

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 Télécommunications



Mémoire de Fin d'Etudes de
MASTER ACADEMIQUE

Filière :

Télécommunications

Spécialité :

Réseaux & Télécommunications

Par

Nadia BOUKELLAL

Thème

Etude des émetteurs et récepteurs optiques

Soutenu le : 26/06/2024

Devant le jury :

Président :	Mr. OUADAH Mohammed Chamse Eddine	MCA	Ummto
Promoteur :	Mr. ZOUAK Belkacem	MCB	Ummto
Examineurs :	Mme. HAMMAR Karima	MAB	Ummto

2023/2024

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu, le tout puissant de m'avoir donnée la santé, le courage, la patience et la volonté tout au long de mon parcours.

Je remercie mon encadrant, Monsieur ZOUAK Belkacem, pour son aide, pour ses remarques objectives. Sa disponibilité et ces conseils avisés ont été d'une grande valeur pour la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciement aux membres de jury Monsieur OUADAH Mohammed Chamse Eddine et Madame HAMMAR Karima pour leur intérêt pour mon travail, en acceptant de lire et de juger ce mémoire.

Du fond du cœur je remercie mes parents pour leurs efforts et sacrifices qu'ils ont entrepris afin de me voir réussie. Leur soutien et leur encouragement constant ont été une source inestimable de motivation.

Merci enfin pour ceux et celles qui m'ont aidée d'une façon ou d'une autre lors de mon travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes chers parents

Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects, mes considérations et ma grande admiration pour vous. Je dis merci pour votre soutien indéfectible, vos encouragements, votre aide précieuse, votre amour et votre confiance en moi tout au long de ces années. Merci d'avoir fait de moi celle que je suis aujourd'hui.

A ma chère sœur et mes chers frères

Pour votre soutien, votre présence et votre encouragement

A mes tantes Lila et Sabiha

Pour votre aide, votre amour et votre présence. Pour toujours être là quand j'en ai besoin.

A tous ceux que m'aiment et ceux que j'aime

A toute ma famille

Nadia

Sommaire

Liste des tableaux.....	8
Liste des figures	9
Chapitre I: La lumière et la fibre optique.....	1
1 Introduction	16
2 L'optique.....	16
3 La lumière	16
3.1 Caractéristiques de la lumière	16
3.1.1 La vitesse de propagation.....	16
3.1.2 L'onde électromagnétique.....	17
3.1.3 Le spectre électromagnétique.....	18
3.2 Principe de guidage de la lumière	18
3.2.1 Réflexion	18
3.2.2 Réfraction.....	19
4 La fibre optique.....	20
4.1 Définition	20
4.2 Principe de guidage de la lumière dans la fibre optique	21
4.3 Type de fibre optique	21
4.3.1 Les fibres multimodes.....	21
A- La fibre à saut d'indice	21
B- Fibre a gradient d'indice	22
4.3.2 Les fibres monomodes	23
4.4 Les effets limitent la capacité de transmission.....	24
4.4.1 Les effets linéaires.....	24
A- Atténuation.....	24
B- La bande passante	26
C- La dispersion	27
4.4.2 Les effets non-linéaires	28
A- Effet de Kerr.....	28
B- Effet de Raman (SRS, Simulated Raman Scattering)	29
C- Effet de Brillouin (SBS, Stimulated Brillouin Scattering).....	29
4.5 L'utilisation de la fibre optique.....	29

4.5.1	Les télécommunications.....	29
4.5.2	La médecine	30
4.5.3	Les réseaux sous-marins	30
4.5.4	Les capteurs.....	31
4.5.5	Autres utilisations pour la fibre optique.....	31
4.6	Caractéristiques de la fibre optique.....	31
5	Conclusion.....	32
Chapitre II : Les émetteurs optiques		3
1	Introduction	34
2	Définition d'une liaison par fibre optique.....	34
3	Bloc d'émission.....	35
3.1	Émetteur optique (source optique).....	35
3.1.1	Diode électroluminescente	35
3.1.1.1	Définition	35
3.1.1.2	Fonctionnement.....	36
3.1.2	Diode LASER	37
3.1.2.1	Définition	37
3.1.2.2	Fonctionnement.....	37
3.1.3	Les interactions rayonnements semi-conducteurs.....	38
A-	L'émission stimulée	38
B-	L'émission spontanée.....	38
C-	L'absorption	39
3.1.4	Comparaison entre LED et LASER	39
3.2	Les techniques de modulation.....	40
3.2.1	Modulation directe	40
3.2.2	Modulation externe	40
4	Bloc de transmission	40
4.1	Les amplificateurs	41
4.1.1	Définition de l'amplificateur optique.....	41
4.1.2	Types d'amplificateurs optiques	42
A-	Amplificateur optique à semi-conducteur (SOA : Semiconductor Optical Amplifier)	42
B-	Amplificateur optique à fibre dopée Erbium (EDFA : Erbium-Doped Fiber Amplifier)	43
C-	Amplificateur de Raman (RFA : Raman Fiber Amplifier)	44
4.2	Les techniques de transmission.....	44
4.2.1	Multiplexage temporel (TDM: Time Division Multiplexing)	45
4.2.2	Multiplexage en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Multiplexing)	45

4.3	Type de transmission.....	46
4.3.1	Transmission synchrone.....	46
4.3.2	Transmission asynchrone.....	46
4.3.3	Comparaison entre synchrone et asynchrone.....	46
5	Conclusion.....	47
Chapitre III : Les récepteurs optiques		20
1	Introduction.....	49
2	Bloc de réception.....	49
2.1	Récepteur optique.....	49
2.2	Les photo-détecteurs	49
2.2.1	La photodiode PN	49
2.2.2	La photodiode PIN	50
2.2.3	La photodiode à avalanche.....	51
2.2.4	Comparaison entre la photodiode PN, PIN et APD	52
2.3	Le préamplificateur	52
2.4	L'amplification électrique.....	52
2.5	Circuit du filtrage	53
2.6	La décision	53
2.7	Récupération d'horloge.....	53
2.8	L'information détectée	53
3	Conclusion.....	53
Chapitre IV : Modélisation d'une diode LASER et d'une diode PIN		34
1	Introduction.....	55
2	Présentation du simulateur :.....	55
2.1	Interface de saisi du programme	55
2.2	Création de la géométrie	56
2.3	Caractérisation électrique.....	56
2.4	Visualisation graphique.....	56
3	Ordre des commandes	56
3.1	La spécification de la structure	56
3.2	La spécification du modèle et du matériau	57
3.3	Spécifications des méthodes numériques.....	58
3.4	Spécifications des solutions	59
4	Modélisation de l'émetteur : « diode LASER à base d'Inp/InGaAsP »	59
4.1	Principe :	59

4.2	Les étapes de spécifications des commandes.....	59
4.2.1	Etape 1 : La spécification de la structure	59
4.2.2	Etape 2 : La spécification du modèle et du matériau	60
4.2.3	Etape 3 : Spécifications des méthodes numériques.....	60
4.2.4	Etape 4 : spécifications des solutions.....	60
4.3	Résultats et discussions	61
4.3.1	La variation du gain en fonction de la tension	61
4.3.2	La variation de densité de photon en fonction de l'énergie de photon	62
5	Modélisation d'une photodiode PIN à base de silicium.....	63
5.1	Principe :	63
5.2	Spécification des commandes	63
5.2.1	La spécification de la structure	63
5.2.2	La spécification du modèle et du matériau	63
5.2.3	Spécifications des méthodes numériques.....	63
5.2.4	Spécifications des solutions	63
5.3	Résultats et discussions	64
5.3.1	La variation du courant émis en fonction de longueur d'onde	64
6	Conclusion.....	65
	Références.....	69

Liste des tableaux

Tableau I.1. La vitesse de propagation de la lumière dans différents milieux.....	17
Tableau I.2. Comparaison entre les différents types de fibre optique.....	23
Tableau I.3. Types de perte d'atténuation.....	26
Tableau II.4. Tableau comparatif entre une LED et un LASER.....	39
Tableau III.5. Comparaison entre la photodiode PN, PIN et APD.....	52

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma simplifié de la gamme des fréquences et longueur d'onde des OEM	18
Figure I.2 Réflexion d'un rayon sur une surface	19
Figure I.3 Phénomène de réflexion totale	19
Figure I.4 Réfraction d'un rayon sur une surface	20
Figure I.5 La structure d'une fibre optique	20
Figure 6 Lois de la propagation du signal dans une fibre optique	21
Figure I.7 Fibre optique à saut d'indice	22
Figure I.8 Fibre optique à gradient d'indice	22
Figure I.9 Fibre monomode.....	23
Figure I.10 Atténuation en fonction de la longueur d'onde.....	24
Figure I.11 Différentes origines des pertes par atténuation dans une fibre optique.....	25
Figure I.12 La bande passante d'une fibre optique.....	26
Figure I.13 Phénomène de dispersion modale	27
Figure I.14 Phénomène de dispersion chromatique	28
Figure I.15 Une seule paire de fibre optique transporte un débit 10 fois plus fort que 250 paires de fils de cuivre	30
Figure I.16 a- Un endoscope, b- La chirurgie	30
Figure I.17 : fibre optique pour un réseau sous-marin	31
Figure I.18 : Capteur pour mesurer la pression dans les vaisseaux sanguins.....	31
Figure II.19 : Schéma de principe d'un système de transmission optique.....	34
Figure II.20 : Emetteur optique.	35
Figure II.21 : Diode électroluminescente (LED).....	36
Figure II.22 : Spectre d'émission d'une LED.....	36
Figure II.23 : Fonctionnement d'une LED	37
Figure II.24 Diode LASER	37
Figure II.25 Fonctionnement de la diode LASER.....	38
Figure II.26 Emission stimulée.	38
Figure II.27 Emission spontanée.	39
Figure II.28 L'absorption.	39
Figure II.29 : schéma synoptique de la modulation directe	40
Figure II.30 Schéma synoptique de la modulation externe	40
Figure II.31 Types des amplificateurs selon la position dans la chaîne de transmission.	42
Figure II.32 : Principe de fonctionnement d'un amplificateur optique a semi-conducteur	42
Figure II.33 : schéma d'un amplificateur a fibre dopée.....	43
Figure II.34 : Principe de fonctionnement s'un amplificateur a fibre dopée Erbium	43
Figure II.35 : Schéma d'un multiplexeur.	44
Figure II.36 : Exemple du multiplexeur de temps	45
Figure II.37 : Exemple du multiplexage en longueur d'onde	46
Figure III.38 Récepteur optique.	49
Figure III.39 Photodiode PN	50

Figure III.40 : polarisation directe et polarisation inverse	50
Figure III.41 Photodiode PIN	51
Figure III.42 Structure d'une photodiode APD	52
Figure IV.43 Schéma synoptique du fonctionnement du simulateur	55
Figure IV.44 : Fenêtre de saisie du programme	56
Figure IV.45 : Structure d'une diode LASER.	61
Figure IV.46 : Variation du gain en fonction de la tension.....	62
Figure IV.47 : la variation de densité de photon en énergie de photon.....	62
Figure IV.48 Structure de la diode PIN.....	64
Figure IV.49 La variation du courant en fonction de longueur d'onde.	64

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

<i>EM</i>	<i>Onde Electromagnétique</i>
<i>ON</i>	<i>Ouverture Numérique</i>
<i>MMF</i>	<i>Multimode Fiber</i>
<i>SMF</i>	<i>Single Mode Fiber</i>
<i>LAN</i>	<i>Local Area Network</i>
<i>BP</i>	<i>Bande Passante</i>
<i>PMD</i>	<i>Dispersion Modale de Polarisation</i>
<i>SPM</i>	<i>Self Phase modulation</i>
<i>XPM</i>	<i>Cross Phase Modulation</i>
<i>FWM</i>	<i>Four Waves mixing</i>
<i>SRS</i>	<i>Simulated Raman Scattering</i>
<i>SBS</i>	<i>Simulated Brillouin Scattering</i>
<i>LED</i>	<i>Light Emitting Diode</i>
<i>LASER</i>	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
<i>SOA</i>	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
<i>EDFA</i>	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
<i>RFA</i>	<i>Raman Fiber Amplifier</i>
<i>TDM</i>	<i>Time Division Multiplexing</i>
<i>WDM</i>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
<i>PN</i>	<i>Positive Negative Photodiode</i>
<i>PIN</i>	<i>Positive Intrinsic Negative photodiode</i>
<i>ZCE</i>	<i>Zone de charge d'Espace</i>
<i>APD</i>	<i>Avalanche Photodiode</i>
<i>SNR</i>	<i>Signal to noise Ration</i>

Introduction Générale

Introduction générale

Les télécommunications désignent l'ensemble des techniques et des systèmes permettant de transmettre des informations sous forme de signaux électriques ou électromagnétiques. Elles incluent les communications vocales, les données textuelles, les vidéos et d'autres formes de médias. Les télécommunications modernes utilisent divers moyens comme les câbles, les satellites, les réseaux sans fil et la fibre optique. Aujourd'hui, le développement des réseaux internet connaît une croissance rapide et le moyen le plus rapide pour transmettre une information c'est la lumière. La transmission des données d'un point de départ à un point d'arrivée s'effectue à l'aide d'un guide de lumière qui est la fibre optique.

La compréhension de la nature de la lumière et ses propriétés est fondamentale pour le développement et l'optimisation des systèmes de communication optiques. Ce dernier est une technologie qui repose sur l'utilisation de la fibre optique. La fibre optique est un support de transmission de données qui utilise des fils en verre ou plastique, elle fonctionne comme un guide de lumière, permettant la transmission d'informations sous forme de signaux lumineux. Grâce à sa capacité exceptionnelle de transmettre les données, elle joue un rôle crucial dans les télécommunications pour plusieurs raisons. Parmi ces raisons nous pouvons citer : la transmission à des vitesses extrêmement élevées, transporter des signaux lumineux sur de grandes distances sans subir de pertes significative, offre une large bande passante ce qui permet la transmission de grandes quantités de données et aussi elle offre une meilleure sécurité pour les données. Egalement les fibres optiques ne sont pas affectées par les interférences électromagnétiques, ce qui garantit une transmission fiable et plus précise des données.

Toute transmission optique implique un système de transmission qui se compose de trois blocs principaux : un bloc émetteur, un canal de transmission et un bloc récepteur. L'émetteur optique utilise des sources de lumière généralement une LED ou diode LASER basée sur la jonction PN, permettant la conversion des signaux électriques en signaux optiques. Tandis que le récepteur optique utilise des photo-détecteurs comme les photodiodes PN, PIN ou à Avalanche qui permettent de convertir les signaux optiques reçus en signaux électriques.

