.2.2.1 Fonctionnement en régime transitoire

Quand on commence à pomper le milieu actif, il se désexcite en émission spontanée. Cette lumière de fluorescence oscille dans la cavité Fabry-Perot, quand elle repasse dans le milieu actif, et elle le désexcite en émission stimulée.

I.5.2.2.2 Fonctionnement en régime stationnaire

On continue le pompage. Très vite, le nombre de photons stimulés croît car eux aussi oscillent dans la cavité. Ce nombre devient très supérieur aux premiers photons de fluorescence qui avaient servi à déclencher le mécanisme (l'effet laser se bâtit sur des fluctuations).

Ils oscillent et sortent (pas tous, une partie) par le miroir de sortie M2 qui ne transmet que 2% des photons de la cavité.

On ne récolte donc que des photons stimulés, en phase et de même longueur d'onde, caractéristiques du rayonnement laser.

Schématiquement, nous avons donc un Fabry-Perot dans lequel seules quelques fréquences peuvent osciller. Elles sont déterminées en première approximation par la longueur de la cavité (en tout rigueur, elles dépendent aussi du mode de propagation du faisceau gaussien, comme nous le verrons par la suite).

On obtient, en général, un laser multimodes, c'est-à-dire formé d'un certain nombre de raies très fines, de fréquences très peu différentes, appelées « modes longitudinaux ».

I.5.2.2.3 Absorption stimulée [1-2-3]

Le photon d'énergie $h\nu = E_i - E_j$ est absorbé. Il cède son énergie au système qui transite de l'état j vers l'état i .

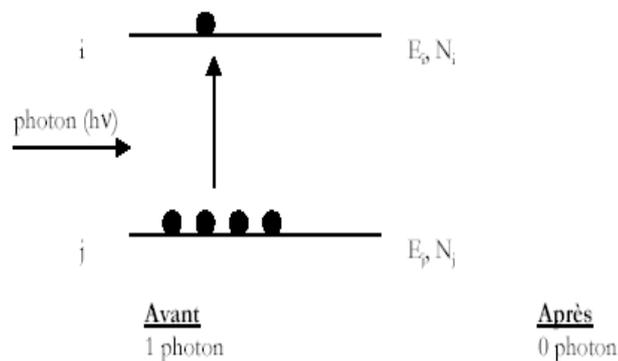


Figure I.4: Absorption stimulée [2]

I.5.2.2.4 Emission spontanée [1-2-3]

Un atome se désexcite spontanément avec l'émission d'un photon d'énergie $h\nu = E_i - E_j$

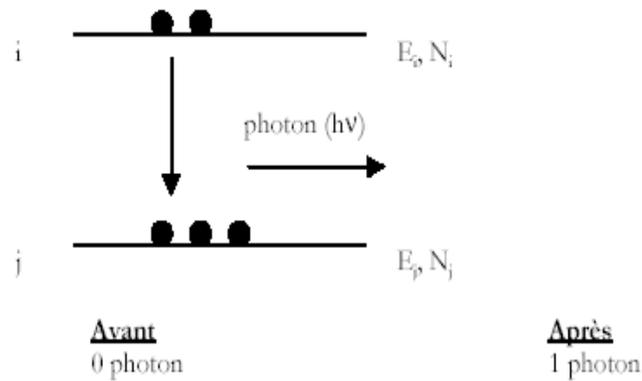


Figure I.5: Emission spontanée [2]

I.5.2.2.5 Emission stimulée [1-2-3]

Sous l'influence d'un photon, un atome se déexcite du niveau E_i vers le niveau E_j , en émettant un photon d'énergie $h\nu = E_i - E_j$. Ce deuxième photon possède exactement les mêmes caractéristiques (fréquence, direction, polarisation,.....) que le photon inducteur. Pour que l'on ait l'effet laser, il faut que l'émission stimulée soit prépondérante, ce qui suppose une inversion de la population.

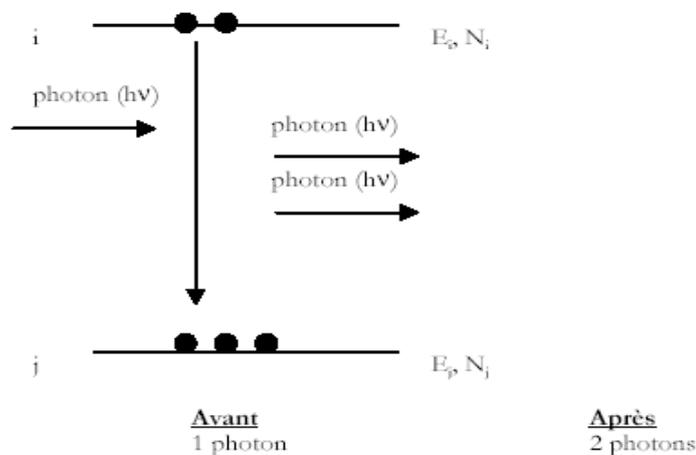


Figure I.6: Emission stimulée [2]

I.5.2.3 Le résonateur FABRY-PEROT [2-3-6]

Dans notre étude sur le LASER, on s'intéresse à un seul type de résonateur, c'est le résonateur de FABRY-PEROT.

Ce type se présente par une cavité résonante, réalisé par deux miroirs parallèles, par cette cavité, identifiable à un résonateur électromagnétique, la lumière est régulièrement renvoyée vers le milieu actif amplificateur.

Dans ce résonateur, il s'établit des modes de résonance que l'on détermine à partir des conditions aux limites imposées par les parois.

Les longueurs d'ondes qui correspondent à ces modes sont données par :

$$\lambda_k = \frac{2Ln}{K} \quad (\text{I.3})$$

Où :

L : Longueur de la cavité.

n : L'indice de réfraction.

K : Entier.

Plusieurs λ_k se trouvent en général situées dans l'enveloppe ou est satisfaite la condition sur l'intensité du mode guide et donnent les positions des raies observées ou modes longitudinaux de la cavité. Les diodes Laser PEROT-FABRY sont donc appelées parfois diodes Laser multimodes. L'écart $\delta\lambda$, entre deux modes consécutifs ($\delta k = 1$) peut être obtenu simplement à partir des équations précédentes et en tenant compte des variations de n avec λ :

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L(n - \lambda dn/d\lambda)} \quad (\text{I.4})$$

Cet écart est de 0,3 à 1 nm pour les diodes Lasers de référence.

I.5.2.4 Seuil d'oscillation LASER

La méthode la plus simple pour réaliser une contre réaction est d'utiliser le miroir diélectrique naturel formé par l'interface entre le semi-conducteur et l'air, pour cela, le cristal semi-conducteur est clivé deux fois le long du même plan cristallographique.

Les deux miroirs ainsi formés ont un coefficient de réflexion :

$$R_m = \left[\frac{n_{sc}-1}{n_{sc}+1} \right]^2 \quad (\text{I.5})$$

Soit L la longueur de la cavité, $R_{1,2}$ les coefficients de réflexion sur les faces de sortie et $\gamma(E)$ le coefficient d'amplification de la zone active. Donc condition d'oscillation donnée par :

$$\gamma_{seuil} = \alpha_p + \frac{1}{L} Ln \frac{1}{R} \quad (\text{I.6})$$

α_p : Pertes parasites qui proviennent des porteurs libres des contacts électriques de la diffusion fait que la condition devienne.

- les pertes par réflexion sont trop importantes peuvent supprimer l'effet laser :

Une poussière sur le miroir

Une lame à face parallèle introduite dans la cavité (pertes de 4% lors d'un passage sous incidence normale).

- Une autre cause qui supprime l'effet laser est le mauvais réglage de la cavité.

Un schéma grossier permet de voir que si les axes des miroirs formant la cavité ne sont pas confondus, des rayons trop inclinés seront perdus et la condition de seuil ne sera plus respectée.

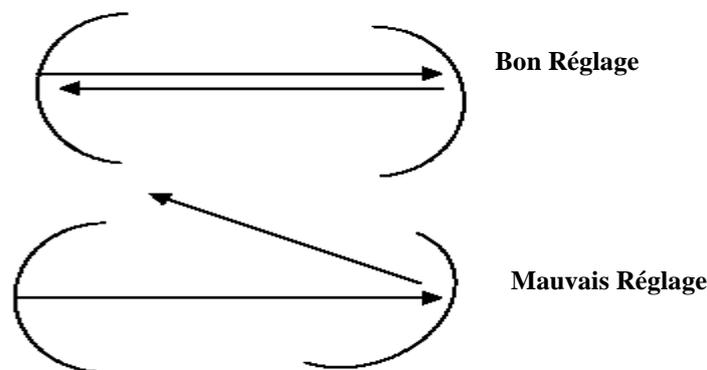


Figure I.7: Miroir diélectrique

I.5.2.5 Notion de stabilité

Un rayon se trouve dans la cavité. Il subit de multiples réflexions sur les miroirs qui limitent la cavité. Pratiquement, ces miroirs sont en général sphériques car c'est cette forme qui satisfait aux conditions aux limites de stabilité des faisceaux gaussiens.

Nous n'en retenons que le résultat. Pour qu'un rayon lumineux reste à l'intérieur de la cavité, après un grand nombre de réflexions, celle-ci doit satisfaire à la condition dite de stabilité.

$$0 \leq \left(1 - \frac{d}{R_1}\right) \left(1 - \frac{d}{R_2}\right) \leq 1 \quad (\text{I.7})$$

Où R_1 et R_2 sont les rayons de courbure des deux miroirs. Ils sont positifs si les miroirs sont concaves, et d est la distance entre les deux miroirs. Il est bien sûr supposé que les axes optiques des deux miroirs soient parfaitement confondus.

I.5.2.6 Le gain dans la diode Laser

L'effet LASER se produit entre les états du bas de la bande de conduction et les états du sommet de la bande de valence, après un pompage suffisant loin de l'équilibre thermodynamique du LASER pour réaliser une inversion de population entre ces deux ensembles d'états, donnant naissance à un gain donné par la formule :

$$\gamma_{max} = \alpha_0 \left(\frac{n}{n_{trans}} - 1 \right) = \alpha_0 \left(\frac{J}{J_{trans}} - 1 \right) \quad (I.8)$$

Où :

γ_{max} : le gain maximum cm^{-1}

α_0 : le coefficient d'absorption cm^{-1} du matériau.

n : la densité de porteur de charge

n_{trans} : la densité de porteurs de charges correspondant à la condition

D'inversion de population : $E_{Fc} - E_{Fv} = E_g$

J la densité de courant de porteurs de charges

I.5.2.7 Les caractéristiques de laser

I.5.2.7.1 Cohérence temporelle

Cette cohérence signifie que toutes les émissions se font sur la même longueur d'onde.

I.5.2.7.2 Cohérence spatiale

Dans ce cas, toutes les émissions se font dans la même direction. On a alors, une concentration de puissance sur de très faibles surfaces (tâche lumineuse pointue).