L'objectif de ce travail est l'étude des émetteurs et récepteurs optiques utilisés dans les liaisons de transmission par fibre optique. La compréhension des phénomènes physiques et électriques régissant ces deux composants est important dans le but de pouvoir les intégrer facilement dans une chaîne de transmission optique. Pour mener à bien cette étude, nous avons structuré ce mémoire de quatre chapitres, comme suit :

Le premier chapitre présente des généralités sur l'optique, la lumière et une étude théorique sur la fibre optique traitant : son principe de fonctionnement, ces différents types ainsi que les effets qui limitent sa capacité de transmission.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des émetteurs optiques et du canal de transmission dans un système de transmission par fibre optique. Nous discuterons de leurs principes de fonctionnement ainsi que les phénomènes physiques qui se déroulent dans ces dispositifs.

Le troisième chapitre présentera une étude sur les récepteurs optiques, nous expliquerons leurs principes de fonctionnement ainsi que les phénomènes physiques qui se déroulent à l'intérieur du bloc récepteur.

Le quatrième chapitre est une modélisation de deux dispositifs émetteur-récepteur, à savoir une diode LASER à base des matériaux semi-conducteurs InP/InGaAsP et une diode PIN à base de silicium, puis nous analyserons et interpréterons les résultats de la modélisation.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale dans laquelle nous résumerons le travail effectué et nous discuterons des résultats obtenus et quelques perspectives seront établies.

Chapitre I: La lumière et la fibre optique

1 Introduction

La fibre optique est un support physique fin et souple qu'un cheveu. Elle a révolutionné le domaine des télécommunications depuis sa découverte dans les années soixante, transformant radicalement la manière dont nous transmettons et recevons l'information à la vitesse de la lumière. La fibre a apporté d'importantes améliorations en remplaçant le câble en cuivre ainsi que les paires torsadées offrant des avantages significatifs quel que soit le mode de mise en œuvre, la vitesse de transmission et la sécurité électrique, électromagnétique et industrielle. Actuellement, l'information n'est plus transmise sous forme électrique mais sous forme de signaux lumineux.

Le premier chapitre de ce travail sera consacré à une étude globale sur la fibre optique. Pour cela nous présentons l'optique ainsi que la lumière et ces caractéristiques. Ensuite nous aborderons la fibre optique, son principe de guidage, ses différents types, de même que les effets linéaires et non linéaires. Enfin, nous citerons les domaines d'utilisation de la fibre optique ainsi que ses avantages et inconvénients.

2 L'optique

L'optique est la branche de la physique consacrée à l'étude des phénomènes liés à la lumière. Ceux qui affectent à la rétine de l'œil, mais aussi à grande échelle.

On peut faire une séparation entre l'optique géométrique qui traite le trajet des rayons lumineux et dont les applications sont les instruments optiques traditionnels (lentilles, prismes), et l'optique physique traitant de la nature de la lumière, son émission, sa propagation dans divers milieux, son absorption par le milieu traversé et ces influences subies par la propagation de champs électrique et magnétiques [1].

L'optique est fondamentale dans nombreuses technologies modernes, incluant les instruments optiques (microscope), les systèmes de communications basées sur la fibre optique et les applications médicales (imagerie).

3 La lumière

La lumière représente une source d'énergie, tout comme l'électricité et la chaleur. Composée de particules microscopiques connues sous le nom de photons qui se déplace sous forme d'onde.

Il existe plusieurs formes de lumière. Celle que nous percevons est la lumière visible. Cependant, divers formes d'ondes lumineuses existent comme les infrarouges, les ultraviolets, les rayons X, ... etc. Parmi les caractéristiques qui différencie ces types : la longueur d'onde et la quantité d'énergie qu'elles transportent. Les diverses variétés de lumière sont regroupées dans ce qu'on appelle le spectre électromagnétique.

3.1 Caractéristiques de la lumière

3.1.1 La vitesse de propagation

- La lumière se propage dans des milieux transparents homogènes comme l'air, le vide, le verre et l'eau. En effet, dans le vide sa célérité est d'environ 300,000 km/s, tandis que dans l'eau et le

verre, elle ralentit à environ 200,000 km/s en raison de l'indice de réfraction n de ce milieu donné par la formule [2]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Avec :

n : indice de réfraction

c : la vitesse de la lumière dans le vide (km/s)

v : la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu considéré (km/s)

L'indice de réfraction d'un milieu généralement noté par n est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré[2].

La vitesse de la lumière dépend du milieu qu'elle traverse

Tableau I.1. La vitesse de propagation de la lumière dans différents milieux.

Milieu traverse	Le vide	L'air	Le verre	L'eau
La vitesse (km/s)	300,000	300,000	225,000	200,000

- un milieu est considéré opaque lorsque la lumière ne peut pas le traverser.

3.1.2 L'onde électromagnétique

Les ondes électromagnétiques(OEM) sont des oscillations couplées de champ électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} qui se propage à travers l'espace avec une vitesse de lumière de 300,000 km/s.

Ces ondes là, comprennent plusieurs types tels que les ondes radio, infrarouges, lumière visible...etc. Les OEM sont caractérisés par leur longueur d'onde λ et leur fréquence F , deux paramètres qui distinguent les différents types d'ondes.

- Longueur d'onde : symbolisée par la lettre grecque lambda (λ), c'est la distance parcourue par l'onde pendant une période. En résumé c'est la distance spatiale entre deux crêtes successive et qui est donnée par [3]:

$$\lambda = \frac{c}{F} \quad (2)$$

Avec :

λ : longueur d'onde (m)

C : la vitesse (m/s)

F : fréquence (Hz)

- La fréquence (F) : elle correspond aux nombres d'oscillations des ondes par seconde exprimée en hertz (HZ).

. L'angle d'incidence i_1 est égale à l'angle de réflexion i'_1 ($i_1=i'_1$).

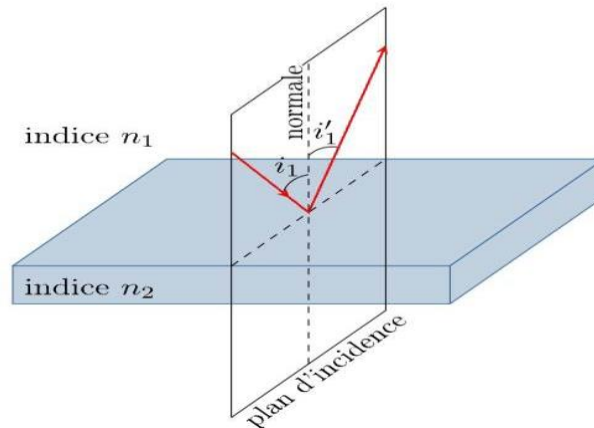


Figure I.2 Réflexion d'un rayon sur une surface [4].

Réflexion totale : Lorsque le milieu 2 est moins réfringent que le milieu 1 (c'est à dire $n_2 < n_1$) le rayon réfracté s'éloigne de la normale.

Il existe alors un angle limite d'incidence i_l tel que $i_1 = i_l$ et aussi $i_2 = \frac{\pi}{2}$, donc : $\sin(i_l) = \frac{n_2}{n_1}$. Et tel que si $i > i_l$ le rayon réfracté disparaît ; seul le rayon réfléchi existe : on parle alors de réflexion totale car toute l'énergie se retrouve dans le rayon réfléchi [4].

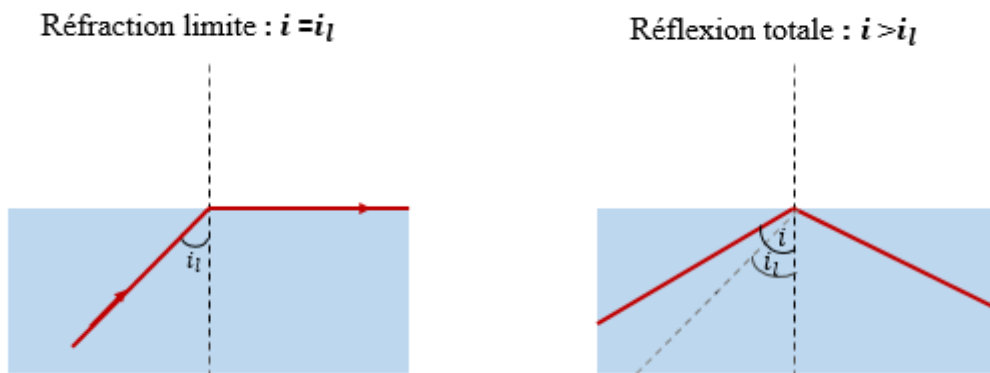


Figure I.3 Phénomène de réflexion totale [4].

3.2.2 Réfraction

La réfraction est un phénomène optique où la lumière change de direction en passant d'un milieu à un autre. Cela se produit en raison de la différence de la vitesse de propagation de la lumière dans les deux milieux.

. Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence ; on définit alors l'angle de réfraction i_2 .

. Le rayon réfracté est sous forme de : $n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$ (4)

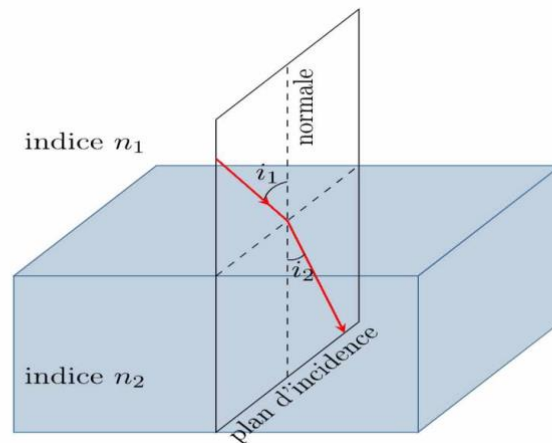


Figure I.4 Réfraction d'un rayon sur une surface[4].

4 La fibre optique

4.1 Définition

La fibre optique est un moyen de transmission de données à haute vitesse, elle utilise des fils en verre ou plastique sous forme d'un guide d'onde diélectrique à géométrie cylindrique pour transmettre la lumière sous forme de signaux lumineux. Ces signaux transportent les données numériques sur de longues distances avec le minimum de perte de signal. La fibre est composée des éléments suivants[4, 5]:

- Le Cœur : c'est la partie centrale de la fibre, composé essentiellement en silice (verre) dopé à un indice de réfraction $n_{cœur}$ avec un diamètre de 8-10 μm à 62,5 μm selon le type de la fibre, constitue le chemin principal pour les signaux lumineux.
- La Gaine : entoure le cœur et a un indice de réfraction n_{gaine} plus bas par rapport au cœur à l'ordre de 125 μm ce qui permet de réfléchir la lumière à l'intérieur du cœur par la réflexion totale interne. La gaine joue un rôle crucial dans la propagation correcte de la lumière.
- La couche protectrice : c'est une couche en plastique entoure la gaine permet d'absorber les dommages physiques tels que les chocs et les torsions, fournit une protection mécanique à la fibre avec un diamètre qui peut aller de 230 à 900 μm .

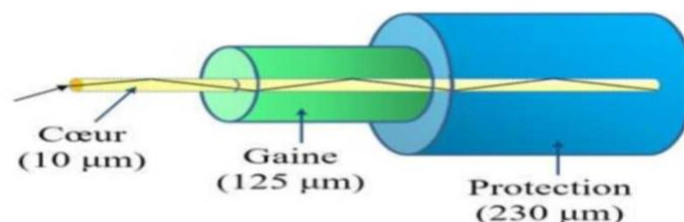


Figure I.5 La structure d'une fibre optique [5].

4.2 Principe de guidage de la lumière dans la fibre optique

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Snell Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine. Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui du cœur. L'ouverture numérique (ON) représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptre cœur – gaine de la fibre donnée par

$$[6] : ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5)$$

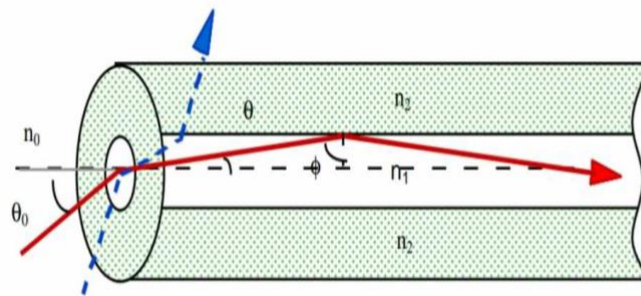


Figure 6 Lois de la propagation du signal dans une fibre optique [6].

4.3 Type de fibre optique

Il existe principalement deux types de fibre optiques : les fibres monomodes (ou SMF pour Single Mode Fibre) et les fibres multimodes (ou MMF pour Multimode fibre).

4.3.1 Les fibres multimodes

La fibre optique agit comme un guide d'onde, et si le diamètre du cœur est important la fibre est multimode[7].

Ce type de fibre permet à plusieurs modes de lumière de se propager simultanément à travers le cœur de la fibre. Cela signifie que différents rayons lumineux peuvent suivre des trajets différents à l'intérieur de la fibre. Les MMF sont souvent utilisés pour des transmissions sur des distances plus courtes, typiquement à l'intérieur des bâtiments, dans des réseaux locaux (LAN) ou pour des applications nécessitant une bande passante plus élevée sur des distances courtes[7].

Parmi les fibres multimodes, on distingue les fibres à faible indice ou saut d'indice (débit limité à 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s) [7].

A- La fibre à saut d'indice

Les fibres multimodes à saut d'indice sont les premiers types de fibres optiques créés. Elles sont caractérisées par un cœur présentant un indice de réfraction uniforme, tandis que l'interface cœur-gaine se distingue par une forte réduction de l'indice de réfraction. Ce phénomène est dû à un indice de réfraction plus faible[7].

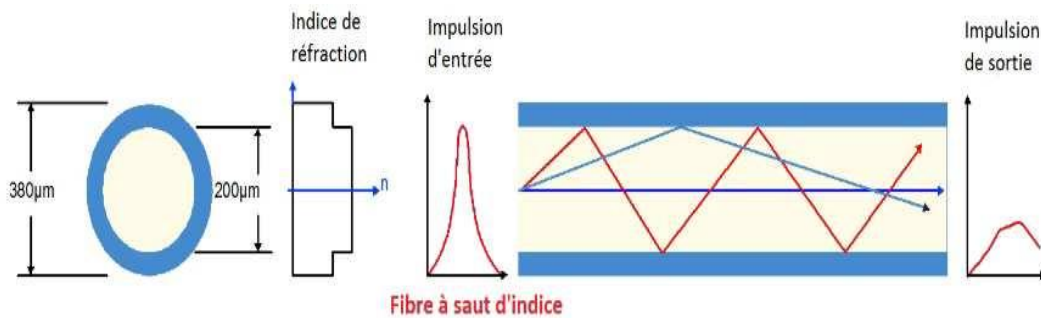


Figure I.7 Fibre optique à saut d'indice [7].

Dans ce type, la lumière se propage le long de l'axe de la fibre en zigzag selon le principe de la réflexion totale. La lumière qui pénètre dans la fibre sous différents angle d'incidence empruntera des chemins différents. Elle est utilisée dans les systèmes de communication sur de courtes distances (quelques kilomètres) [8].

B- Fibre a gradient d'indice

Ce type de fibre optique est développé en réponse aux limitations de distance. La fibre multimode à gradient d'indice est une fibre optique où l'indice de réfraction est plus élevé le long de l'axe de cœur, décroissant progressivement vers l'interface cœur-gaine. Autrement dit, l'indice de réfraction diminue de manière graduelle à partir du centre de la fibre à gradient d'indice [7].

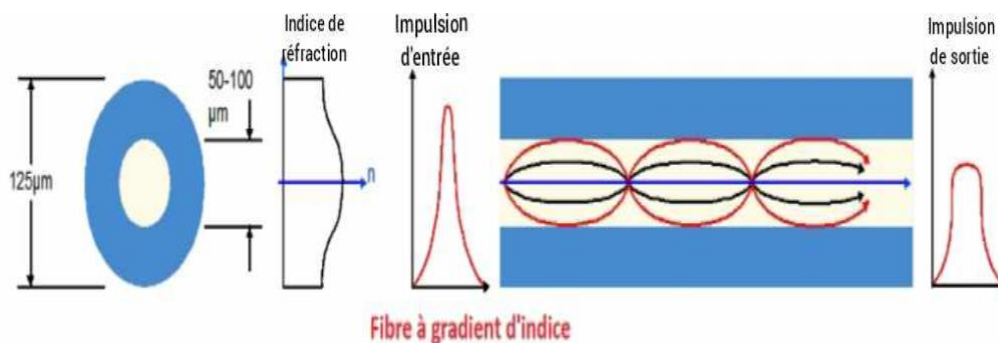


Figure I.8 Fibre optique à gradient d'indice [7].

La lumière dans ce type se propage vers l'avant sous forme d'oscillations sinusoïdale. Comme les fibres à saut d'indice, les différentes lumières d'une fibre à gradient d'indice suivent des chemins différents. Plus la lumière s'éloigne du centre de la fibre plus sa vitesse est rapide [8].

4.3.2 Les fibres monomodes

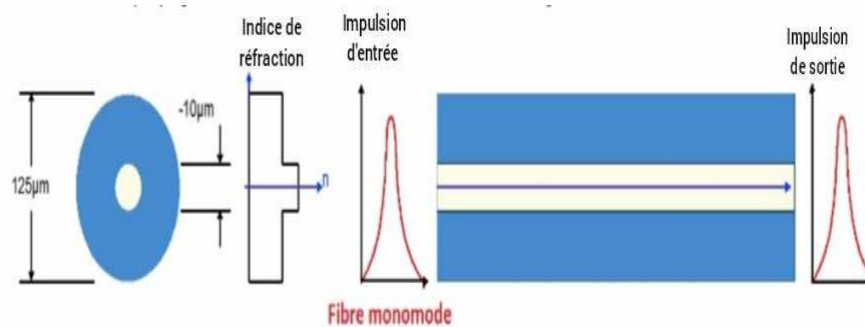


Figure I.9 Fibre monomode [7].

La fibre monomode se caractérise par un noyau optique plus fin, typiquement autour de 10micromètres, permettant à un seul mode de lumière de se propager à travers la fibre : c'est le mode en ligne droite. Cela réduit la dispersion chromatique, ce qui signifie que les différents composants de la lumière voyagent à des vitesses similaires, favorisant ainsi la transmission sur de longues distances sans perte de signal significative[7].

Cette caractéristique en fait un choix privilégié pour les réseaux de communications à grandes distances tels que les réseaux interurbains et les réseaux à fibres optique sous-marins et aussi dans les réseaux de campus. La fibre monomode offre également des débits élevés et une bande passante plus importante par rapport à la fibre multimode. Ce qui en fait une solution efficace pour les applications nécessitant une transmission de données à haut débit sur de longues distances[5, 7].

Le tableau suivant montre une comparaison entre les différents types de fibre optique

Tableau I.2. Comparaison entre les différents types de fibre optique.

Structure	Avantages	Inconvénients	Applications
Multimode a saut d'indice	-coût faible -débit 100 Mbps	-perte et distorsion du signal	-communications courtes distances -réseaux locaux
Multimode a gradient d'indice	-débit 1 Gbps -bande passante raisonnable	-difficile à mettre en œuvre	-communications courtes et moyennes distances
Monomode	-débit 100 Gbps -bande passante très grande	-prix très élevé	-communications longues distances

4.4 Les effets limitent la capacité de transmission

4.4.1 Les effets linéaires

A- Atténuation

L'atténuation, couramment se réfère à la diminution de l'intensité ou la force du signal lorsqu'il se propage à travers un médium ou un système. Cela peut s'appliquer à divers domaines tels que les signaux électriques, sonores, radiofréquences, ou optiques. En termes simples, l'atténuation mesure la perte d'énergie ou d'intensité d'un signal pendant sa transmission à travers un milieu donné[5].

La fibre optique est caractérisée par son atténuation linéique, qui est très réduite notamment par rapport à celle des câbles électriques et physiques (câbles coaxiale, câbles blindés, paires torsadées), mais qui en reste une caractéristique fondamentale.

L'atténuation est mesurée en décibels par kilomètres (dB/km) qui est le rapport de la puissance transmise dans la fibre et la puissance reçue exprimée en unité logarithmique par unité de longueur[9].

$$A[\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{p_e}{p_s} \right) \quad (6)$$

Avec:

A : atténuation (dB)

p_e : Puissance fournit par l'émetteur (watt)

p_s : Puissance fournit par le récepteur (watt)

Le choix de la fibre optique utilisée est principalement imposé par la longueur d'onde du signal transmis, la figure suivante représente le phénomène d'atténuation dans la fibre

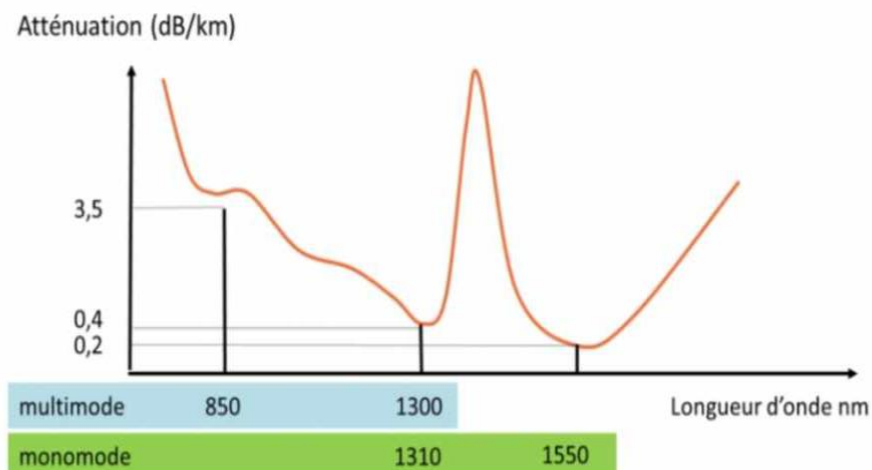


Figure I.10 Atténuation en fonction de la longueur d'onde [10].

Pour des signaux de longueur d'onde entre 850nm et 1300nm, on utilise une fibre multimode, alors que pour des signaux de longueur d'onde de 1310nm à 1550 nm, on peut utiliser une fibre monomode. Les fibres peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux fenêtres en longueur d'onde, qui correspond au minimum d'atténuation [11]:

- La « fenêtre à 1300 nm » qui a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,4 dB/km.
- La « fenêtre à 1550 nm » qui a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km.

L'atténuation d'une liaison optique provient des pertes de plusieurs origines[11] :

- Pertes intrinsèque : dépendent de la nature physico chimique de la fibre optique.
- Pertes par absorption moléculaire : elles sont causées par l'absorption des rayons optiques par la silice et les impuretés contenues dans celle-ci.
- Les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement.
- la flexion et squeeze (écrasement) lorsque la fibre est plie une partie de la lumière sera perdue.
- les pertes de diffusion sont dues aux variations microscopiques des matériaux.
- Les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordées entre elle.
- Chaque jonction peut provoquer une perte de données.

La figure 11 montre les différentes pertes d'atténuation.

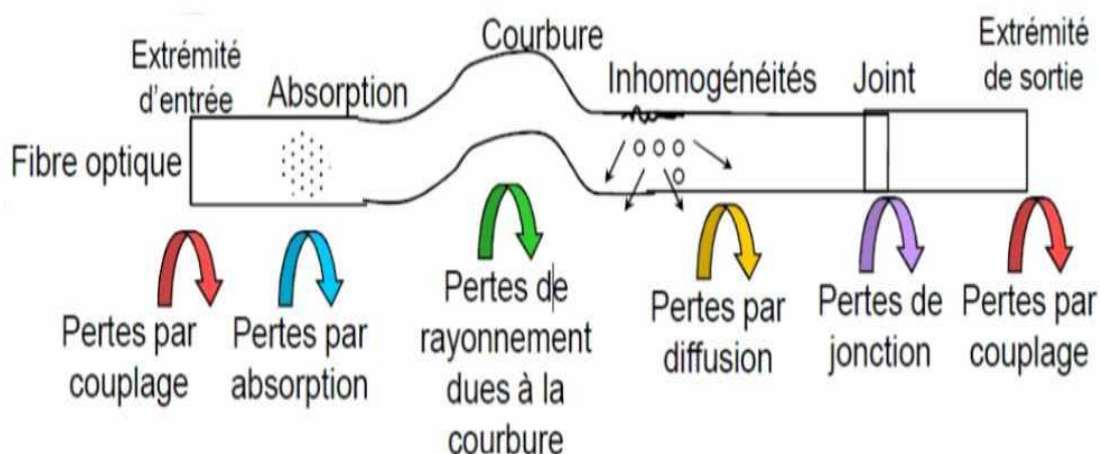
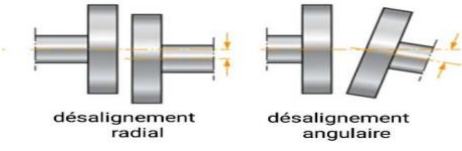


Figure I.11 Différentes origines des pertes par atténuation dans une fibre optique [11].

Le tableau suivant résume les types de pertes d'atténuations

Tableau I.3. Types de perte d'atténuation.

Type de perte	Explications
Absorption	Les photons de lumière peuvent être perdus par des atomes de matériau.
Courbure	Le pliage et torsion de la fibre.
Diffusion	Dispersion de la lumière à travers la fibre de manière non-directionnelle
Jonction	La diminution de la puissance du signal lumineux lorsqu'il traverse une jonction entre deux composants optiques.
Connexion	Désalignement de deux fibres soit radial, angulaire 

B- La bande passante

En fibre optique, la bande passante (BP) se réfère à la capacité de système à transporter un volume élevé de données sur une période donnée. Elle est souvent mesurée en hertz et détermine la quantité d'information qui peut être transmise à travers une fibre optique à une vitesse donnée. Les fibres optiques offrent une bande passante élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent prendre en charge des débits de données importants sur de longues distances sans pertes significatives de quantité de signal.

Autrement dit la Bande passante ou bandwidth est la plage des fréquences où la réponse d'un appareil est supérieure à un seuil minimal.

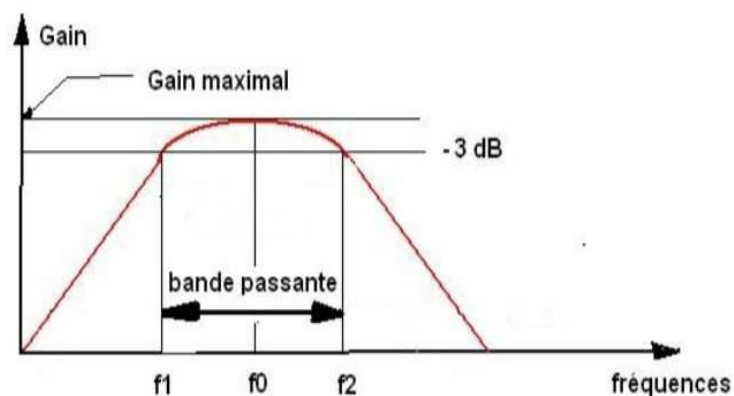


Figure I.12 La bande passante d'une fibre optique [12].

Pour déterminer la bande passante d'une fibre on trace la courbe du gain en (dB) en fonction des fréquences auxquelles elle est soumise [12] :

$$\text{Bande passante} = f_2 - f_1 \quad (7)$$

La limitation admise est située à -3 dB optique, soit -6 dB électrique, du signal transmis. La variation est de forme [7]:

$$B. L^{-\alpha} \quad (8)$$

Avec :

B = bande passante

L = longueur de la fibre

α = coefficient lié à la nature de la fibre.

Ce coefficient α varie entre 0.5 pour une fibre à mélange rapide de modes et 1 pour une fibre sans mélange de modes [7].

C- La dispersion

La dispersion dans les fibres optiques se réfère à la tendance de différentes longueurs d'onde de la lumière à se propager à des vitesses différentes à travers un matériau. La gestion de la dispersion est essentielle pour maintenir l'intégrité du signal optique, surtout sur de longues distances de transmissions.

Il existe plusieurs types de dispersion: dispersion modale, dispersion chromatique et dispersion de polarisation :

- La dispersion modale ou intermodale : cette dispersion se produit dans les fibres multimodes, où plusieurs chemins (modes) de propagation de la lumière existent. Chaque mode peut avoir une vitesse de propagation différente. Cette disparité temporelle entre les modes est la cause principale de la dispersion modale dans ce type de fibre.

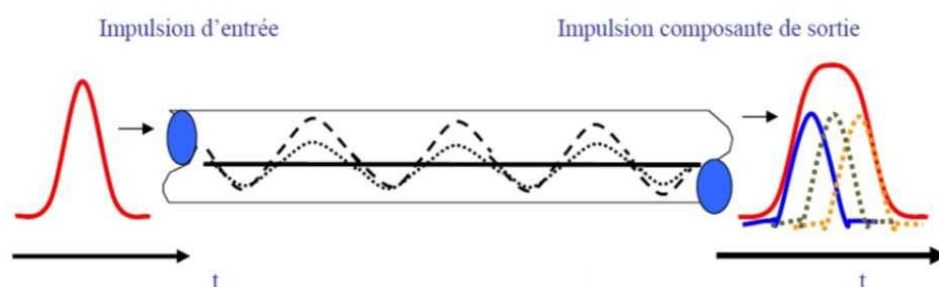


Figure I.13 Phénomène de dispersion modale [11].

Pour minimiser ce phénomène les ingénieurs optiques peuvent utiliser des techniques telles que l'utilisation des fibres à indice gradué qui permet le changement graduellement du centre vers le périphérique du cœur. Cette conception contribue à réduire la dispersion modale.