I.5.2.7.3 Paramètres électriques

Comme le reste des types de diodes, le Laser est un composant non linéaire caractérisé par un courant de seuil « I_s », d'une zone linéaire définie par sa pente et d'un courant de saturation qu'il ne faut pas le dépasser.

I.5.2.7.4 Paramètres optiques

I.5.2.7.4.1 Largeur du spectre

C'est le paramètre qui définit la bande passante d'un système de communication optique. On a intérêt d'avoir une largeur du spectre le plus étroit possible. En effet, les impulsions lumineuses ont tendance à s'étaler principalement à cause du temps de

propagation différent. Ce phénomène est désigné globalement du nom de dispersion. Plus la largeur est faible, plus le problème de dispersion est moins posé. Ce qui explique l'utilisation du Laser pour les communications grandes distances hautes débit.

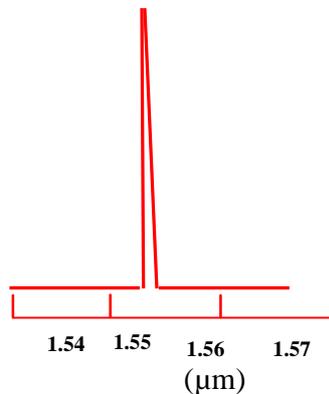


Figure I.8: Spectre d'émission d'un LASER DFB.

I.5.2.7.4.2 Rendement

C'est la puissance fournie par un courant électrique injecté. On a intérêt d'avoir le maximum de puissance à la sortie. Cette puissance dépasse rarement le (1w-10w) pour le Laser à semi-conducteur.

I.5.2.7.4.3 Rapidité

C'est un paramètre important pour la transmission numérique. Il exprime le temps de montée et de descente d'un signal.

I.5.2.7.4.4 La puissance

La puissance d'émission d'une diode LASER en fonction du courant de pompe est représentée par la figure si dessous :

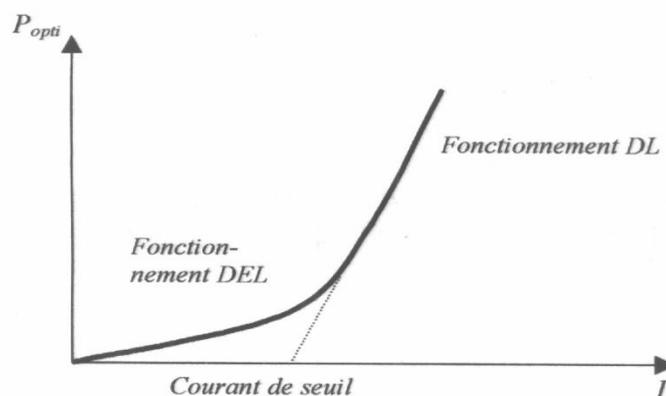


Figure I.9: Fonction de transfert du LASER [2]

Au-dessous du seuil, la puissance optique émise est faible et correspond à l'émission spontanée (de l'ordre de 0.2 mW au seuil pour un LASER à guidage par l'indice). Une fois le seuil dépassé, cette émission spontanée reste constante par suite du blocage de la densité de porteurs et donc du gain.

I.6 Modulation [1-2] :

La modulation est une fonction essentielle d'un système de communication qui a pour but d'inscrire l'information à transmettre dans le signal lumineux. Nous distinguons deux principales techniques pour moduler les ondes optiques : la modulation directe et la modulation externe. Un modulateur, est un système capable de modifier les paramètres de la lumière (essentiellement du point de vue amplitude, phase).

I.6.1 La modulation directe [2-7-8]:

Elle consiste en une simple modulation du courant laser traversant la zone active, ce qui se traduit par une modulation de l'intensité de la lumière émise par le laser. L'inconvénient majeur avec cette méthode réside dans le fait qu'à de très hauts débits la modulation du courant d'injection du laser s'accompagne d'une modulation de fréquence parasite appelée la conversion AM/FM ou "chirp" en anglais ; car cette modulation induit une variation de l'indice de réfraction dans le semi-conducteur et par conséquent s'ensuit une modulation de fréquence de la lumière. Les effets conjugués du " chirp" et de la dispersion de la fibre dégradent le signal transmis, par un élargissement des impulsions qui s'accroît avec la longueur de la fibre. Par conséquent les propriétés des lasers limitent l'utilisation de la modulation directe à des débits inférieurs à 5 Gbit/s.

I.6.2 La modulation externe [7-8] :

Pour éviter un "chirp" trop important, nous utilisons plutôt la modulation externe du signal optique issue de la source (dont le courant de polarisation est maintenu constant), au moyen de composants modulateurs. Dans ce cas la modulation peut être réalisée par des Modulateurs à Electro-Absorption (EAM) ou des modulateurs à effet électro-optique. Le MEA présente une absorption variable de la lumière selon l'intensité du champ électrique qui lui est appliquée ; les matériaux présentant de telles propriétés sont les semi-conducteurs de type III-V (tel que l'Arséniure de Gallium GaAs) qui s'avèrent particulièrement utiles pour la conception de dispositifs planaires, intégrant laser et modulateur. En revanche, les modulateurs à effet électro-optique fonctionnent selon le principe d'une modulation de phase créée par la variation de l'indice d'un milieu présentant l'effet électro-optique (à savoir : une variation d'indice de réfraction proportionnelle au champ appliqué). La modulation de phase est traduite en modulation d'intensité par un montage interférométrique de type Mach-Zender (M-Z). La modulation externe présente de

nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet d'envoyer des débits plus élevés comparée à la modulation directe.

I.7 Conclusion

Ce chapitre a pour but d'apporter toutes les informations nécessaires à la compréhension des sources optiques. Chaque émetteur comme les diodes LASER et DEL a été décrit de façon théorique. Nous avons expliqué le fonctionnement de l'interface d'émission. Au chapitre suivant nous aborderons avec plus de détails la fibre optique.

Chapitre II : La fibre optique

II.1 Introduction

Ce mémoire porte sur des études de l'aspect physique des télécommunications par fibre optique et des systèmes de transmission d'informations par fibre optique. Avant de commencer la description des travaux de la thèse proprement dits, ce chapitre consacré à la description des aspects théoriques et physiques relatifs aux télécommunications par fibre optique peut s'avérer nécessaire pour la bonne compréhension de la suite de ce mémoire.

II.2 La fibre optique [1-2-9]

Une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire. Ce guide est constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre ou plastique (polymère)) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre. Ce confinement se fait par réflexion totale à l'interface entre le cœur et la gaine optique.

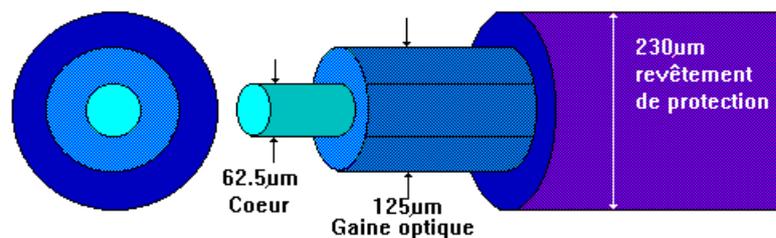


Figure II.1: constitution d'une fibre optique

II.3 Les différents types de fibres optiques

Dans la pratique on distingue trois types de fibres optiques :

- La fibre à saut d'indice.
- La fibre à gradient d'indice.
- La fibre monomode .

II.3.1 Fibre Multimode

Ce sont des fibres dont le cœur a un diamètre grand devant la longueur de l'onde utilisée. Elle présente l'avantage de pouvoir propager des rayons ayant des angles d'incidence différents en entrée. Chaque rayon parcourt un trajet différent des autres.

Il existe deux profils différents pour ces fibres:

II.3.1.1 La fibre à saut d'indice

Est constituée d'un cœur et d'une gaine optique en verre de différents indices de réfraction. La gaine optique joue un rôle actif dans la propagation. La seconde loi de Descartes s'applique dans ce cas présent, mais, cette fibre provoque de par l'importante section du cœur, une grande dispersion des signaux la traversant, ce qui génère une déformation du signal reçu.

II.3.1.2 La fibre à gradient d'indice

Dont le cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche mais décroissant depuis l'axe jusqu'à la gaine. Le guidage est cette fois dû à l'effet du gradient d'indice. C'est donc la troisième loi de Descartes qui s'applique. Les rayons guidés suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale. On s'approche ainsi d'une égalisation des temps de propagation, ce qui veut dire que l'on a réduit la dispersion modale.

Les fibres multimodes à gradient d'indice les plus utilisées sont aujourd'hui des fibres 50/125 μm et 62,5/100 μm . Ces fibres disposent d'un diamètre de cœur de 50 μm (ou 62,5 μm) et d'un diamètre de gaine de 125 (ou 100) μm .

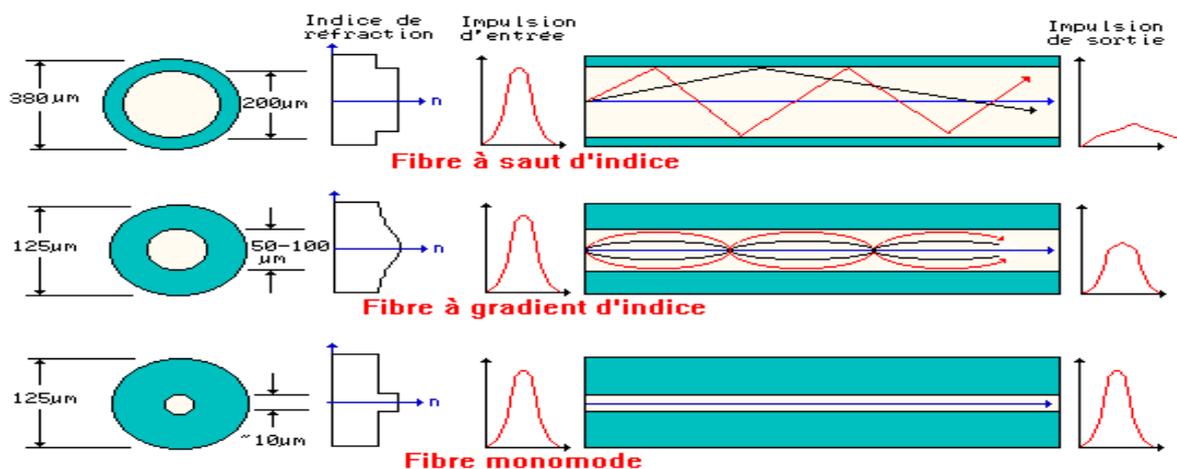


Figure II.2: Les différents types des fibres [9]

II.4 Propagation dans une fibre optique

Les modes de propagation varient suivant le type de fibre. Pour comprendre les phénomènes, nous utiliserons les principes physiques de la propagation basés sur les lois de l'optique géométrique ou lois de Descartes.