- La dispersion chromatique : la dispersion chromatique se produit en raison de la dépendance de l'indice de réfraction d'un matériau par rapport à la longueur d'onde de la lumière. Donc c'est la variation de la vitesse de propagation des différentes composantes spectrales du signal de transmission, en fait, chaque impulsion de lumière est faite d'un nombre fini de longueurs d'onde qui se propagent de façon différente (deux longueurs d'onde différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse ce qui entraîne la dispersion chromatique) [7].

Elle peut se produire dans toutes les fibres, mais elle est dominante dans la fibre monomode. La figure I.14 explique le phénomène de la dispersion chromatique

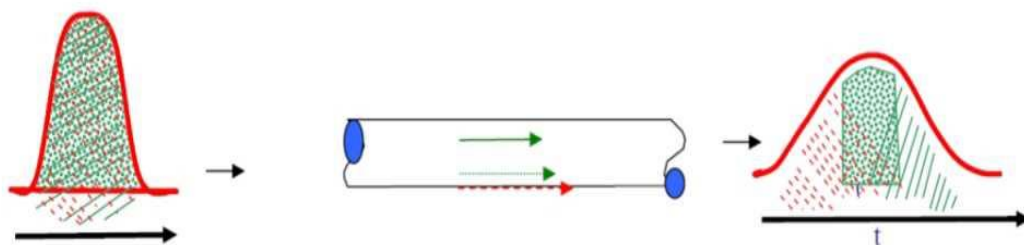


Figure I.14 Phénomène de dispersion chromatique [11].

Dans le contexte des fibres optiques, la dispersion chromatique est le résultat de deux sommes de dispersions : la dispersion du matériau, et la dispersion du guide.

La dispersion du matériau est liée aux caractéristiques du matériau utilisé pour fabriquer la fibre, La dispersion chromatique est un exemple courant de dispersion du matériau, où la vitesse de propagation de la lumière dépend de la longueur d'onde. Par contre la dispersion du guide concerne principalement la manière dont la lumière se propage dans le guide d'onde optique lui-même.

- La dispersion modale de polarisation (PMD) : est une dispersion modale pour laquelle deux modes de polarisation orthogonaux de la lumière à la même longueur d'onde se propagent à des vitesses différentes en raison de la biréfringence de la fibre, provoquant également un élargissement des impulsions lumineuses. La PMD se traduit par une gigue temporelle dont les effets sur le récepteur vont être d'autant plus pénalisants que le débit est élevé [7].

4.4.2 Les effets non-linéaires

A- Effet de Kerr

La plupart des effets non linéaires que peut subir une onde optique durant sa propagation proviennent de l'effet de Kerr. Ce dernier se produit lorsque l'indice de réfraction varie de manière non-linéaire avec l'intensité lumineuse [11].

L'effet de Kerr peut influencer un signal optique de différentes manières, se manifestant à travers trois phénomènes : l'auto modulation de phase, la modulation de phase croisée et le mélange à quatre ondes [7]:

- Auto modulation de phase : SPM (Self Phase Modulation) une seule onde est mise en jeu ici d'où le nom d'auto modulation de phase

- Modulation de phase croisée: XPM (Cross Phase Modulation) très similaire à l'auto modulation de phase ; cet effet intervient quand il y a au moins deux ondes de fréquences différentes qui se propagent simultanément dans la fibre.

-Mélange à quatre ondes : FWM (Four Waves Mixing) C'est un mélange à quatre ondes résultant de la superposition non linéaire de trois ondes continues de fréquences porteuses.

B- Effet de Raman (SRS, Simulated Raman Scattering)

L'effet de Raman est un phénomène optique non linéaire qui se produit lorsqu'un photon interagit avec les vibrations moléculaires d'un matériau. Il s'agit de l'interaction photon-phonon[7].

C- Effet de Brillouin (SBS, Stimulated Brillouin Scattering)

L'effet de Brillouin est de même principe qu'effet de Raman mais il interagit avec des phonons acoustiques. Cet effet impose une limite sur la quantité de puissance optique[7].

4.5 L'utilisation de la fibre optique

La fibre optique a révolutionné notre façon de communiquer et d'accéder à l'information. Avec sa capacité de transmettre des données à des vitesses exceptionnelles, la fibre offre une connectivité fiable et rapide dans divers domaines, influençant positivement notre vie quotidienne.

4.5.1 Les télécommunications

Les télécommunications sont probablement l'un des domaines où l'utilisation de la fibre optique est la plus répandue et a le plus d'avenir. La fibre est utilisée pour la transmission d'information, que ce soit pour les services internet, les conversions téléphoniques, la diffusion du contenu Multimédia (image, son, vidéo) ...etc. La fibre offre des performances exceptionnelles, contribuant ainsi à la modernisation et à l'efficacité des réseaux de télécommunications domaine dans lequel le fil en cuivre ne peut supporter que quelques communications à la fois en raison de sa bande passante qui est limitée, mais la fibre optique a dépassé cette contrainte. Grâce à la vitesse de la lumière qui avoisine 300 000 kilomètres par secondes, la fibre optique permet aussi la transmission rapide et efficace sur de très longues distances.

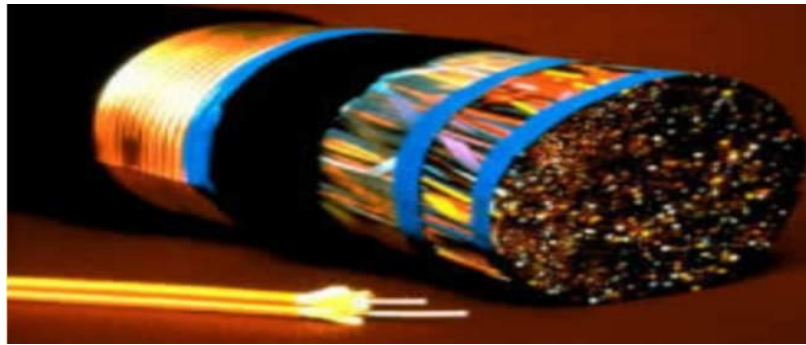


Figure I.15 Une seule paire de fibre optique transporte un débit 10 fois plus fort que 250 paires de fils de cuivre [13].

4.5.2 La médecine

En médecine, la fibre optique joue un rôle crucial en facilitant l'avancement des technologies médicales. L'utilisation de la fibre s'étend au diagnostic et au traitement. Les endoscopes à fibre optique permettent des examens internes détaillés, facilitant le diagnostic précoce de diverses affections. De plus la transmission rapide et haute résolution des images médicales par exemple améliore la précision du diagnostic. En ce qui concerne le traitement, la fibre optique est employée dans les interventions minimalement invasives, offrant des avantages tels que des incisions réduites et une récupération plus rapide pour les patients.

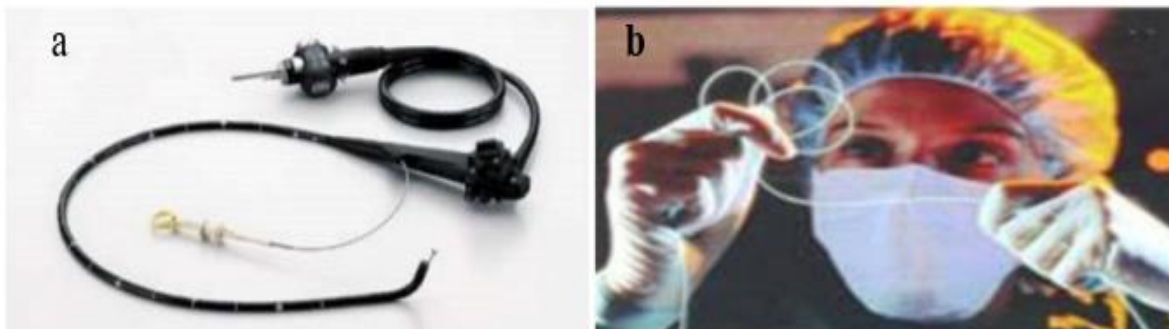


Figure I.16 a- Un endoscope, b- La chirurgie [13].

4.5.3 Les réseaux sous-marins

La fibre optique est essentielle dans les réseaux sous-marins car elle permet une transmission à haute capacité et à grande vitesse sur de longues distances avec une faible atténuation. Elle offre une large bande passante et immunisée contre les interférences électromagnétiques capable de résister aux conditions sous-marines.



Figure I.17 : fibre optique pour un réseau sous-marin

4.5.4 Les capteurs

Un domaine où la fibre optique a trouvé une application plus récemment est celui de la mesure. La fibre optique comme tout objet subit des influences de différents paramètres [13]. Ces capteurs utilisent des propriétés optiques pour détecter les variations de températures et de pression le long de la fibre. Dans des applications telles que la surveillance des infrastructures critiques, ces capteurs offrent une mesure précise et continue.

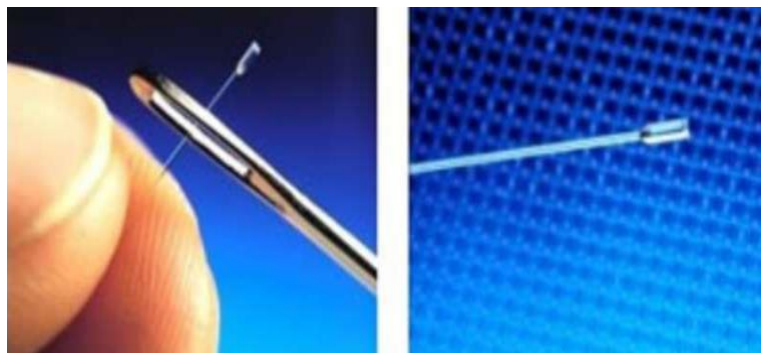


Figure I.18 : Capteur pour mesurer la pression dans les vaisseaux sanguins [13].

4.5.5 Autres utilisations pour la fibre optique

La fibre optique est utilisée dans divers domaines comme l'industrie de la défense pour des applications telles que la transmission de données sécurisées, les systèmes de surveillance avancée et les communications militaires. de plus elle est employée dans des domaines tels que la recherche scientifique, les réseaux informatiques haute performance.

4.6 Caractéristiques de la fibre optique

En comparaison avec d'autres moyens de transmission, la fibre optique offre une multitude d'avantages. Ces principaux avantages sont :

- Haute bande passante : permet le transfert rapide de grandes quantités de données. La quantité d'information qui peut être transportée par un câble à fibre optique est énormément plus élevée que les câbles métalliques (une vitesse allant jusqu'à 1.6 Tb/s dans les systèmes déployés sur le terrain et jusqu'à 10 Tb/s dans les systèmes de laboratoire) [11].
- Faible atténuation : les signaux peuvent parcourir de longues distances sans perte significative de qualité.

- Légèreté et taille réduite : un câble en Fibre est beaucoup plus petit et plus léger et occupe aussi moins d'espace que des câbles traditionnels (métalliques).
- Longue durée de vie : Le cycle de vie d'un réseau en fibre optique est d'environ 20 ans, ce qui offre alors une valeur sûre et durable économiquement pour les entreprises [11].
- Sécurité des signaux : Le signal lumineux provenant des fibres optiques ne rayonne pas de façon significative et offre donc un degré élevé de sécurité. Une forte caractéristique intéressante pour les applications demandant un niveau de sécurité élevé : systèmes militaires et bancaires [14] et difficilement en raison de l'absence de rayonnement électromagnétique externe.
- Pas d'interférence électromagnétique : la transmission par fibre optique n'est pas affectée par les interférences électromagnétiques, car la fibre optique est un matériau isolant.

Tout support de transmission a ses avantages et inconvénients, et la fibre optique ne fait pas exception, présentant elle aussi certaines limites comme :

- Pertes d'information : des pertes peuvent être causées par des courbures ou pliage du câble, des connecteurs mal positionnés (radial, angulaire), des inhomogénéités dans le verre de la fibre.
- Coût : le cout de déploiement initial de la fibre optique est élevé en raison d'installation d'infrastructures spécialisées.
- Fragilité : la fibre peut être considéré comme relativement fragile en terme de résistance physique et aux dommages mécaniques.

5 Conclusion

L'intégration croissante de la fibre optique dans nos réseaux de communication représente une avancée majeure nonseulement sur le plan quantitatif d'informations transmises mais également en termes de qualité de transmission.

Chapitre II : Les émetteurs optiques

1 Introduction

Toute transmission d'information implique un point de départ et un point d'arrivée comme tous les systèmes de télécommunications modernes. Que ce soit pour la transmission de données, de la voix ou de la vidéo. Dans ce cadre, la fibre optique a révolutionné les télécommunications en raison de sa capacité élevée de transport et sa faible atténuation, permettant ainsi de transmettre des quantités massives d'information sur de vastes distances géographiques.

Dans le cadre des systèmes de communication optique, le bloc d'émission et le canal de transmission constituent des éléments garantissant la qualité et l'efficacité de la transmission de données.

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail les composants et les technologies impliquées dans ces processus. Nous commencerons par présenter l'émetteur optique, ainsi que les deux principales sources lumineuses une LED et une diode LASER et leur fonctionnement. Nous aborderons également les différentes techniques de modulations utilisées. Ensuite, nous traiterons les amplificateurs optiques qui permettent de renforcer le signal et les techniques de multiplexages utilisées.

2 Définition d'une liaison par fibre optique

Le principe d'une liaison par fibre optique est basé sur l'acheminement des informations entre un émetteur (expéditeur) et un récepteur (destinataire), minimisant ainsi les risques de distorsion du signal envoyé pour garantir un transfert fiable et sans erreur de l'information.

La figure 19 montre le principe de transmission par fibre optique.

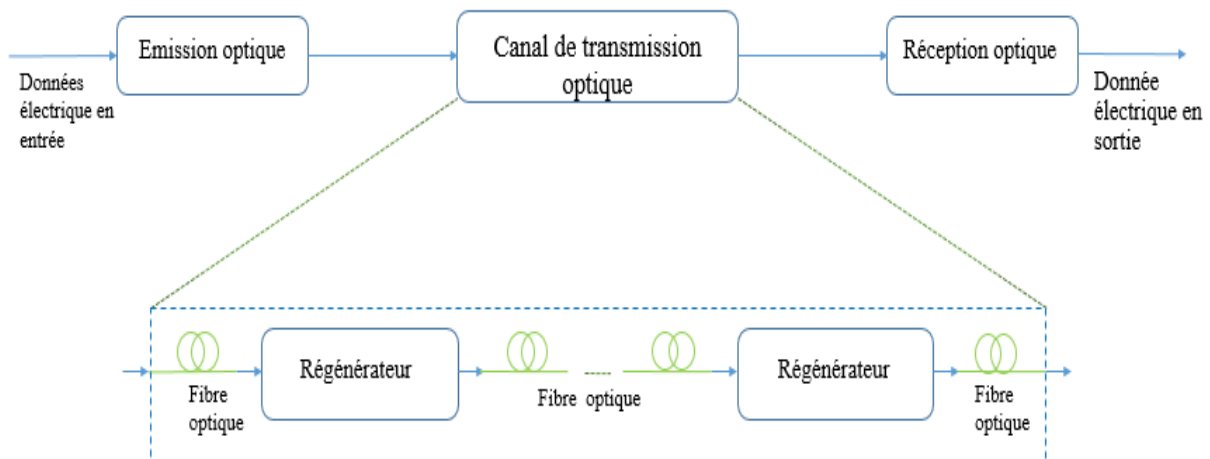


Figure II.19 : Schéma de principe d'un système de transmission optique [15].

Tous les systèmes de transmission se composent de trois blocs fondamentaux (d'un bloc émetteur, d'une série de fibres optiques séparés par des régénérateurs, et d'un bloc récepteur) pour assurer le transfert de données. Au niveau de l'émetteur, le système joue un rôle essentiel en convertissant les données en un signal optique modulé, généralement à l'aide d'une source lumineuse telle qu'une LED ou un Laser. Ensuite, par le canal de transmission optique, le signal est acheminé à travers la fibre tandis que les régénérateurs optiques sont utilisés pour renforcer le

signal minimisant les pertes sur de longues distances. Enfin, au niveau du récepteur le système accompli son rôle en convertissant le signal optique en un signal électrique à l'aide d'un photo-détecteur. Des protocoles spécifiques sont employés pour récupérer le signal, assurant ainsi une conversion précise des données transmises.

3 Bloc d'émission

3.1 Émetteur optique (source optique)

L'émetteur optique est un composant optoélectronique dans les systèmes de transmissions par fibre optique, sa fonction principale est la conversion électro-optique, c'est-à-dire la conversion de l'énergie lumineuse en énergie optique (signal électrique en un signal optique) [7].

Dans un émetteur optique, le processus de conversion du signal électrique en signal optique s'effectue généralement à l'aide d'un composant appelé modulateur optique. Ce dernier modifie la propriété optique du signal en fonctions des variations du signal électrique. Une fois modulé, le signal optique est généralement émis via une fibre optique pour la transmission des données à des vitesses élevées sur de longues distances.

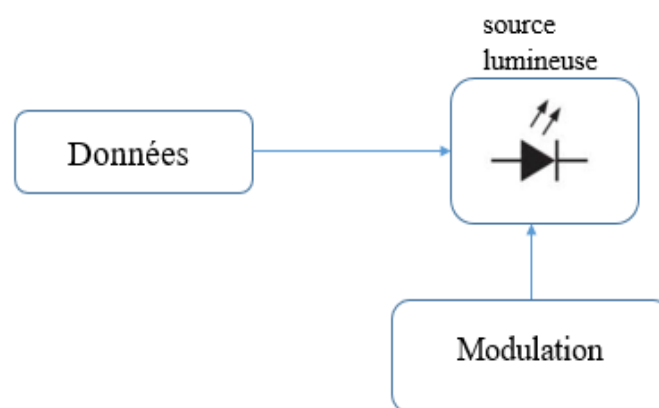


Figure II.20 : Emetteur optique.

On distingue les diodes électroluminescentes et les diodes lasers, ces deux dispositifs sont différents malgré leurs similitudes. Tous les deux réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct et basées sur la recombinaison des paires électron-trou [16].

Dans le domaine des télécommunications optiques, deux types de sources lumineuses sont utilisées : les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes LASER.

3.1.1 Diode électroluminescente

3.1.1.1 Définition

La diode électroluminescente (DEL) ou LED (Light Emitting Diode) est le composant émetteur le plus simple. Les LED sont des diodes qui émettent de la lumière quand un courant les parcourt. Elles ne sont pas constituées du silicium, mais d'autres matériaux semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium, de ce fait la tension présente à leur borne lorsqu'elles sont conductrices n'est pas 0.6V, mais elle vaut de 1.6V à 2.5V suivant la couleur de la lumière émise [17]. C'est à dire les LED utilisent des matériaux semi-conducteurs pour produire de la lumière

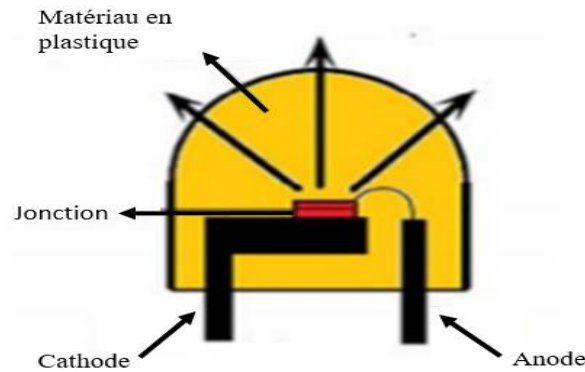


Figure II.21 : Diode électroluminescente (LED) [11].

Les diodes électroluminescentes sont basées sur l'émission spontanée de la lumière, aussi caractérisent par un large spectre et une faible directivité. Utilisées dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes en raison de sa limitation de bande passante, celui-ci les rend souvent adaptées aux systèmes de communications courte portée [4].

La figure II.21 montre comment l'intensité de la lumière varie en fonction de la longueur d'onde, indiquant la plage de longueur d'onde sur laquelle la LED émet principalement.

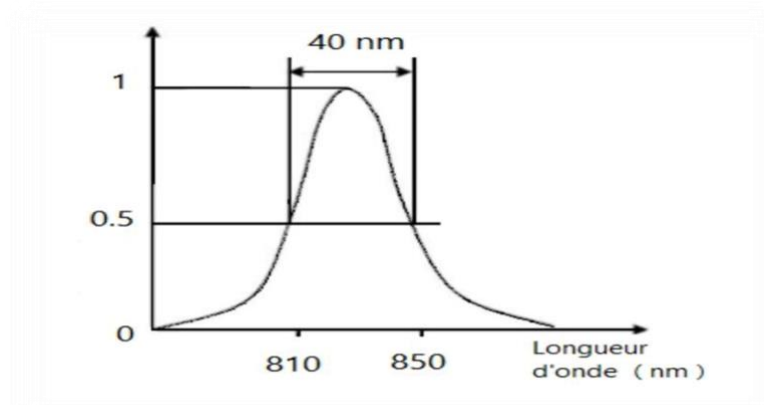


Figure II.22 : Spectre d'émission d'une LED [15].

3.1.1.2 Fonctionnement

La LED est un dispositif optoélectronique, basée sur l'action d'une jonction PN polarisée dans le sens direct, sous l'effet de la tension appliquée, les électrons de grande mobilité de la région n sont injectés vers la région p où ils sont minoritaires et se recombinent avec les trous dans une région au voisinage de la jonction p-n, limitée par leur longueur de diffusion, appelée zone active. Ils donnent ainsi lieu à un faisceau lumineux incohérent, de couleur, donc de longueur d'onde λ , conditionnée par la composition et l'état du matériau de type p dans lequel se produit l'essentiel des recombinaisons. La lumière émise peut ainsi être du domaine de radiations proche infrarouges, visibles ou ultraviolettes [11, 18]

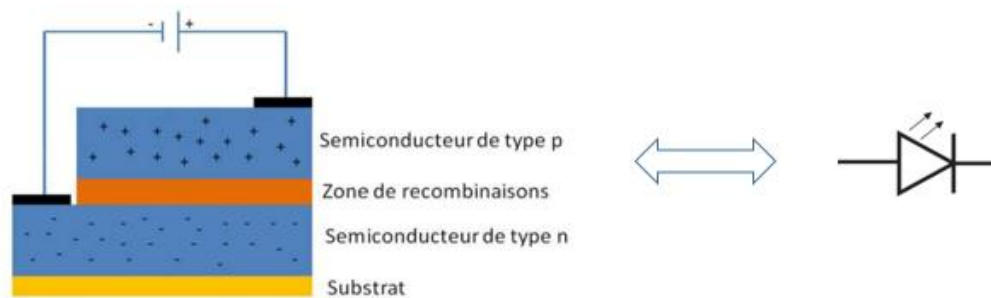


Figure II.23 : Fonctionnement d'une LED [7].

Si nous observons notre environnement, nous constaterons la présence généralisée des LEDs. Elles peuvent être trouvées en rouge, vert et jaune, utilisées dans divers produits tels que les ampoules, les téléphones, les télécommandes et tous dispositifs électroniques [19].

3.1.2 Diode LASER

3.1.2.1 Définition

Le LASER est un composant optoélectronique qui sert à l'amplification de la lumière à travers le processus de l'émission stimulée, en anglais c'est LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, qui signifie l'amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement. Son rôle dans un système de transmission consiste à générer un signal optique continu, que nous pourrions ensuite moduler. Il existe plusieurs types de lasers : les lasers à gaz, les lasers liquides, les lasers solides ou encore les lasers à semi-conducteurs [9].



Figure II.24 Diode LASER [17].

3.1.2.2 Fonctionnement

La diode LASER est similaire à la diode électroluminescente, car elle est constituée d'une jonction p-n réalisée à partir des matériaux à gap direct avec une région active où les porteurs injectés se recombinent de façon radiative, avec la production d'une lumière cohérente issue de l'émission stimulée de photons [11].

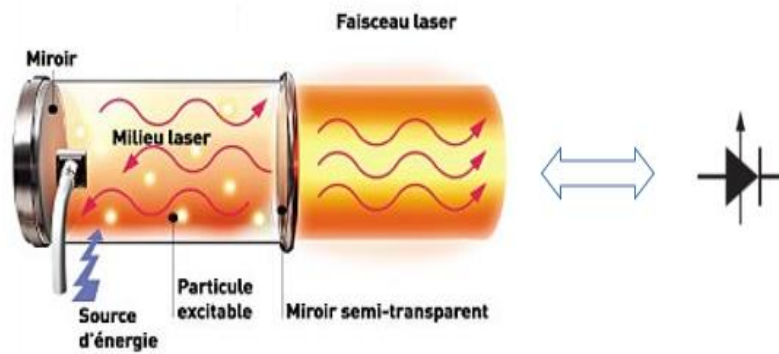


Figure II.25 : Fonctionnement de la diode LASER [19].

3.1.3 Les interactions rayonnements semi-conducteurs

L'émission de la lumière dans les dispositifs semi-conducteurs (LASER et LED) se fait de trois façons :

L'effet de l'émission stimulé, l'émission spontanée et l'absorption.

A- L'émission stimulée

L'émission stimulée concerne les diodes LASER qui émettent de la lumière de cette façon d'émission, ou elle joue un rôle crucial dans l'amplification cohérente de la lumière. L'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde [7].

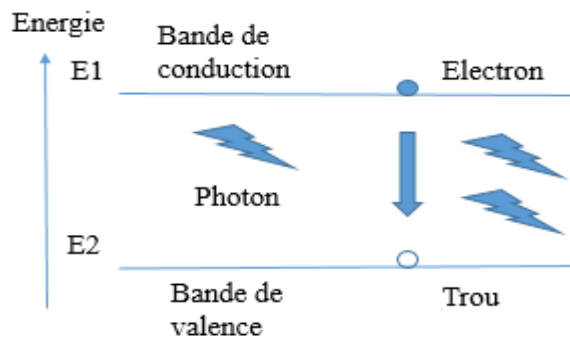


Figure II.26 Emission stimulée.

B- L'émission spontanée

L'émission spontanée est associée aux LED pour produire de la lumière. L'électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant un photon spontané [7].

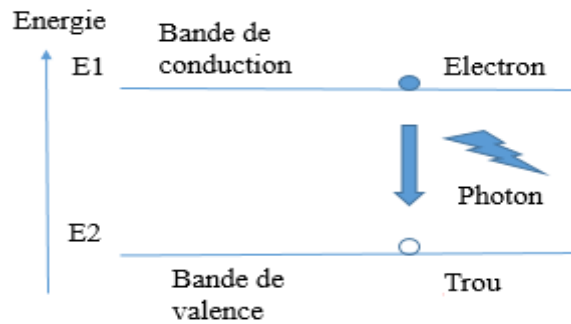


Figure II.27 Emission spontanée.

C- L'absorption

L'absorption concerne à la fois les LED et LASER, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé [7].

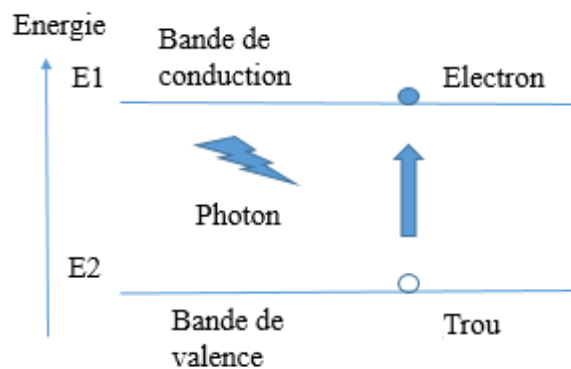


Figure II.28 L'absorption.

3.1.4 Comparaison entre LED et LASER

Le tableau II.4 montre une brève comparaison entre les deux émetteurs optoélectronique

Tableau II.4. Tableau comparatif entre une LED et un LASER.

Caractéristiques	LED	LASER
Émission de la lumière	Spontanée	Stimulée
Diagramme de rayonnement	Moins directif	Très directif
Niveau d'énergie	Faible	Élevé
Coût	Moins cher	Cher
Durée de vie	Plus grande	Moins grande

3.2 Les techniques de modulation

Pour envoyer le signal électrique, il faut premièrement le convertir en un signal optique afin de l'imprimer sur le signal lumineux pour le transmettre dans un système numérique optique, c'est ce qu'on appelle une modulation [20].

3.2.1 Modulation directe

La modulation directe implique de moduler directement le courant d'alimentation d'une Diode LASER ou Diode électroluminescente. C'est une méthode simple facile à réaliser avec un coût réduit, elle nécessite une tension faible et une puissance réduite [19].

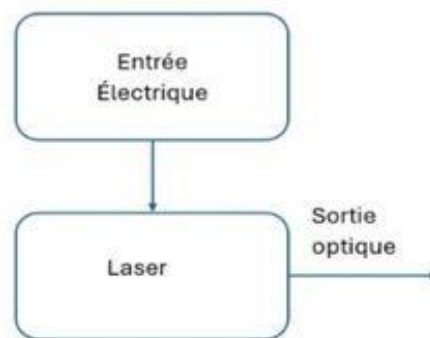


Figure II.29 : schéma synoptique de la modulation directe [19].

3.2.2 Modulation externe

La modulation externe c'est une méthode qui permet de moduler le signal lumineux à l'extérieure du dispositif (à la sortie de la LED ou LASER). C'est la modulation la plus connue qui permet d'envoyer des débits plus élevés [19].