II.4.1 Fibre à saut d'indice

La fibre possède un cœur d'indice constant: la lumière se déplace suivant une droite. L'indice de la gaine est tel que le rayon subit une réflexion totale.

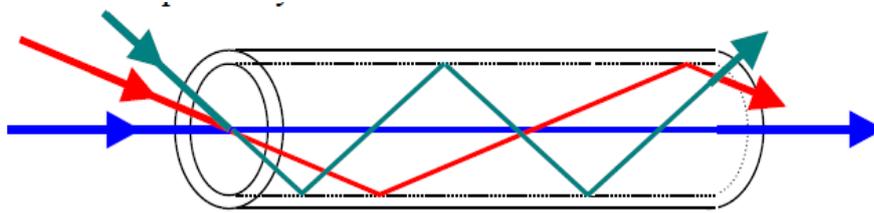


Figure II.3: Fibre à saut d'indice

La lumière possède une vitesse constante dans un indice constant. Les chemins n'ont donc pas tous la même longueur. Les temps de propagation suivant les rayons sont donc différents. C'est la dispersion modale.



Figure II.4: Dispersion modale de la fibre optique multimode

II.4.2 fibre à gradient d'indice

Pour atténuer la dispersion modale, on a cherché à augmenter la vitesse des trajets les plus long. Pour y parvenir, il faut faire varier la valeur de l'indice en faisant décroître sa valeur du cœur vers la gaine. Ainsi, les modes axiaux (en bleu) sont ralentis alors que les modes réfractés sont accélérés. Les rayons arrivent donc en sortie de fibre pratiquement en même temps.

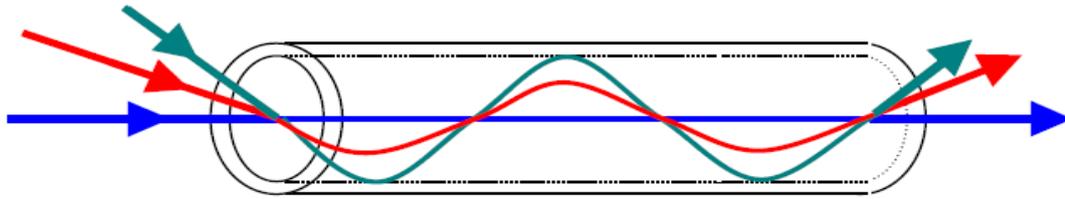


Figure II.5: Fibre à gradient d'indice

Il est ainsi possible d'obtenir des débits très importants grâce à une bande passante large.

II.4.3 Fibre Monomode

Dans ce cas, le rayon lumineux est guidé par la fibre, il n'y a pas de réflexion sur la gaine optique.

Seuls les rayons placés dans l'axe du cœur de la fibre peuvent être transmis. Ceci nécessite une grande puissance lumineuse de l'émetteur.

La dispersion modale est totalement supprimée. D'où une bande passante très importante (théoriquement illimité)



Figure II.6: Fibre monomode

Il est très important de savoir comment se propagent les informations au sein d'une fibre optique car le choix entre les différents types n'est pas toujours évident.

D'autre part, certains problèmes, lors de la pose d'un faisceau de fibres optiques, modifient les caractéristiques des signaux et s'expliquent par la connaissance des modes de transmission.

II.5 L'ouverture numérique

Lorsque l'on cherche à introduire un signal lumineux dans une fibre, les rayons viennent heurter la surface de coupe de la fibre. Les rayons peuvent alors être réfléchis (et donc perdus) ou

réfracté (transmis). Pour qu'ils soient réfractés, il faut que l'incidence des rayons reste dans le cône d'acceptance. Au delà de l'angle d'ouverture de ce cône, les rayons seront perdus.

Le sinus de l'angle d'ouverture du cône d'acceptance est appelé ouverture numérique.

$$\text{Ouverture numérique} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin \theta \quad (\text{II.1})$$

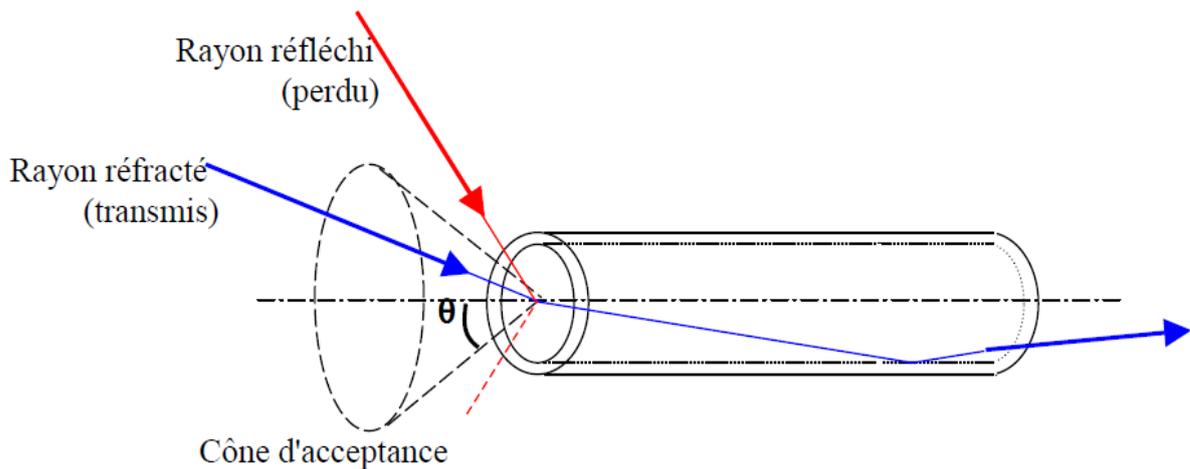


Figure II.7: Ouverture numérique

En général, l'ouverture numérique est voisine de 0,2 soit un angle θ de 12° , ce qui donne une tolérance d'alignement de 24° pour une fibre multimode de $62,5/125\mu\text{m}$. Cet angle est beaucoup plus faible dans le cas d'une fibre monomode (1° environ).

II.6 La longueur d'onde

Le spectre lumineux est important. Il regroupe les ondes électromagnétiques allant des UV aux Infra- Rouges, en passant par les couleurs visibles. Pour la fibre optique seul quatre valeurs de longueur d'onde ont été retenues. Elles sont toutes dans l'infra rouge. En fait, il s'agit de trois fenêtres de transmission.

En fibre multimode on utilise les longueurs d'onde $\lambda = 850 \text{ nm}$ et $\lambda = 1300 \text{ nm}$

En fibre monomode on utilise les longueurs d'onde $\lambda = 1310 \text{ nm}$ et $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

Ces valeurs sont reconnues par tous les fabricants de fibres, mais les valeurs d'affaiblissement peuvent être différentes.

Chaque fibre est caractérisée par sa courbe d'affaiblissement. Il existe une courbe théorique qui englobe tous les types de fibres.

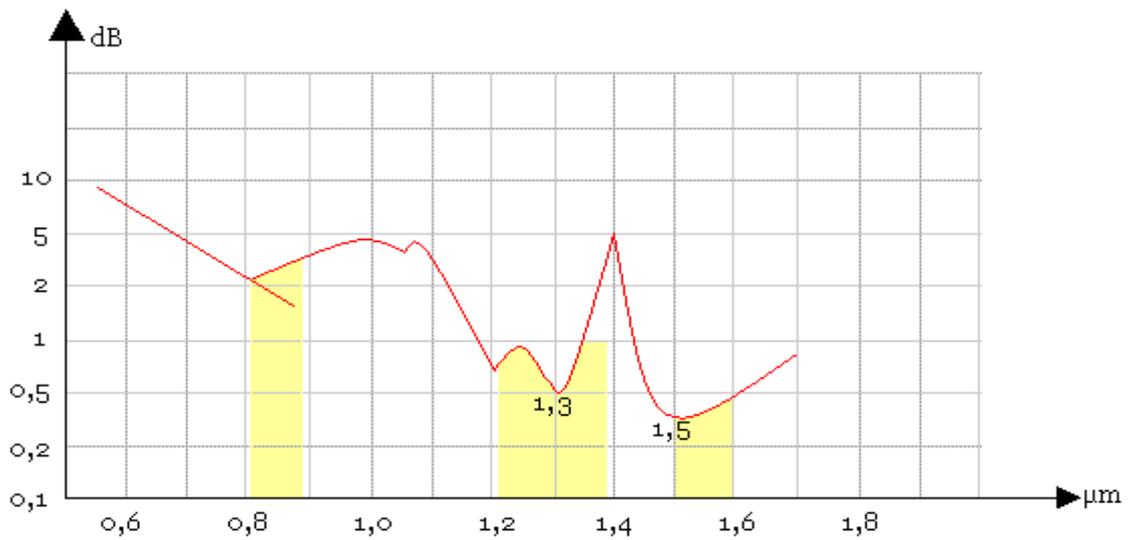


Figure II.8: Affaiblissement du signal lumineux avec les fenêtres en fonction de longueur d'onde [10].

II.7 Multiplexeur/Démultiplexeur

II. 7.1 La technologie WDM et DWDM [3-11-12]

Le multiplexage en longueur d'onde repose sur l'envoi d'ondes lumineuses multiples (fréquences) dans une même fibre optique. L'information est transmise par chaque onde, appelée voie, par modulation d'intensité (ou d'amplitude) ou par modulation de phase. À la réception, un prisme optique ou un dispositif semblable sépare les fréquences de manière à extraire séparément l'information transmise par chaque voie. Un signal numérique binaire, plus précisément un signal de modulation d'intensité par tout ou rien, peut également être acheminé par chaque voie individuelle, bien qu'on s'attende à un débit binaire plus faible qu'avec la modulation d'intensité ou de phase. Comme dans le multiplexage par répartition en fréquence (MRF) de type classique utilisé pour les transmissions de signaux électriques ou radio, on peut mélanger les porteuses sur un seul support car la lumière d'une fréquence donnée ne brouille pas celle d'une autre fréquence à l'intérieur de l'ordre linéaire d'approximation.

Principe d'une liaison WDM/DWDM

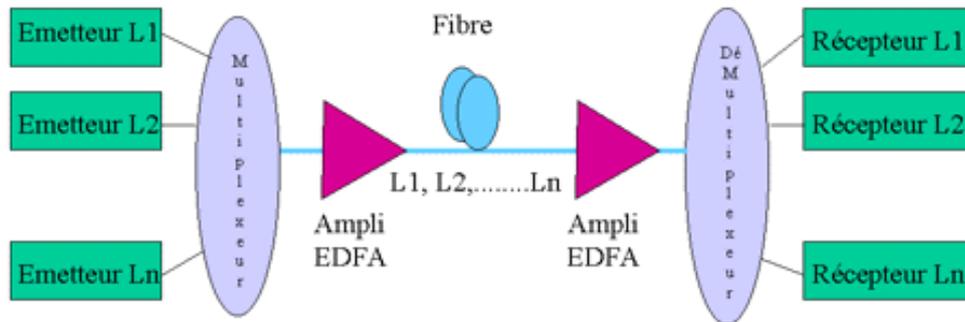


Figure II.9: Schéma de principe d'une liaison WDM/DWDM

Cette technologie est née de l'idée d'injecter simultanément dans la même fibre optique plusieurs trains de signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais chacun à une longueur d'onde distincte. Ainsi, à l'émission, on multiplexe n canaux au débit nominal D . A la réception, on démultiplexe le signal global $n \times D$ en n canaux nominaux.

Le WDM permet de multiplexer, c'est-à-dire de mélanger, plusieurs longueurs d'onde, ou signaux, dans une même fibre. Le gain est bien évidemment conséquent et est proportionnel au nombre de canaux que la fibre permet de véhiculer.

Au début de l'année 1997, le nombre de longueurs d'onde maîtrisée dans une même fibre (c'est-à-dire pour une transmission répondant aux critères des télécommunications) était de 2 à 4. En 1998, il existait commercialement des versions de multiplexeurs optiques de 8 à 16 voies et on parlait déjà de 32 voies !

En 1999, il existe des versions commerciales à 64 voies, des expériences sur le terrain réussies pour 96 voies et des tests en laboratoire pour plus de 130 voies !

En 2002, il existe de multiplexeurs de 256 voies ; testés dans des laboratoires.

On ne parle alors plus de simple WDM mais de DWDM (Dense WDM) pour souligner le nombre important de longueurs d'onde transportées par une seule fibre. Pour le multiplexage en longueur d'onde, l'IUT (Union International des Télécommunications) recommande :

WDM espacement entre canaux de 0.5 à 1.0 THz (4 à 8 nm à 1.55 μ m)

Stabilisation des sources entre 2 GHz et 200 MHz

DWDM (Dense WDM) : espacement entre canaux de 100 GHz (0.8 nm à 1.55 μ m)

Stabilisation des sources entre 200 MHz et 20 MHz

HDWDM (High Dense WDM) ou maintenant appelé simplement DWDM : espacement entre canaux de 50GHz (0.4 nm à 1.55 μ m)

Stabilisation des sources <10 MHz

UDWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing) : espacement entre canaux de 25 GHz (0.2 nm à 1.55µm)

Les imperfections de la fibre optique .

II.8 Les Imperfections De La Fibre Optique

II.8.1 L'affaiblissement

Lorsqu'un signal se propage le long d'une fibre, il perd de sa puissance : ce phénomène est appelé l'affaiblissement.

Dans une fibre donnée, l'affaiblissement dépend de la longueur d'onde utilisée, et de la distance parcourue. D'une manière générale, l'affaiblissement est dû à la présence d'impuretés ou d'humidité dans la fibre, ainsi qu'à inhomogénéité de la silice, ou encore à des contraintes mécaniques (micro-coupures, écrasement, étirement, connectique,...)

La formule s'établi comme suit :

$$A(dB/Km) = 10\log \frac{P_{\text{entrée}}}{P_{\text{sortie}}(a'1Km)} \quad (II.2)$$

Cependant en fibre optique, on parle également de la puissance optique issue de la puissance électrique. Elle s'exprime en dBm par la relation :

$$P_{\text{optique}}(dBm) = 10\log(p/1m\theta) \quad (II.3)$$

II.8.2 L'atténuation

L'atténuation est une caractéristique qui a double origines intrinsèque et extrinsèque. Le deuxième type d'atténuation est essentiellement due aux imperfections des techniques de fabrication ainsi qu'aux raccordements.

L'atténuation est souvent exprimée en décibel (Db) par la relation suivante :

$$\alpha_{Tot}(dB) = 10\log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (II.4)$$

L'atténuation représente la somme des pertes dans la fibre. Ces pertes sont de différentes natures :

- liées à la nature et à la structure du matériau constituant la fibre :
- ✓ pertes par absorption.
- ✓ pertes par diffusion.
- ✓ couplage de modes.

- Liées à la structure du câble contenant la fibre.
- Courbures et micro courbures.

II.8.3 La dispersion

Le phénomène de dispersion se traduit par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation. Cet élargissement limite de la bande passante du canal de transmission. Selon la condition :

$$\beta_{Tot} \leq \frac{1}{2\sigma} \quad (\text{II.5})$$

Où :

σ Représente l'étalement de l'impulsion

Il existe deux types de dispersion :

II.8.3.1 Dispersion chromatique

Dans les fibres monomodes qui résulte de la différence de vitesse de groupes des différentes composantes spectrales du signal à transmettre.

II.8.3.2 Dispersion modale

Qui résulte la différence des temps de propagation des différents modes qui se propage dans une fibre multimodes.

II.9 La Bande Passante

La bande passante est la fréquence maximum pour laquelle le signal transmis subit un affaiblissement de 3 dB . Elle s'exprime en MHz.km, et est inversement proportionnelle à la longueur de la liaison.

II.9.1 Exemple

Une fibre de 2 km possède une bande passante de 200 MHz.km à 850 nm.

Elle possède une bande passante effective de 100MHz.

Si l'on utilise un brin de 500m, la bande passante disponible sera de 400MHz A titre indicatif :

Matériaux :

silice pure : 2 à 5 dB/km

polymère : 150 à 200 dB/km (PMMA : poly-méthyl-métacrylate)

Compléments:

- Fibre monomode (silice dopée) :

Ø du cœur : 9µm

Ø de la gaine optique : 125µm

Bande passante : supérieure à 10 GHz/km

Affaiblissement à 1310 nm : 0,5 dB/km

Utilisation : liaisons très longues distances à haut débit

- Fibre multimode à saut d'indice (silice dopée)

Ø du cœur : 100µm

Bande passante : 10 à 100 MHz/km

Affaiblissement à 850 nm : » 3 dB/km

Utilisation : liaisons » 2 km, débit » 50 Mbit/s

- Fibre multimode à gradient d'indice (silice dopée) :

Ø du cœur : 50 ou 62,5µm

Ø de la gaine optique : 125µm

Bande passante : 100 à 2000 MHz/km

Affaiblissement à 850 nm : □□3 dB/km

Utilisation : liaison longue ou à grand débit.

- Fibre polymère à saut d'indice :

Ø du cœur : 1 mm

Ø de la gaine optique : 2,2 mm

Bande passante : 25 MHz (par ex : 10 Mbits/s en NRZ sur une distance » 100 m)

Affaiblissement à 600 nm : 150 à 200 dB/km

Utilisation : pour liaisons jusqu'à 150 m. Utiles dans les milieux perturbés électro magnétiquement ou explosifs, ou pour l'affichage. Coût réduit

II.10 Les avantages et les inconvénients des fibres optiques

II.10.1 Les avantages de la fibre optique

Ils sont nombreux, 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 de portée et de capacité très supérieure à celles des câbles 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

II.10.2 Les inconvénients de la fibre optique

- ✓ 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.
- ✓ Perte de Raccordement entre différents composants optiques du système.
- Parmi les pertes de raccordement on trouve :
 - ✓ Pertes de couplage à la source : une partie seulement de la puissance émise par le laser sera captée par la fibre à cause de la désadaptation entre eux.
 - ✓ Pertes d'épissurage : Elle est due à cause d'une discontinuité de rayon, une erreur d'espacement, une erreur d'excentrement, une erreur d'alignement angulaire.

II.11 Conclusion

Parallèlement au développement des fibres optiques de silice, les progrès réalisés par les composants optoélectroniques ont permis la mise en œuvre de systèmes de transmission de plus en plus performants en termes de portée maximale, de débit d'information et de fiabilité. Ces composants sont les détecteurs optiques. On va voir en détail les caractéristiques principales de ces composants dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Les détecteurs optiques

III.1 Introduction

Le but du récepteur est d'extraire avec des moyens fiables l'information transmise à partir du signal optique reçu.

La photodétection de la lumière représente l'opération clé dans le récepteur optique. Le mécanisme de la photodétection consiste à convertir l'énergie photonique reçue en une énergie électrique sous forme de courant ou d'intensité.

La photodiode est basée sur l'effet photoélectrique c'est à dire sur la capacité d'une substance à émettre des électrons quand elle est frappée par un rayonnement lumineux. L'énergie d'un photon est $w=h \nu$. Cette énergie est croissante avec la fréquence du rayonnement lumineux.

III.2 Photodiodes

Parmi les détecteurs les plus utilisés, on retient les photodiodes PN, pin et à avalanche. Dans ce chapitre, nous donnerons un bref aperçu du fonctionnement de ces trois types des détecteurs

III.2.1 Généralité sur les photodiodes [13]

Les photodiodes sont des diodes au silicium qui exploitent l'effet photoélectrique. Sous éclairage, les photons libèrent des paires électrons trous. Sa polarisation en inverse produit un courant (I_R) qui augmente proportionnellement à l'intensité lumineuse.

Jonction PN formée d'un cristal semi-conducteur (Si, Ge) qui, lorsqu'on l'éclaire, émet un courant électrique par effet photoélectrique.

Comme pour les photorésistances, la sensibilité spectrale dépend du type de diode :

Une diode infrarouge ne détectera que très mal une lumière rouge par exemple. La directivité est également une caractéristique importante. Elle exprime la capacité d'une photodiode (mais aussi d'un phototransistor, d'une photo triac, etc...) à détecter un faisceau lumineux présentant un angle par rapport à la normale de la surface. En l'absence complète de lumière, la photodiode génère un courant appelé courant d'obscurité. Ces capteurs disposent d'une très bonne répétabilité.

Les photodiodes sont beaucoup utilisées en raison de leur grande stabilité, de leur faible encombrement, de leur coût réduit. Elles ont été par ailleurs utilisées pour développer des capteurs plus performants.

III.2.2 Les types des photodiodes [14]

III.2.2.1 La photodiode p-n

III.2.2.1.1 Principe

La photodiode pn est, comme son nom l'indique, une jonction p-n, généralement utilisée en polarisation inverse. Dans ce cas, les porteurs majoritaires sont bloqués par le champ électrique dans la zone de charge d'espace, et le courant résulte donc du passage des porteurs minoritaires à travers la jonction. Le courant est dans ce cas limité par le faible taux de génération de porteurs minoritaires dans le voisinage de jonction.