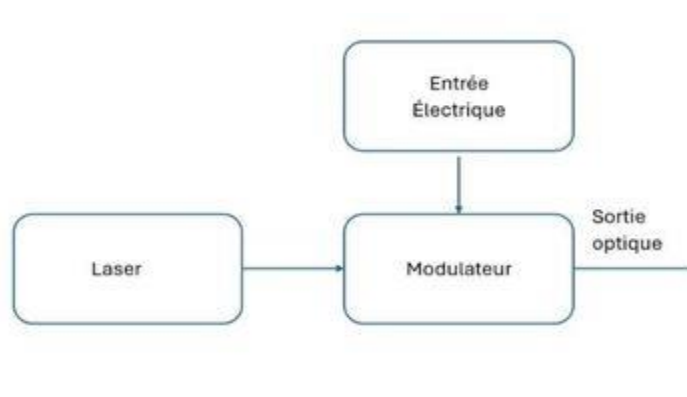


Figure II.30 Schéma synoptique de la modulation externe[19].

4 Bloc de transmission

Après le bloc d'émission, le signal optique est transmis à travers le bloc de transmission optique, comprenant des fibres optiques qui acheminent la lumière modulée. En cours de route, des amplificateurs optiques renforcent le signal et des techniques de transmission sont utilisées pour optimiser le signal.

4.1 Les amplificateurs

Le phénomène physique à l'origine de l'amplification optique est l'émission stimulée correspondant à l'émission d'un photon consécutivement au passage d'un autre, un phénomène inverse à celui de l'absorption, avec un paramètre g dit gain, opposé au coefficient d'absorption a . Un matériau devient amplificateur lorsqu'on a réalisé l'inversion de population qui consiste à peupler les niveaux énergétiques supérieurs de manière plus importante que les niveaux inférieures à l'aide d'une source extérieure appelée pompe. Les amplificateurs optiques à fibre ont connu un essor important grâce aux télécommunications optiques pour régénérer le signal [17].

4.1.1 Définition de l'amplificateur optique

Les amplificateurs sont des dispositifs qui amplifient le signal et qui permettent d'augmenter l'intensité d'un signal lumineux sans le convertir en signal électrique intermédiaire. Principalement utilisés dans les communications optiques. Ces amplificateurs offrent plusieurs avantages :

- Adaptabilité aux différents débits : les amplificateurs sont adaptés à différentes vitesses de transmission, offrant une flexibilité dans la conception des réseaux.
- Faible distorsion du signal : ils maintiennent la qualité du signal en amplifiant sans introduire une distorsion significative, assurant ainsi une transmission de haute qualité sur de longues distances.
- Amplification sans conversion électrique : ils amplifient directement le signal optique sans nécessiter de conversion électrique.
- Réduction du coût : en éliminant la nécessité de conversion électrique, les amplificateurs contribuent à la réduction des coûts.

Les caractéristiques d'un amplificateur optique varient selon sa position dans la chaîne de transmission. Nous observons [7] :

- Le post-amplificateur appelé aussi amplificateur de puissance (booster amplifieur), il est placé juste après le module d'émission. Il permet d'amplifier le signal de l'émetteur pour lui permettre d'être transmis sur une longue distance. Il doit avoir une puissance de saturation très élevée.
- L'amplificateur en ligne ; placé sur une ligne de transmission, son rôle est d'amplifier le signal après une certaine distance de propagation pour lui permettre de parcourir une autre distance. Il doit avoir un faible facteur de bruit et un gain important.
- Le préamplificateur ; placé juste avant le module de réception pour permettre au signal d'avoir une puissance suffisante pour être détecté dans de bonnes conditions.

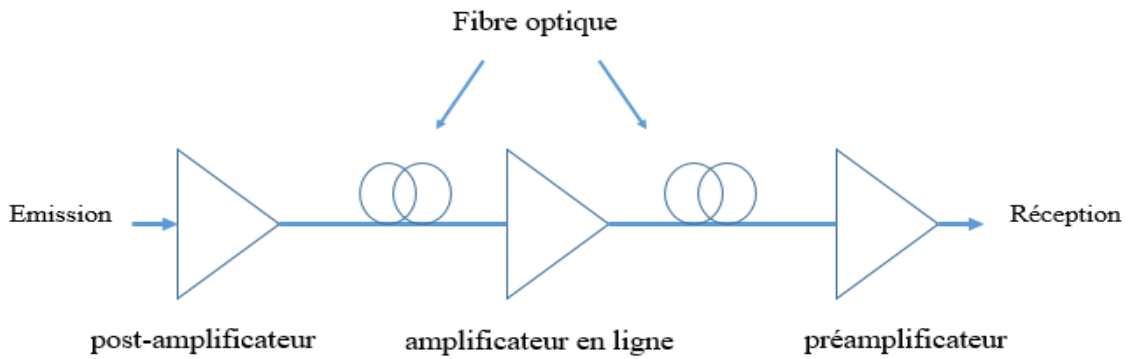


Figure II.31 Types des amplificateurs selon la position dans la chaîne de transmission.

4.1.2 Types d’amplificateurs optiques

A- Amplificateur optique à semi-conducteur (SOA : Semiconductor Optical Amplifier)

Un SOA est un dispositif optoélectronique qui peut, dans des conditions d’exploitation appropriées, amplifier un signal lumineux incident. Les travaux sur les amplificateurs à semi-conducteur ont commencé à partir du moment où les lasers à semi-conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable. Leur structure de base est peu différente de celle d’une diode laser. Contrairement aux LASERS à semi-conducteur ; il n’y a pas de miroir aux extrémités mais un revêtement antireflet est déposé sur les faces afin de minimiser les réflexions de la lumière vers l’intérieur du circuit [11].

Le fonctionnement d’un amplificateur optique a semi-conducteur repose sur l’injection de courant dans une structure semi-conducteur LASER de jonction PN. Lorsque le courant est injecté, il crée un excès de porteurs ce qui modifie les propriétés optiques du matériau. Dans la région active les électrons et les trous vont se recombinés produisant une émission de photon cohérente. Lorsque la lumière ou le signal optique traverse la région active, les photons sont absorbés par les porteurs excités, ce qui provoque leur amplification. En conséquence, le signal optique est amplifié tout en traversant la région active de la diode a semi-conducteur [10].

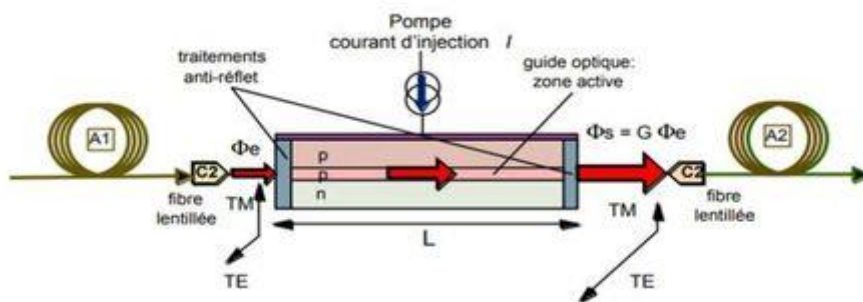


Figure II.32 : Principe de fonctionnement d'un amplificateur optique a semi-conducteur [11].

B- Amplificateur optique à fibre dopée Erbium (EDFA : Erbuim-Dopped Fiber Amplifier)

Comme n'importe quel amplificateur, un amplificateur optique absorbe l'énergie fournie par un système extérieur désigné par le terme de pompe en utilisant l'émission stimulée.

Les amplificateurs à fibres sont disponibles et fonctionnent dans la fenêtre de transmission à la longueur d'onde 1550 nm et pour le pompage s'effectue autour de 980 nm ou 1480 nm. Ils se composent pour l'essentiel d'une fibre dopée de quelques mètres de longueur, d'un dispositif de couplage de la lumière de la pompe vers la fibre dopée et un multiplexeur WDM en raison de son faible bruit et l'amplification de multiples canaux de différentes longueur d'onde sur de longues distances. Dans la plupart des cas la pompe est un Laser semi-conducteur. Le couplage de la lumière de la pompe dans la fibre est obtenu à l'aide d'un multiplexeur. Il est habituel d'ajouter deux isolateurs un en entrée et l'autre en sortie [21].

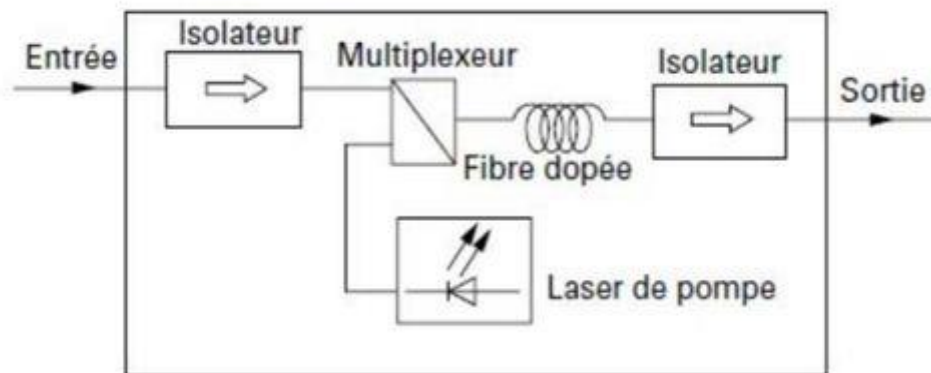


Figure II.33 : schéma d'un amplificateur a fibre dopée [17].

Le fonctionnement d'un amplificateur optique à fibre dopée Erbium est effectué à l'aide de différents éléments. Tout d'abord, le signal optique entre dans un amplificateur à partir de l'entrée, ce signal est de 1550 nm de longueur d'onde et il va se combiner à un Laser à pompe de 980 nm puis on utilise un multiplexeur pour injecter à la fois la pompe et le signal dans la fibre dopée erbium, les isolateurs imposent à la lumière un seul sens de passage et ont pour rôle de protégés les émetteurs et les récepteurs afin d'éviter toutes les réflexions qui pourraient être créés. Des coupleurs permettant de prélever le signal et contrôler le gain de l'amplification [21].

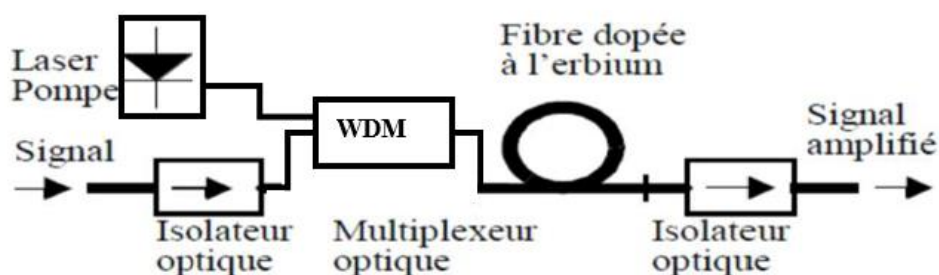


Figure II.34 :Principe de fonctionnement s'un amplificateur a fibre dopée Erbium [18].

C- Amplificateur de Raman (RFA : Raman Fiber Amplifier)

Les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de transmissions optiques sur de longues distances. L'amplificateur Raman utilise la fibre de transmission elle-même comme un milieu d'amplification. L'amplificateur Raman est basé sur le principe de la diffusion Raman qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon est absorbé. C'est-à-dire est un phénomène physique dans lequel la lumière interagit avec la matière [22].

Son principe de fonctionnement s'effectue lorsque les photons laser de la pompe se propagent dans la fibre, ils entrent en collision et sont absorbés par des molécules de fibre ou des atomes. Cela excite les molécules ou les atomes à des niveaux d'énergie plus élevés. Les niveaux d'énergie les plus élevés ne sont pas des états stables, ils se décomposent rapidement en niveaux d'énergie intermédiaires inférieures qui libèrent de l'énergie sous forme de photons dans n'importe quelle direction. On parle alors de diffusion Raman [23].

4.2 Les techniques de transmission

L'augmentation du nombre d'utilisateurs et de la quantité d'informations échangées dans les réseaux de communication a poussé au développement de solutions pour augmenter la capacité des réseaux, et profiter de l'avantage en bande qu'offre la fibre optique. Des techniques de multiplexage ont ainsi été développées, chacune permettant de transmettre N signaux de débit D sur le même canal, ce qui équivaut à la transmission d'un signal global de débit sous forme de : $N \times D$ [7].

Le multiplexage est une technique qui consiste à faire passer plusieurs informations dans un seul canal de transmission, permet de diviser une même ressource entre plusieurs utilisateurs. Cette technique implique trois blocs principaux, un multiplexeur ou MUX en anglais qui est un circuit qui reçoit plusieurs entrées et les combine en un seul signal, suivi d'un canal de transmission qui est une voie distincte pour transmettre un signal indépendant. A la réception il y a un démultiplexeur ou DEMUX qui permet de récupérer les signaux d'origine à partir d'un signal composite.

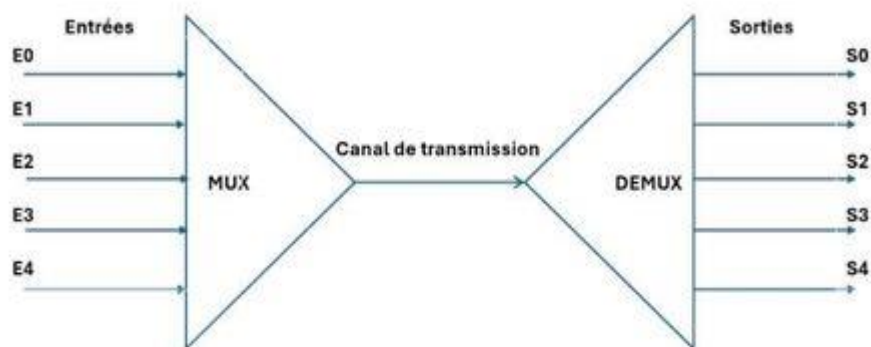


Figure II.35 : Schéma d'un multiplexeur.

Pour cela on va traiter deux types de multiplexage la TDM et la WDM, chacune de ces techniques offre des caractéristiques spécifiques en terme de capacité.

4.2.1 Multiplexage temporel (TDM: Time Division Multiplexing)

La TDM ou bien multiplexage par répartition de temps est une technique utilisée dans les télécommunications optiques. Les utilisateurs partagent la même bande passante, et émettent sur la même fréquence les données à transmettre dans les différentes fenêtres temporelles qui leur sont allouées. Cependant elle assure la synchronisation entre les intervalles temporels de chaque canal et doit être utilisée afin d'éviter toute interférence entre les canaux TDM [21]. C'est-à-dire permet l'acheminement de différentes informations sur un même canal, chaque canal est attribué à un tour de rôle.

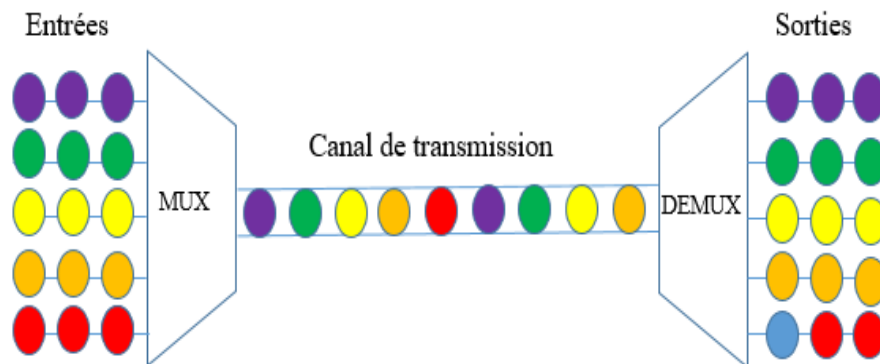


Figure II.36 : Exemple du multiplexeur de temps [22].