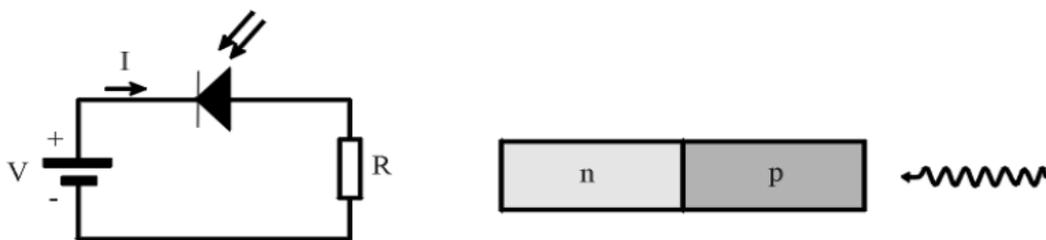


Figure III.1: Détection de lumière à l'aide d'une diode p-n polarisée dans le sens bloquant. [14]

Sous l'action de la lumière, des paires électron-trou peuvent être générées dans le semi-conducteur, si la longueur d'onde de la lumière est inférieure à

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (\text{III.1})$$

Ce qui correspond à une énergie de photons supérieure à la largeur de la bande interdite. Supposons qu'une paire électron-trou est ainsi générée dans la zone de charge d'espace. Sous l'action du champ électrique qui règne dans cette zone, le trou sera accéléré vers la zone p où il s'ajoute aux porteurs majoritaires et l'électron sera accéléré vers la zone n. Il en résulte donc une séparation de la paire électron-trou et un courant dans le sens de n vers p, c'est-à-dire une augmentation du courant inverse dans la diode.

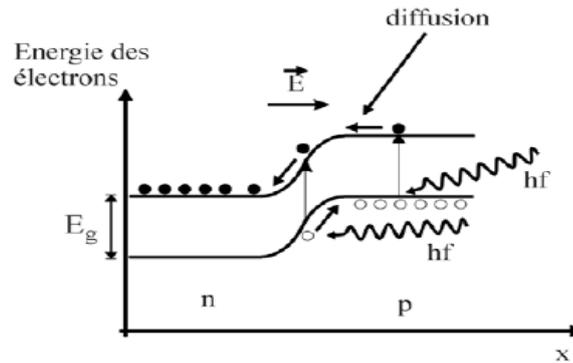


Figure III.2: Diagramme d'énergie d'une jonction p-n polarisée dans le sens bloquant.

Les paires électron-trou créées dans la zone de charge d'espace (déplétion) sont séparées par le champ électrique et donnent un courant dans le sens du champ. Des porteurs minoritaires créés dans les régions neutres contribuent au courant s'ils sont générés suffisamment près de la jonction. [14]

Regardons maintenant ce qui se passe si une paire électron-trou est créée dans le semi-conducteur de type p, près de la zone de charge d'espace. La majorité des porteurs ainsi créés diffusent de manière aléatoire sur une certaine distance avant de se recombiner: ils disparaissent donc à nouveau et ne donnent pas de courant net dans la diode. Si la paire a été créée suffisamment près de la zone de charge d'espace et si l'électron diffuse vers la jonction, il pourra éventuellement être accéléré à travers la jonction par le champ électrique qui règne. De cette manière, il passe du côté n et on obtient une augmentation du courant inverse travers la jonction. De la même manière, un trou créé du côté n pourra passer vers le côté p, et contribuer également au courant inverse dans la diode. Idéalement, le courant inverse sera proportionnel à l'intensité de la lumière et nul en l'absence de lumière. Dans ce cas, la tension aux bornes de la résistance R sera proportionnelle au courant, et donc proportionnelle à l'intensité de la lumière. En réalité, un faible courant existe même dans le noir (courant d'obscurité).

Idéalement, le courant inverse sera proportionnel à l'intensité de la lumière et nul en l'absence de lumière. Dans ce cas, la tension aux bornes de la résistance R sera proportionnelle au courant, et donc proportionnelle à l'intensité de la lumière. En réalité, un faible courant existe même dans le noir (courant d'obscurité).

III.2.2.1.2 Temps de réponse d'une photodiode pn [14]

Supposons que l'intensité lumineuse sur la photodiode augmente brusquement de 0 à une certaine valeur P . Les paires électron-trou créées dans la zone de charge d'espace sont immédiatement accélérées et provoquent donc une augmentation quasi-instantanée du courant dans la diode. Comme la zone de charge d'espace est généralement assez mince, une grande partie des photons sont absorbés en dehors de la zone de charge d'espace. Les charges ainsi créées doivent d'abord diffuser jusqu'à la zone de charge d'espace, ce qui prend un certain temps. Il en résulte une augmentation progressive du courant, et le maximum du courant est atteint avec un retard par rapport au maximum de l'intensité lumineuse. Le temps de réponse, défini comme le temps nécessaire pour que le courant augmente de 10 % à 90 % de sa valeur finale, est de l'ordre de la microseconde pour les diodes p-n habituelles. Par conséquent, ces détecteurs ne conviennent pas bien pour les applications à fréquence élevée.

III.2.2.2 La photodiode PIN

III.2.2.2.1 Principe et temps de réponse

Les diodes PIN sont les détecteurs les plus couramment utilisés avec les fibres optiques. Schématiquement, il s'agit d'un semi-conducteur intrinsèque (i.e. non dopé), pris en sandwich entre un semi-conducteur de type n et un semi-conducteur de type p. La concentration de charges libres dans le semi-conducteur intrinsèque est très faible, ce qui lui procure une résistivité élevée. Le champ électrique sera donc grand dans cette région de résistivité élevée, et faible dans les parties n et p, de résistivité plus faible.

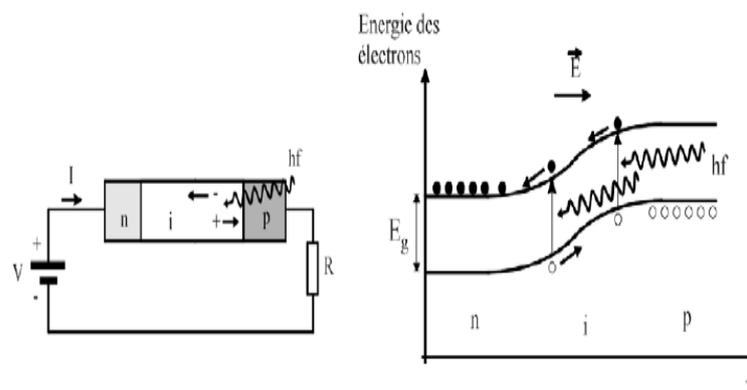


Figure III.3: Diode PIN comme détecteur de lumière et diagramme d'énergie correspondant. [14]

Par rapport à la jonction p-n simple, la zone de champ électrique non nul a été élargie par rapport aux zones conductrices, ce qui augmente la probabilité d'absorption et donc de création de paires électron-trou dans cette région. Comme les paires électron-trou sont donc créées principalement dans la zone avec champ électrique, elles ne doivent pas diffuser avant d'être accélérées, et l'augmentation du courant est plus rapide. Le temps de réponse est ici le temps nécessaire pour que les charges libres traversent la zone de déplétion (temps de transit). Il est typiquement de l'ordre de la nanoseconde. Comme la vitesse de dérive des charges est proportionnelle au champ électrique, le temps de réponse dépend de la tension appliquée à la diode. Des tensions plus élevées donnent des temps de réponse plus courts. De plus, les charges + et - sont immédiatement séparées, ce qui diminue la probabilité de recombinaison et augmente l'efficacité du détecteur.

Soit une diode PIN au silicium, avec une zone intrinsèque d'une épaisseur de 15 μm . Calculer le temps de réponse dû au temps de transit des charges à travers la zone intrinsèque si la tension appliquée est de -10 V. On donne la mobilité des charges dans le Ge: $\mu_p = 350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ et $\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$.

Comme la mobilité des trous est inférieure à celle des électrons, c'est elle qui limitera le temps de réponse. La vitesse de dérive des trous est donnée par

$$v_d = \mu_p E = \mu_p \frac{V}{d} = 350 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \frac{10 \text{ V}}{15 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 2.3 \times 10^6 \text{ cm/s} \quad (\text{III.2})$$

Le temps de réponse vaut alors

$$\tau = \frac{d}{v_d} = \frac{15 \times 10^{-4} \text{ cm}}{2.3 \times 10^6 \text{ cm/s}} = 0.6 \text{ ns} \quad (\text{III.3})$$

Le temps de transit n'est pas le seul facteur qui limite la bande passante. En effet, l'analyse de la jonction p-n a montré la présence de charges + et - se faisant autour de la jonction. Ces charges peuvent être assimilées aux charges sur les armatures d'un condensateur plan. La diode possède donc une petite capacité parasite C_d , de l'ordre du picofarad. Du point de vue électrique, cette capacité est placée en parallèle avec la diode et constitue donc une déviation possible pour le courant généré dans la diode. Supposons que le courant dans la diode varie de manière périodique, avec une fréquence f . La déviation par la capacité devient importante si la fréquence f est élevée, puisque l'impédance de C_d diminue comme $1/f$. Comparons l'amplitude de la tension qu'on aurait aux bornes de R en l'absence de la capacité parasite, avec la valeur réellement mesurée aux bornes de R. L'amplitude réelle est inférieure, puisqu'une partie I' du courant passe dans C_d . Le rapport des amplitudes vaut 0,707

quand $XC_d = R$, soit

$$\frac{1}{2\pi f C_d} = R \quad (\text{III.4})$$

On en déduit la bande passante à -3dB , en cas de limitation par la capacité parasite:

$$f_{-3\text{dB}} = \frac{1}{2\pi R C_d} \quad (\text{III.5})$$

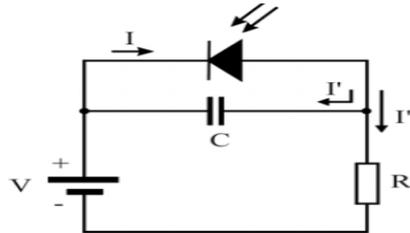


Figure III.4: Influence de la capacité parasite de la photodiode sur le courant dans le circuit de détection. [14]

III.2.2.2.2 Choix des matériaux

Le choix du semi-conducteur détermine la gamme de longueur d'onde où le détecteur peut fonctionner. La sensibilité du détecteur est un paramètre important pour l'utilisateur. Elle est définie par

$$S_d = \frac{I_s}{P_o} (A/W) \quad (\text{III.6})$$

Où I_s est le courant électrique fourni par le détecteur et P_o la puissance optique arrivant sur le détecteur (énergie du rayonnement par seconde). La sensibilité dépend de la longueur d'onde. En effet, la sensibilité augmente généralement quand la longueur d'onde augmente. Cela est dû au fait qu'on a plus de photons par watt aux grandes longueurs d'onde qu'aux petites, ce qui donne davantage de créations de paires électron-trou aux grandes longueurs d'onde. De plus, aux petites longueurs d'onde, l'absorption est plus forte dans les zones neutres, avant même que le photon n'atteigne la région intrinsèque. Toutefois, le rayonnement de longueur d'onde supérieure à λ_c peut pas créer de paires électron-trou. La sensibilité passe donc par un maximum pour une longueur d'onde légèrement inférieure à λ_c , qui dépend de la nature du semi-conducteur. La figure montre la sensibilité pour le silicium et l'InGaAs.