Parmi ces avantages on donne :

- Allocation temporelle : la bande passante est divisée en intervalles de temps fixes.
- Transmission synchrone : les signaux des différents canaux sont émis avec un intervalle de temps fixe et répété de manière cohérente.
- Le débit : transmettre plusieurs canaux de faible débit sur un même support de transmission a plus haut débit.
- La capacité : permet de supporter un grand nombre de canaux de données sur une seule ligne de transmission.

4.2.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Multiplexing)

La WDM ou multiplexage par répartition en longueur d'onde permet de multiplexer plusieurs signaux modulant des longueurs d'onde différentes dans une seule fibre optique, en les mélangeant à l'entrée par un multiplexeur et en les séparant à la sortie au moyen d'un démultiplexeur [21]. C'est à dire mélanger plusieurs signaux optiques sur une même fibre optique afin de multiplier la bande passante en utilisant différentes longueurs d'onde de lumière et espacées assez largement pour ne pas interférer les uns avec les autres.

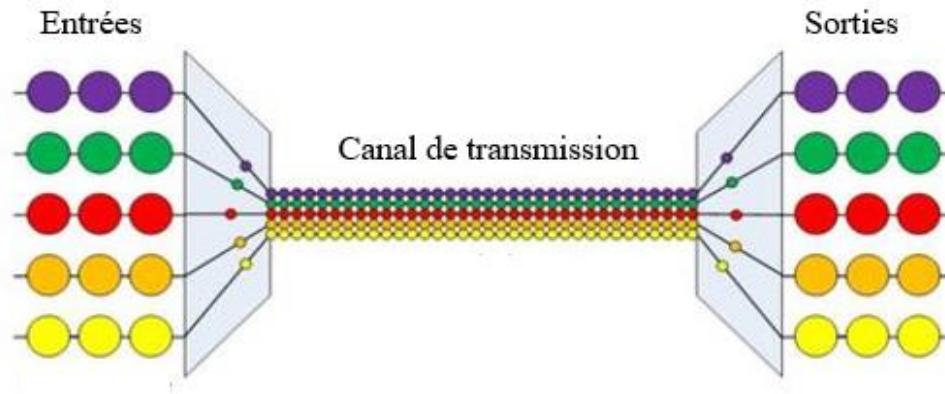


Figure II.37 : Exemple du multiplexage en longueur d'onde [22].

Parmi ces avantages on donne :

- Indépendance aux canaux : chaque canal de données est transporté sur une longueur d'onde distincte.
- Indépendance spatial : chaque longueur d'onde transporte des données indépendamment des autres.
- La capacité : utilisation de différentes longueurs d'onde pour multiplexer plusieurs canaux sur une même fibre.
- Flexibilité : la WDM offre une flexibilité en permettant l'ajout ou la suppression de canaux de données sans perturber les autres canaux.

4.3 Type de transmission

Il existe deux types de transmission :

4.3.1 Transmission synchrone

Dans ce type, l'émetteur et le récepteur sont synchronisés par une horloge identique et constante. Les informations sont émises de manière continues les unes après les autres avec un intervalle de temps spécifiques (pas d'intervalle de temps entre les données transmises) [7].

4.3.2 Transmission asynchrone

Dans ce mode de transmission, l'émetteur envoie des données à des instants aléatoires. Tel que chaque caractère est transmis de manière indépendante et à des intervalles différents sans prendre en considération les caractères précédents ou suivants. La transmission asynchrone ne nécessite pas une horloge commune [7].

Pour permettre au récepteur de distinguer le contenu d'un caractère et d'un autre, l'émetteur va ajouter pour chaque caractère un bit de Start au début et un bit de Stop à la fin pour informer le récepteur à quel moment se commence et se termine le contenu d'un caractère...

4.3.3 Comparaison entre synchrone et asynchrone

- La transmission synchrone utilise une horloge commune par contre l'asynchrone ne nécessite pas d'une horloge.

- La transmission synchrone est plus efficace par rapport à la transmission asynchrone car cette dernière elle dépend de l'ajout des bits de début et de fin.
- La transmission synchrone peut nécessiter du matériel plus complexe pour générer une horloge commune tandis que l'asynchrone peut être mise en œuvre de manière simple.
- En raison de la complexité la transmission synchrone est plus coûteuse à mettre en œuvre que la transmission asynchrone.

5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail les deux principaux blocs de transmission par fibre optique. Nous avons commencé par une description détaillée de la partie émission avec ses différents composants. Ensuite, nous avons poursuivi avec le bloc de transmission qui implique le transfert des signaux lumineux à travers les fibres optiques avec un minimum de perte de signal et de distorsion et les techniques utilisées dans les deux processus.

Chapitre III : Les récepteurs optiques

1 Introduction

Les récepteurs optiques jouent un rôle fondamental dans les systèmes de communications optique, permettant la conversion de signaux lumineux en signaux électriques utilisables. Dans ce chapitre, nous allons explorer les différents types de photo-détecteurs notamment leur principe de fonctionnement et le processus qui s'effectue dans le bloc récepteur pour assurer une transmission d'information précise et plus fiable.

2 Bloc de réception

2.1 Récepteur optique

Le récepteur optique est un composant électronique faisant partie des composants d'une transmission par fibre optique. Ces récepteurs jouent un rôle essentiel dans divers domaines, comme les télécommunications et l'informatique. Ces composants permettent la conversion des signaux optiques en signaux électriques.

Le module de réception est constitué de plusieurs composant tels que le photo-détecteur, un préamplificateur, un filtre électrique, décision, récupération d'horloge et l'information détectée. Chaque composant remplit à un rôle spécifique dans le processus global de réception optique. En combinat ces composants de manière appropriée, les systèmes de réception fonctionnent de façon optimale.

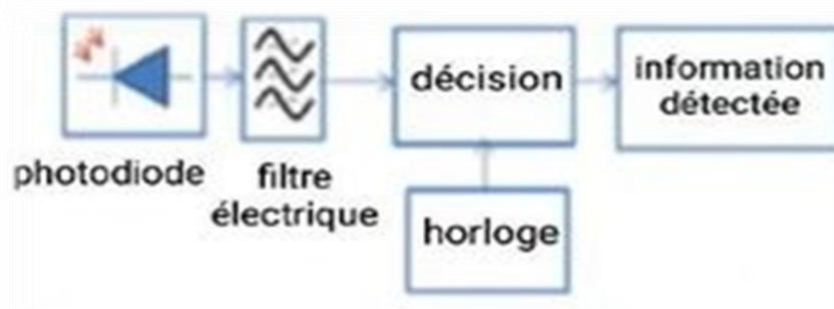


Figure III.38 Récepteur optique.

2.2 Les photo-détecteurs

La photodiode est un dispositif crucial du bloc récepteur. Elle est à base de matériau semi-conducteur, elle constitue une jonction PN et elle permet de convertir un signal optique en un signal électrique c'est-à-dire de détecter un signal lumineux et de le transformer en un signal électrique [20].

On distingue trois types de photo-détecteurs : la photodiode PN, la photodiode PIN et la photodiode a avalanche.

2.2.1 La photodiode PN

La photodiode est une diode classique et simple de jonction PN. Elle est constituée de deux régions semi-conductrices dopées. Une région P (dopée positivement) et une région N (dopée négativement) qui sont en contact pour former la jonction PN [24].

Son principe de fonctionnement est simple : Lorsque, la jonction PN est exposée à la lumière, cela génère des paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur. Ces paires sont ensuite séparées par le champ électrique présent dans la région de déplétion de la jonction, ce qui entraîne un flux de courant. Ce courant est directement proportionnel à l'intensité de la lumière incidente, ce qui rend les photodiodes utiles dans des applications telles que la détection de lumière, la communication optique.

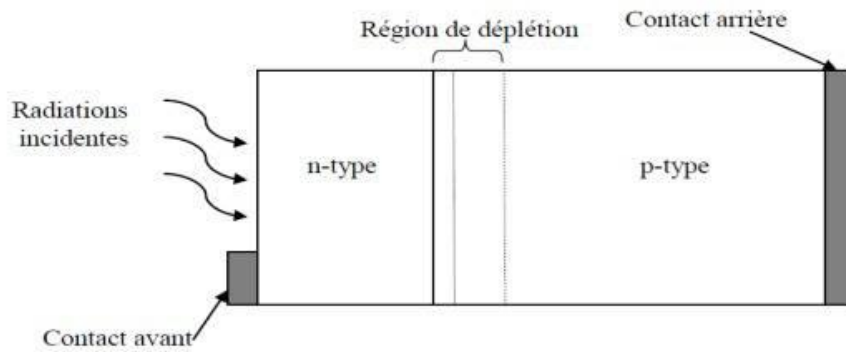


Figure III.39 Photodiode PN [7].

Il existe deux régions de polarisations mais trois conditions de polarisation à la jonction PN [25] :

- Polarisation nulle : aucune tension externe n'est appliquée sur la jonction PN.
- Polarisation inverse : le potentiel de tension négative est connecté aux matériaux P et le positive aux matériaux N, cela permet d'augmenter la largeur de la ZCE.
- Polarisation directe : le potentiel de tension positive est connecté au matériaux P et la négative au matériaux N, cela permet de diminuer la largeur de la ZCE.

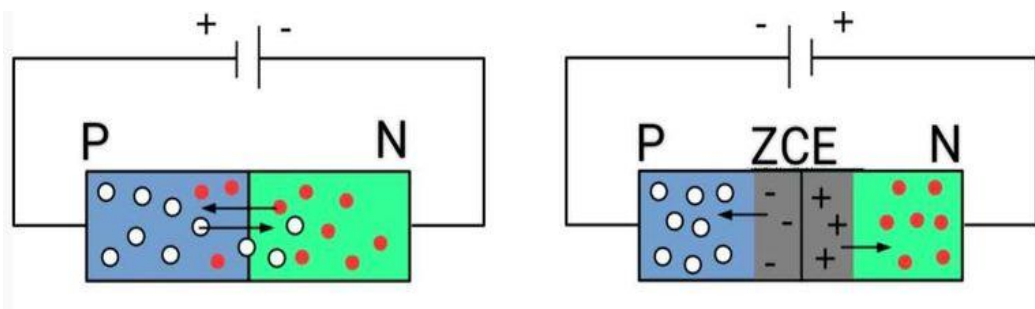


Figure III.40 : polarisation directe et polarisation inverse [25].

2.2.2 La photodiode PIN

La PIN est une photodiode simple basée sur la jonction PN ajoutant une troisième partie. Elle est composée de trois régions semi-conductrices : une région semi-conductrice dopée P (positive) et une autre de type N (négative) séparées par une couche semi-conducteur intrinsèque I (non dopée) [26].

Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photoélectrique et la structure de la jonction PN. Lorsque la lumière arrive sur la photodiode, cela génère des paires électron-trou dans

la région intrinsèque de la photodiode, et le champ électrique de la jonction PN sépare ces charges pour générer un courant mesurable. C'est ainsi que la photodiode PIN convertit la lumière en un signal électrique. Les photodiodes PIN sont souvent utilisées dans des applications comme les systèmes de communication optique à haute vitesse.

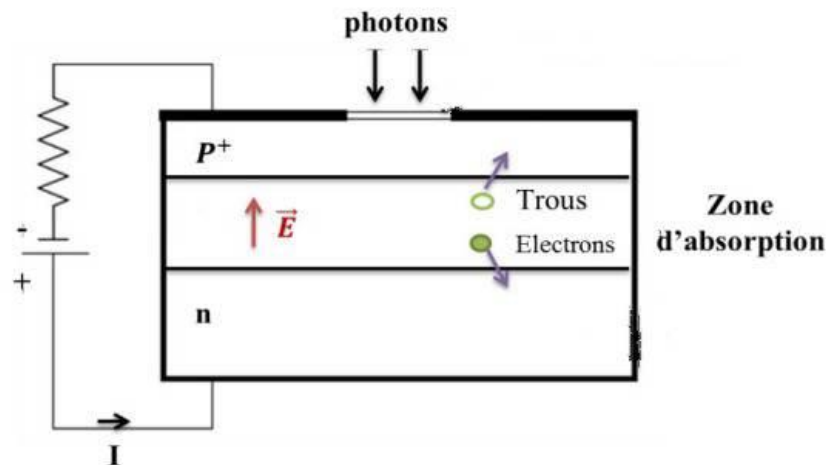


Figure III.41 Photodiode PIN [9].

2.2.3 La photodiode à avalanche

Les signaux optiques, après propagation dans une fibre optique, sont généralement très faibles, par conséquent, le signal électrique délivré par les photodiodes requiert souvent une amplification. Le but de la photodiode à avalanche est d'obtenir une amplification interne du photo-courant et ainsi augmenter la réponse du photo-détecteur [7].

Lorsque la lumière frappe la photodiode, elle excite les électrons dans le matériau semi-conducteur de la photodiode, créant ainsi des paires électron-trou. La photodiode est polarisée avec une tension élevée, ce qui accélère les électrons libérés par la lumière, leur donnant assez d'énergie pour provoquer un phénomène d'avalanche. Lorsque les électrons sont accélérés, ils peuvent libérer d'autres électrons en percutant d'autres atomes dans le matériau, ce qui permet de créer une réaction en chaîne d'amplification, appelée avalanche. Cette avalanche d'électrons produit un courant de sortie beaucoup plus élevé que celui créé par l'absorption de la lumière. C'est ainsi que la photodiode à avalanche amplifie le signal électrique. Les photodiodes à avalanche sont très utilisées dans des applications nécessitant une sensibilité élevée, telles que les communications optiques à longue distance.

Dans une photodiode à avalanche on obtient un champ fort en appliquant une tension inverse très importante à une structure PIN [7].

Il y a trois sources du courant traversant la diode [7]:

- La génération primaire (par absorption d'un photon)
- La génération par impact due aux électrons
- La génération par impact due aux trous.