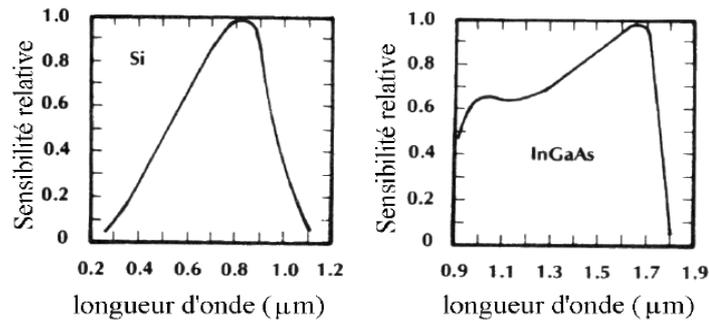


Figure III.5: Sensibilité d'une photodiode en silicium et en InGaAs, en fonction de la longueur d'onde [14]

Les courbes ont été normalisées par rapport à la sensibilité maximale. On constate que le silicium convient surtout pour les longueurs d'onde de 0,5 à 1 µm, alors que l'InGaAs peut être utilisé entre 0,9 et 1,7 µm.

Les détecteurs pour l'infrarouge à plus grande longueur d'onde nécessitent des semi-conducteurs à bande interdite étroite. Malheureusement, une bande interdite étroite implique une augmentation de la génération thermique de paires électron-trou, proportionnellement à $\exp(-E_g / kT)$, et donc un courant d'obscurité plus élevé qui peut rendre difficile la détection de faibles puissances optiques. Une solution efficace mais coûteuse et difficile à mettre en œuvre consiste à refroidir le détecteur pour réduire le courant d'obscurité.

III.2.3 La photodiode à avalanche [14]

Si on reprend la diode PIN mais qu'on lui applique une tension inverse élevée, on obtient un champ électrique intense dans la région intrinsèque, aussi appelée région semi-isolante. Si le champ est suffisamment intense, de l'ordre de quelques 105 V/cm, les charges générées dans la zone semi-isolante peuvent acquérir suffisamment d'énergie pour ioniser un atome neutre. De cette manière, une nouvelle paire électron-trou est créée, et le processus peut continuer. Pour chaque paire créée par l'absorption d'un photon, on obtient ainsi M paires au total: on dit qu'il y a multiplication des paires électron-trou par avalanche. Par rapport à une diode PIN sans multiplication par avalanche, on obtient donc un gain en courant égal à M.

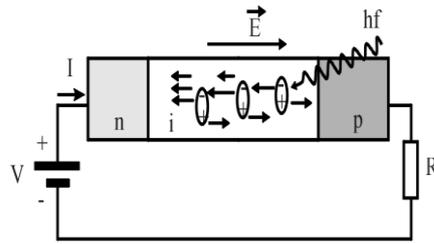


Figure III.6: Multiplication par avalanche des paires électron-trou dans la région intrinsèque dans une diode PIN polarisée dans le sens bloquant. [14]

Pour atteindre les champs intenses nécessaires à la multiplication par avalanche dans une diode PIN dont la région intrinsèque a en général une épaisseur de l'ordre de 20 – 40 μm , il est nécessaire d'appliquer une tension de l'ordre de 500 V. Ceci est difficile à mettre en œuvre dans des circuits miniaturisés de faible consommation. Une solution serait de réduire l'épaisseur de la zone intrinsèque, mais celle-ci doit rester de l'ordre de $1/\alpha$ (α = coefficient d'absorption de la lumière) pour obtenir une génération de paires électron-trou suffisante. La diode $p^+\pi p$ est une variante de la diode PIN qui combine une couche d'absorption suffisamment épaisse avec une zone de multiplication étroite. Les régions p^+ et n^+ sont les zones déjà connues de la diode PIN. Elles sont fortement dopées pour avoir une résistivité faible. Les zones π sont très légèrement dopées, "presque intrinsèques". La chute de potentiel est localisée principalement entre les régions p et n^+ , à travers la région π étroite. En effet, on n'obtient presque pas de chute de potentiel entre une zone p et une zone p^+ . Par conséquent, le champ électrique est intense dans la zone π étroite.

L'absorption a lieu principalement dans la zone π épaisse. Les trous générés se déplacent vers la zone p^+ où ils sont collectés et contribuent au courant inverse. Les électrons se déplacent dans le sens contraire au champ électrique. Quand ils atteignent la zone p entre les deux zones π , ils sont accélérés vers la zone π étroite où le champ est intense. La multiplication par avalanche se produit alors dans cette zone étroite, et les charges sont séparées sous l'action du champ électrique. Comme la région de multiplication est étroite, une tension faible suffit pour produire le champ nécessaire à la multiplication.

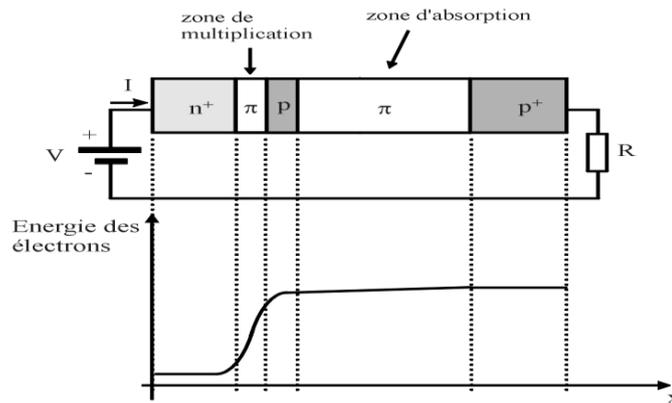


Figure III.7: Photodiode à avalanche $p+\pi r\pi n+$ comme détecteur de lumière et diagramme d'énergie des électrons correspondant. [14]

Les photodiodes à avalanche offrent une très bonne sensibilité, de l'ordre de quelques dizaines d'A/W, soit 20 à 100 fois plus qu'une diode PIN. Elles sont linéaires pour des puissances optiques entre une fraction de nano watt et quelques μW . Pour des puissances supérieures, une diode à avalanche n'est pas nécessaire: une simple diode PIN ou pn suffit. Leur bande passante est élevée, avec un temps de montée de l'ordre de quelques 100 ps.

III.3 Conclusion

Les photodiodes sont des capteurs très utilisés dans de nombreux domaines l'industrie et de la recherche. Elles peuvent être utilisées dans de larges gammes d'application grâce à leur sensibilité et leur vitesse élevée.

Les photodiodes sont devenues indispensables pour réaliser les systèmes de télécommunication toujours plus performants qui sont la clé de l'économie mondiale contemporaine. Dans le dernier Chapitre on va entamer la partie simulations et résultats de notre travail.

Chapitre IV : Simulations et résultats

IV.1 Introduction

Après avoir étudié dans les chapitres précédents les différentes caractéristiques des composants optoélectroniques et la chaîne de transmission optique, on se propose dans cette partie de simuler quelques propriétés des composants notamment les sources optiques en utilisant le langage MATLAB.

IV.2 MATLAB [15]

MATLAB (« *matrix laboratory* ») est un langage de programmation de quatrième génération et un environnement de développement ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB (environ un million en 2004¹) sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. Matlab peut s'utiliser seul ou bien avec des *toolbox* (« boîte à outils »).

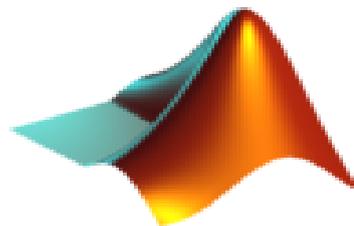


Figure IV.1 : Logo de MATLAB.

IV.2.1 Syntaxe [15]

Le logiciel MATLAB est construit autour du langage MATLAB. Une interface en ligne de commande, qui est un des éléments du bureau MATLAB, permet d'exécuter des commandes simples. Des séquences de commandes peuvent être sauvegardés dans un fichier texte, typiquement avec l'éditeur MATLAB, sous la forme d'un « script » ou encapsulé dans une fonction

IV.2.2 Vecteurs/matrices [15]

Comme son nom l'indique, l'intérêt de MATLAB est de pouvoir manipuler facilement des tableaux à une dimension (« vecteur » dans le vocabulaire MATLAB) ou deux dimensions (« matrices ») ou plus. Par défaut, toutes les variables sont des tableaux, MATLAB permet de faire de la programmation matricielle .

IV.2.3 Outils et modules [15]

MATLAB est complété par de multiples boîtes à outils (liste complète accessible ici). Parmi les plus importantes, on trouve :

- Communications Toolbox
- Control System Toolbox
- Excel Link
- MATLAB Compiler
- Neural Network Toolbox
- Optimization Toolbox
- Parallel Computing toolbox
- Real-Time Workshop®, renommé commercialement SimulinkCoder¹¹
- Robust Control Toolbox
- SimMechanics
- SimPowerSystems
- Simulink
- Statistics Toolbox
- System Identification Toolbox
- Virtual Reality Toolbox

IV.3 Diode DEL

La figure IV.2 présente la variation de la longueur d'onde en fonction de l'énergie de la bande interdite

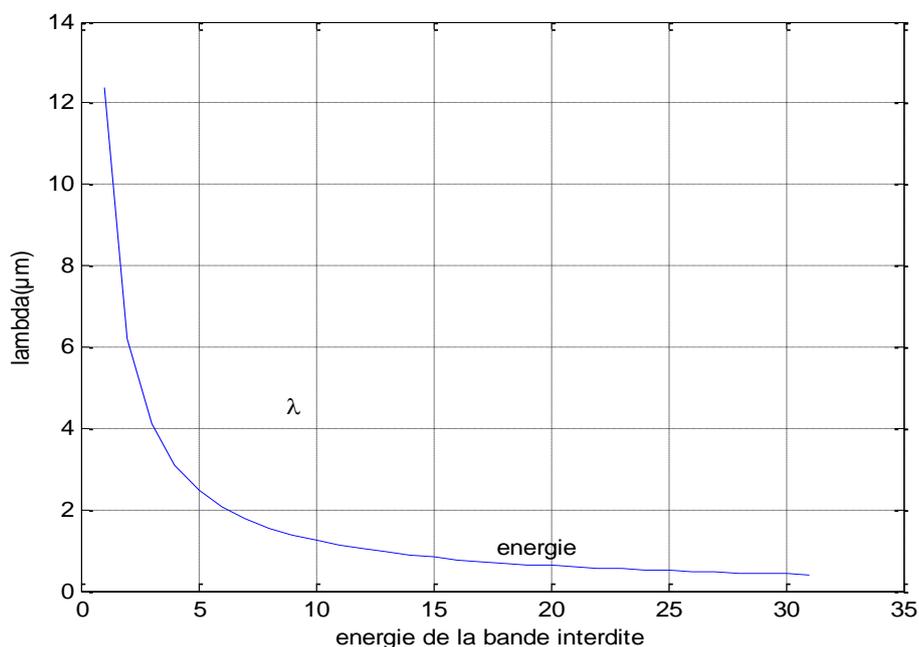


Figure IV .2: variation de la longueur d'onde en fonction de GAP.

On remarque que c'est une fonction décroissante. Autrement dit ; la longueur d'onde est inversement proportionnelle à l'énergie de la bande interdite.

La figure IV.3 présente le nombre de photons en fonction de courant pour une diode DEL

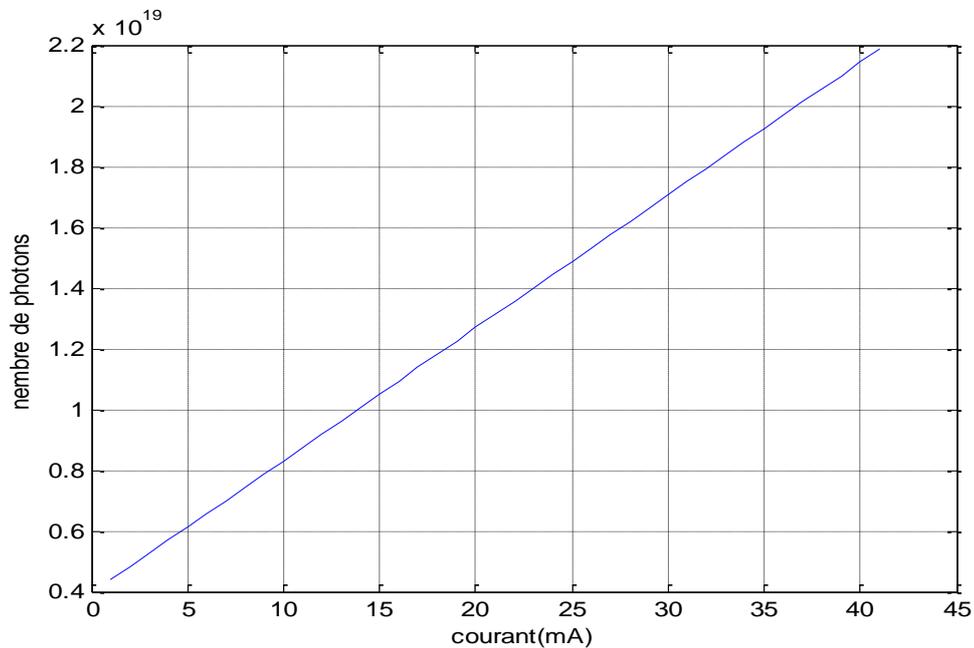


Figure IV.3: le nombre de photons en fonction de courant.

La courbe IV.3 présente une bonne linéarité du flux lumineux en fonction du courant alimentant la diode électroluminescente.

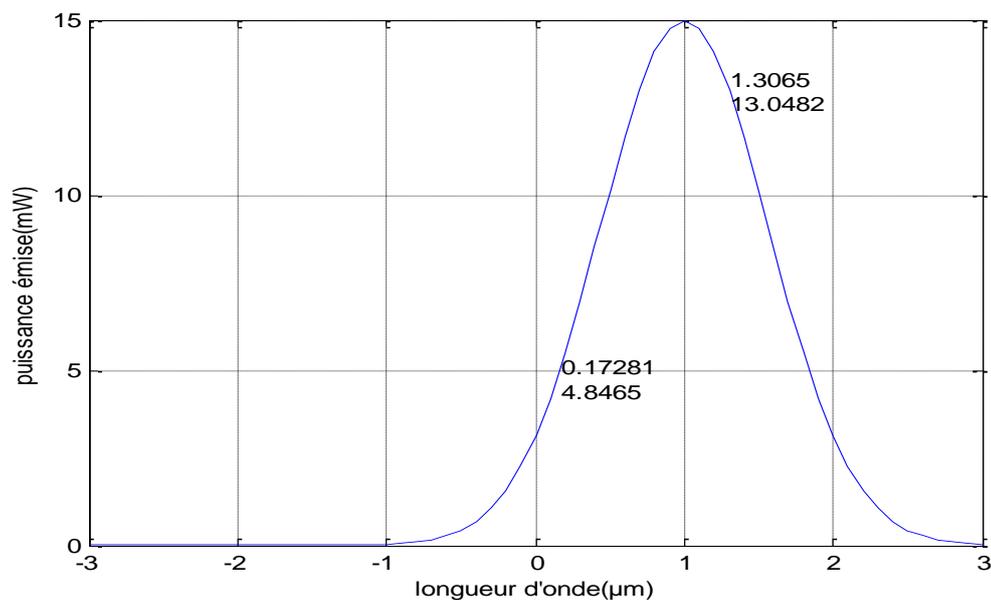


Figure IV.4: puissance émise par une DEL en fonction de la longueur d'onde.

Selon la figure IV.4, on remarque que la distribution spectrale d'émission ($\Delta\lambda$) d'une diode DEL est centrée autour de la longueur d'onde ; on constate que le spectre d'émission ($\Delta\lambda$) d'une diode DEL est relativement étroit.

IV.4 Diode LASER

La figure IV.5 présente le nombre fonction de transfert d'une diode laser Fabry-Perot

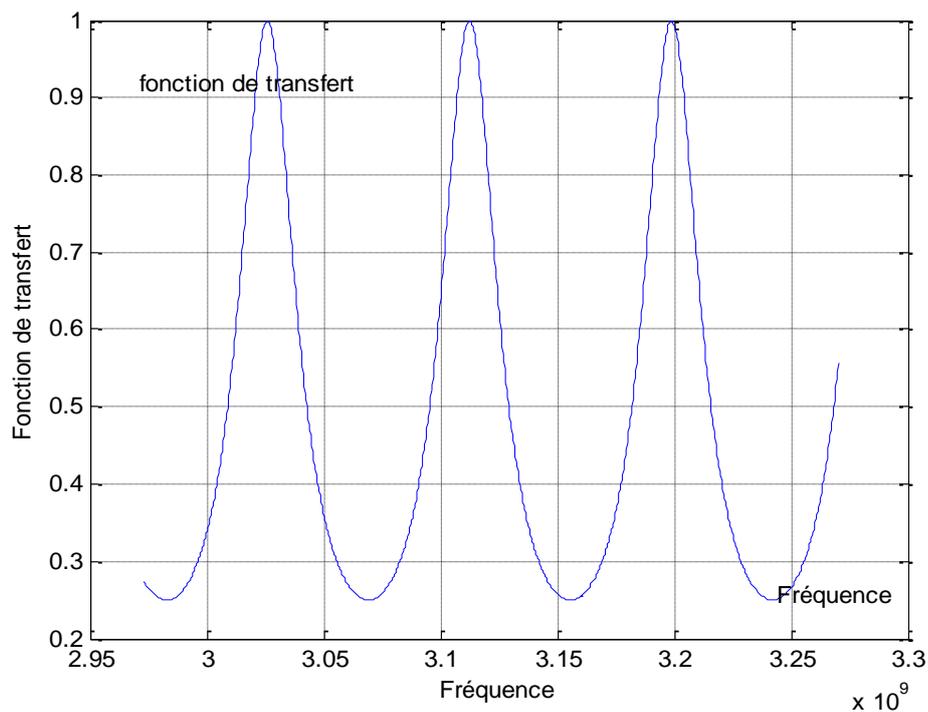


Figure IV.5: fonction de transfert d'une diode laser Fabry-Perot.

La figure IV.5 montre comment l'impulsion passe à travers le modulateur lorsque s'ouvre à chaque tour de cavité

La figure IV.6 présente la variation de bruit thermique en fonction de la température d'une diode LASER.

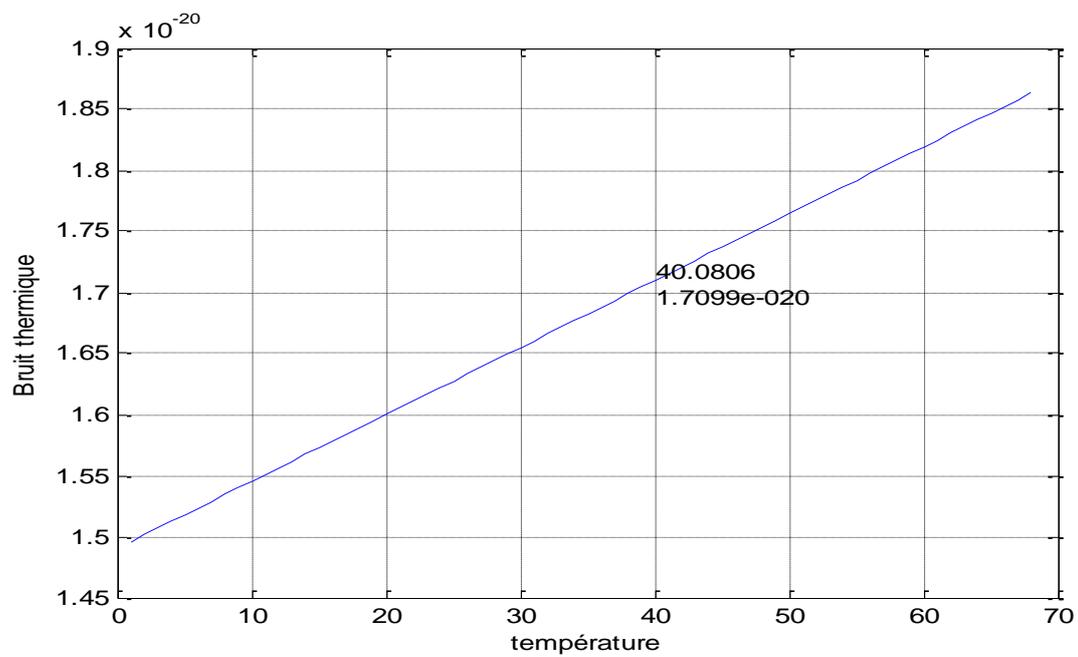


Figure IV.6: le bruit thermique en fonction de la température.

La courbe présente une bonne linéarité le bruit thermique d'une diode LASER en de la température.

La figure IV.7 présente la variation de bruit total en fonction de la puissance reçue d'une diode LASER.

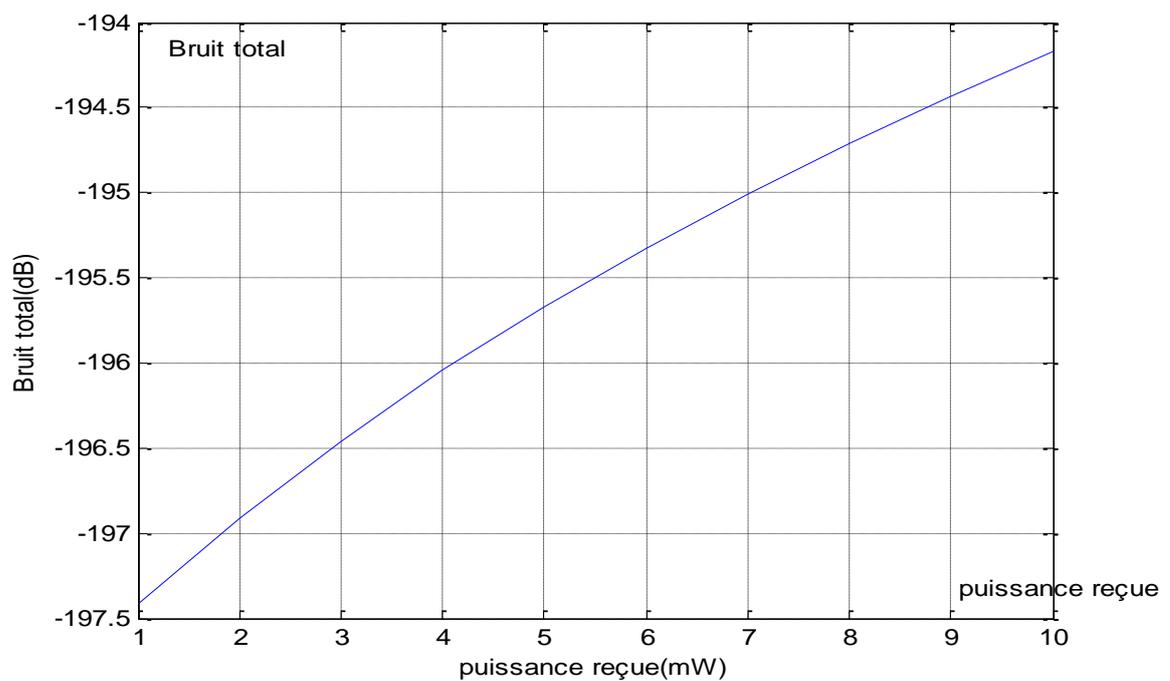


Figure IV.7: le bruit total en fonction de la puissance reçue.

Selon la figure IV.7, on remarque que le bruit total augmente proportionnellement avec la puissance reçue d'une diode LASER.

La figure IV.8 présente le rapport signal sur bruit (SNR) en fonction de la puissance reçue d'une diode LASER.

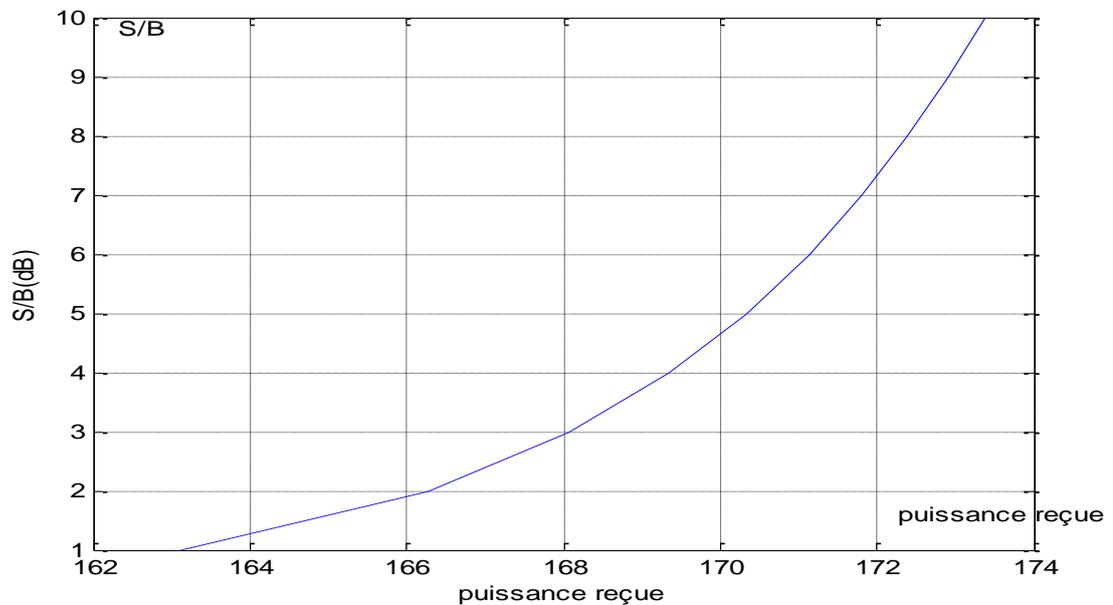


Figure IV.8: le SNR (S/B) en fonction de la puissance reçue

Selon la figure IV.8, On remarque une courbe logarithmique croissante, le SNR augmente proportionnellement avec la puissance reçue.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Pour terminer ce mémoire il ne faut pas oublier de mentionner les bénéfices acquis par ce travail de fin d'étude dont on a fixé pour objectif de modéliser et simuler les composants constituant une liaison optique.

Tout d'abord, ce travail nous a permis de renforcer et enrichir nos connaissances théoriques dans le domaine optique notamment les composants optoélectronique. En effet, comme vous avez pu le constater, la partie théorique de notre rapport occupe une place très importante.

On a fait une étude pour les différents composants de chaîne de communication optique afin de pouvoir déterminer des modèles simples de chaque partie de la liaison point à point. Ce travail était également une occasion pour maîtriser plusieurs aspects de transmission optique.

D'autre part, pour simuler les modèles qu'on a pu réaliser on a dû familiariser avec le logiciel de simulation. On a simulé des programmes pour les caractéristiques des composants optoélectroniques tandis qu'on a utilisé le MATLAB.

Enfin, ce projet de fin d'étude m'a permis de réaliser un travail très concret, avec des objectifs clairs et bien définis et de familiariser avec d'autres travaux de recherche .

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1: Caractéristique de transfert.....	6
Figure I.2: Spectre d'émission d'une DEL.....	7
Figure I.3: Schéma de principe de laser.....	8
Figure I.4: Absorption stimulée.....	9
Figure I.5: Emission spontanée.....	10
Figure I.6: Emission stimulée.....	10
Figure I.7: Miroir diélectrique.....	12
Figure I.8: Spectre d'émission d'une LASER DFB.....	14
Figure I.9: Fonction de transfert du LASER.....	14
Figure II.1: Constitution d'une fibre optique.....	18
Figure II.2: Les différents types des fibres.....	19
Figure II.3: Fibre a' saut d'indice.....	20
Figure II.4: Dispersion modale de la fibre optique multimode.....	20
Figure II.5: Fibre a' gradient d'indice.....	21
Figure II.6: Fibre monomode.....	21
Figure II.7: Ouverture numérique.....	22
Figure II.8: Affaiblissement du signal lumineux avec les fenêtres en fonction de longueur d'onde.....	23
Figure II.9: Schéma de principe d'une liaison WDM/DWDM.....	24
Figure III.1: Détection de lumière à l'aide d'une diode p-n polarisée dans le sens bloquant.....	31
Figure III.2: Diagramme d'énergie d'une jonction p-n polarisée dans le sens bloquant.....	32
Figure III.3: Diode PIN comme détecteur de lumière et diagramme d'énergie correspondant.....	33
Figure III.4: Influence de la capacité parasite de la photodiode sur le courant dans le circuit de détection.....	35
Figure III.5: Sensibilité d'une photodiode en silicium et en InGaAs, en fonction de la longueur d'onde.....	36
Figure III.6: Multiplication par avalanche des paires électron-trou dans la région intrinsèque dans une diode PIN polarisée dans le sens bloquant.....	37

Figure III.7: Photodiode à avalanche $p^+n^+p^+n^+$ comme détecteur de lumière et diagramme d'énergie des électrons correspondant.....	38
Figure IV.1: Logo de MATLAB.....	40
Figure IV.2: Variation de la longueur d'onde en fonction de GAP.....	41
Figure IV.3: Le nombre de photons en fonction de courant.....	42
Figure IV.4: Puissance émise par une DEL en fonction de la longueur d'onde.....	42
Figure IV.5: Fonction de transfert d'une diode laser Fabry-Perot.....	43
Figure IV.6: Le bruit thermique en fonction de la température.....	44
Figure IV.7: Le bruit totale en fonction de la puissance reçue.....	44
Figure IV.8: Le SNR (S/B) en fonction de la puissance reçue.....	45

Table des acronymes et abréviations

Table des acronymes et abréviations

Acronymes	Signification anglaise	Traduction française
DB		Duobinaire
DEL		Diodes Electro Luminescentes
DFB	Distributed Feed Back	
DL		Diode Laser
DWDM	Dense-Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage dense en longueur d'onde
EAM	Electro-Absorption Modulator	Modulateur à électro-absorption
HDWDM	High Dense Wavelength Division Multiplexing	
IUT	International Union Télécommunication	International union des telecommunication
MRF		Multiplexage Par Répartition
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage en longueur d'onde

Références bibliographiques

Références bibliographies

- [1] Irène et Michel Joindot et douze co-auteurs :« *Les télécommunication par fibre optique* ». Edition Dunod 1996.
- [2] Jean-Louis VERNEUIL. « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s». Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, 2003.
- [3] Michel JOINDOT et Irène JOINDOT. « *Fibres optiques pour télécommunications* », Techniques de l'Ingénieur, E 7 110, Mai 1999.
- [4] Berkane DYA. «*Etude de la propagation optique dans une structure de fibre optique en présence de microdéformations périodiques*». Mémoire de Magister de l'Université de Batna, 2006.
- [5] <http://www.futura-sciences.com/>
- [6] res-nlp.univ-lemans.fr
- [7] Yann FRIGNAC. « Contribution à l'ingénierie des systèmes de transmission terrestres sur fibre optique Utilisant le multiplexage en longueur d'onde de canaux modulés a débit de 40Gbit/s » Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieur des Télécommunication, Avril 2003.
- [8] Monique Thual. Cours « Télécommunication optiques, Composants actifs, télécoms optiques ». Option génie des télécom et réseaux, année 2004,2005
- [9] Benamer Sarah. « *Caractérisation du filtrage dans une liaison optique à Base du logiciel COMSIS*». Mémoire de Magister de l'Université de Sidi Bel Abbes, 2007
- [10] Shandi Eugène «Transmission sur la fibre optique». Cours gratuit de télécommunications (<http://www.mongosukulu.com>).
- [11] CHERFAOUI Fayçal, ZEMANI Cherh Eddine «Liaison par fibres optiques à haut débit Etude de la Topologie en Anneau Optique» projet e fin d'étude, Institut de télécom Tunisie , 2003.
- [12] Franck PAYOUX, « Etude des réseaux d'accès optiques exploitant le Multiplexage en longueurs d'onde », Soutenue le 28 Août 2006, l'Ecole nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne.
- [13] www.osioptoelectronics.com.
- [14] www.bibsciences.org.
- [15] <http://fr.wikipedia.org>.