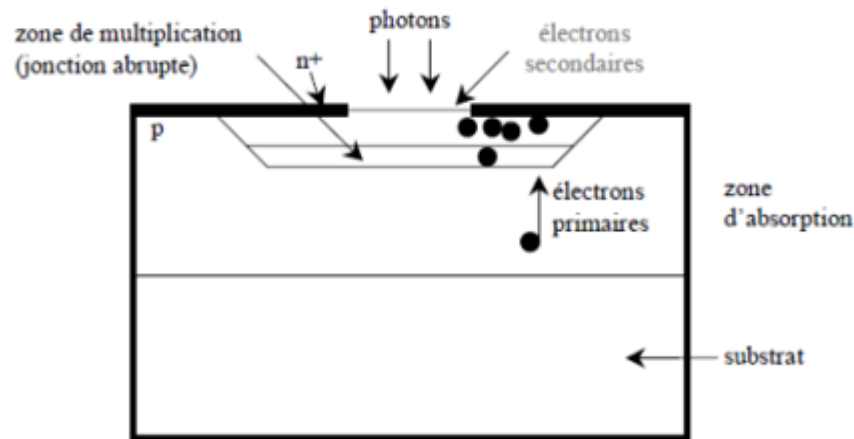


Figure III.42 Structure d'une photodiode APD [23].

2.2.4 Comparaison entre la photodiode PN, PIN et APD

Le tableau suivant montre une comparaison entre les trois types de photo détecteurs

Tableau III.5. Comparaison entre la photodiode PN, PIN et APD.

Caractéristiques	PN	PIN	APD
La structure	Deux régions P et N	Trois régions P, I et N	Trois régions P, a avalanche et N
Amplification	Non	Non	Oui
Tension du fonctionnement	Basse	Basse	Plus élevée
Gain interne	Non	Non	Oui
Bruit	Moins	Moins	Elevé

2.3 Le préamplificateur

Pour améliorer la modeste sensibilité de la photodiode PIN, le photorécepteur est souvent accompagné d'un préamplificateur. Ce dernier joue un rôle essentiel d'amplifier le faible signal optique reçu de la diode avant qu'il ne soit traité par les autres circuits du récepteur. Il augmente ainsi le rapport signal sur bruit(SNR) [7].

2.4 L'amplification électrique

L'amplificateur électrique intervient après le préamplificateur et qui a un rôle crucial pour convertir le faible courant produit par le photo-détecteur en un signal électrique exploitable. Il amplifie le signal pour améliorer sa puissance et son rapport signal bruit, permettant ainsi un traitement efficace par les circuits suivants.

2.5 Circuit du filtrage

Le filtrage est utilisé pour éliminer les interférences et les bruits indésirables du signal reçu et qui pourraient altérer sa qualité. Il s'agit d'un filtrage qui retient les fréquences indésirables tout en laissant passer les composantes du signal que nous voulons conserver. Après avoir achevé cette configuration le signal reçu est claire ce qui améliore la fiabilité et la précision de la transmission des données [18].

2.6 La décision

Une fois que le signal électrique a été récupéré, il nous faut reconstituer la séquence binaire envoyée dans la ligne. Pour ce faire, nous appliquons le bloc de décision [9]. C'est à ce stade que les bits de données son extraite du signal et convertis en données numériques.

2.7 Récupération d'horloge

L'horloge fournit un signal de synchronisation pour synchroniser le traitement des données avec le signal entrant c'est à dire avec le processus de la décision. Cela permet d'assurer que les informations sont traitées au bon moment, ce qui permet la récupération précise des données [7].

2.8 L'information détectée

L'information détectée est la sortie finale du récepteur optique, généralement sous forme de données numériques. Elle représente les données extraites du signal optique et prête à être utilisées par les systèmes de traitement des données ultérieur.

3 Conclusion

Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie des récepteurs optiques, de leurs fonctionnements et leurs importances dans une liaison de transmission par fibre optique. Les récepteurs optiques sont essentiels dans une multitude d'application, allant des communications par fibre optique, instrumentation scientifique comme les télescopes et la médecine et l'imagerie dans les endoscopes.

Chapitre IV : Modélisation d'une diode LASER et d'une diode PIN

1 Introduction

La modélisation et la simulation des diodes LASER et les diodes PIN ainsi que l'observation de leurs différents comportements électriques et optiques jouent un rôle crucial pour leurs intégrations dans une chaîne de transmission optique. Dans ce chapitre, nous allons donc faire la modélisation de deux dispositifs : un émetteur optique à base de semi-conducteurs InP/InGaAsP et un récepteur optique à base de silicium.

2 Présentation du simulateur :

Le Simulateur utilisé est un environnement qui permet de concevoir et prévoir les performances électriques des dispositifs à semi-conducteur. Cet outil sert à la modélisation des dispositifs à semi-conducteur avant leur fabrication [27, 28]. Il nous permet principalement de créer la géométrie du composant, sa caractérisation électrique ainsi que la visualisation des résultats, tel que représenter sur la figure IV.43. :

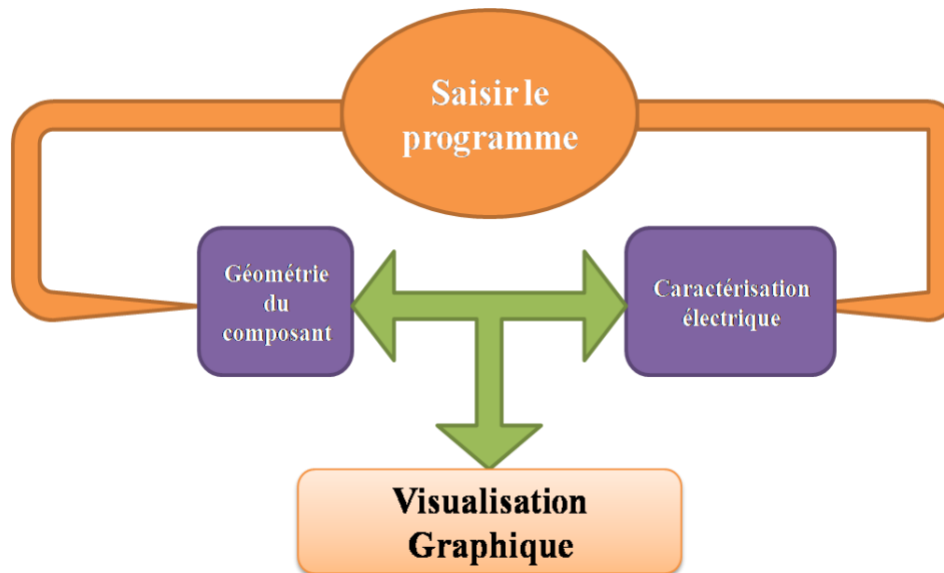


Figure IV.43 Schéma synoptique du fonctionnement du simulateur.

2.1 Interface de saisie du programme

C'est l'environnement interactif d'exécution et de développement où le programme de simulation est défini à travers des commandes spécifiques [27]. Il se compose de deux fenêtres [29]:

- Une fenêtre de saisie ou simulation appelée input Windows dans laquelle simulateurs peuvent être appelés et contrôlés.
- Une fenêtre d'affichage Run-time output permet de montrer les sorties et les résultats des simulations, notamment les erreurs de programmation.

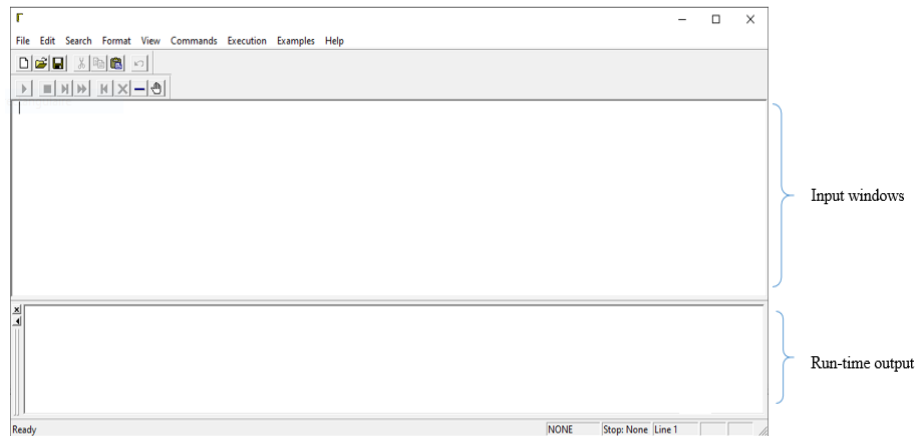


Figure IV.44 : Fenêtre de saisie du programme [29].

2.2 Création de la géométrie

Il fournit des possibilités générales pour la simulation des processus utilisés dans l'industrie des composants électronique tels que diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt [30].

2.3 Caractérisation électrique

Il nous permet des simulations et des modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs [27]. En outre, il est basé sur les principes physiques à deux et a trois dimensions, ce qui signifie qu'il peut prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs qui sont associés aux structures physiques bien spécifiées et des conditions de polarisation[31].

2.4 Visualisation graphique

De même que pour la création géométrique et la caractérisation électrique, ce simulateur nous permet de visualiser les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique et caractéristiques électriques) [30].

3 Ordre des commandes

Les programmes de simulations sont écrits en langage de commande.

3.1 La spécification de la structure

- La spécification de maillage

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. La partie maillage est une série de définition de lignes horizontales et verticales ainsi l'espace entre elles, cet espace doit être choisi en fonction des dimensions à 2D avec les paramètres x et y [30].

Un maillage grossier ou fin détermine la précision de la simulation. Le maillage grossier produit une simulation rapide avec des résultats moins précis. Le maillage fin produit une simulation lente avec des résultats plus précis [32].

La syntaxe générale pour définir le maillage est [32] :

X.MESH LOCATION=< VALUE> SPACING=< VALUE>

Y.MESH LOCATION=< VALUE> SPACING=< VALUE>

- La spécification des régions

Après la définition du maillage, il est nécessaire de définir les régions. Le format pour définir les régions est comme suit [32] :

REGION number=<integer><material_type> /<position parameters>

Cette instruction déclare: Le numéro de la région, le nom de la région, le type du matériau, sa position[33].

- La spécification des électrodes

L'instruction qui permet de définir les électrodes de la structure est la suivante [33] :

ELECTRODE NAME =<electrode name ><position_parameters>

Cette instruction annonce le nom de l'électrode et sa position. Les positions des électrodes sont localisées par les instructions suivantes [33]:

X.MIN : spécifier le point de départ de l'électrode et le maximum c'est X.MAX.

RIGHT : la position de l'électrode se situe à la droite de la structure et son inverse est LEFT.

TOP : la position de l'électrode est en haut de la structure et son inverse est BOTTOM.

NAME : nom de l'électrode

- La spécification du dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage dans le programme de simulation. Nous utilisons pour cela la commande « doping » Le dopage peut être de type N ou P. Le format de la déclaration du dopage se présente comme suit [34]:

Dopage< type de distribution >< type de dopant > / < position des paramètres >

3.2 La spécification du modèle et du matériau

L'étape suivante est la spécification du modèle et du matériau. Cette étape est effectuée par les instructions suivantes: matériau, modèle, contact et interface.

- La spécification du matériau

La déclaration matérielle permet la spécification de certains paramètres de base. Ces valeurs peuvent s'appliquer à un matériau ou à une région. L'utilisateur peut utiliser arbitrairement n'importe quel matériau lors de la définition d'une structure, puis modifier l'ensemble de ses propriétés pour correspondre à celle d'un matériau désiré.

Le format de la déclaration du matériau est le suivant [27] :

MATERIAL < localisation >< définition du matériau >

Si Material apparaît deux fois, le premier est considéré comme la déclaration du matériau (commande de déclaration) et le second est considéré comme un paramètre de localisation.

Plusieurs autres paramètres peuvent être définis par la déclaration « Matériau », comme exemples de ces paramètres [27]:

- La mobilité d'électrons (MUN), la mobilité de trous (MUP)
- (TAUN0) et (TAUP0) qui sont les durées de vie d'électrons et de trous respectivement
 - La spécification du modèle

Cette spécification fait référence à la présentation des modèles physiques des matériaux comme le transport et la recombinaison.

La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante[30]:

MODEL< paramètres générales > / < paramètres du modèle >

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation

- Contact

Le contact détermine les attributions des électrodes. La syntaxe du contact est la suivante [30]:

Contact nombre = < n > | NOM = | ALL

- Interface

La déclaration d'interface est utilisée pour définir la densité de charge d'interface et la vitesse de recombinaison de surface aux interfaces entre les semi -conducteurs et les isolants.

La syntaxe est comme suivie [32] : INTERFACE [<parameters>]

3.3 Spécifications des méthodes numériques

La sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équations, trois types de techniques sont utilisées [33, 35] :

- Méthode de Gummel

Pour la méthode de Gummel, elle est utilisée pour la résolution des équations à une seule inconnue et des variables fixées constantes, la résolution se fait d'une manière itérative jusqu'à la solution est achevée.

- Méthode de Newton

La deuxième méthode de Newton est la méthode la plus répandue, elle est utilisée pour résoudre des systèmes d'équations à plusieurs inconnues.

- Méthode de Blocs

La troisième méthode est une combinaison des deux méthodes.

3.4 Spécifications des solutions

Après avoir terminé les étapes précédentes, l'étape suivante est la spécification des solutions. Cette dernière est composée des commandes : Log, Solve, Load et Save.

➤ Log

L'instruction Log est utilisée pour enregistrer toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données. L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction LOG [34] :

```
LOG OUTFILE = monexemple.log
```

L'exemple montre l'enregistrement de données dans le fichier (monexemple.log)

➤ Solve

L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution en calculant les informations relatives du dispositif à un ou plusieurs points de polarisation[27].

➤ Save

Cette instruction permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un nœud dans un fichier de sortie. Peut inclure dans les autres instructions comme maillage et dopage.

Sa syntaxe de déclaration est comme suit [27] : save outfile=<nom du fichier>.str

➤ Load

Cette instruction est introduite, à partir d'un fichier existant, cela permet de reprendre la simulation à partir de fichier enregistré.

Sa syntaxe de déclaration est comme suit [27]: Load infile= < nom du fichier>.str

Dans cet exemple les informations sont enregistrées dans un fichier (nom du fichier.str) à l'aide de Save et chargées à l'aide de la commande Load

4 Modélisation de l'émetteur : « diode LASER à base d'Inp/InGaAsP »

4.1 Principe :

La structure étudiée dans notre travail est une diode LASER réalisée à base des semi-conducteurs InP/InGaAsP (phosphore d'indium/ arséniure-phosphore indium-gallium).

4.2 Les étapes de spécifications des commandes

4.2.1 Etape 1 : La spécification de la structure

La spécification de la structure est effectuée par la définition du maillage, des régions, des électrodes et du dopage :

- Le maillage est une série de définition de lignes horizontales et verticales espacées entre elles et dans notre étude le maillage est à deux dimensions pour cela seuls les paramètres x et y sont utilisés.

- Les régions permettent de séparer le maillage en bloc distincts et définir les matériaux utilisés.
- Les électrodes permettent de définir l'anode et la cathode.
- Le dopage permet d'introduire les atomes et semi-conducteur et crée des matériaux de types n et p.

La syntaxe que nous avons utilisée est :

x.mes localisation=..... espacement=.....

y.meh localisation=..... espacement=.....

4.2.2 Etape 2 : La spécification du modèle et du matériau

Dans cette étape, la déclaration du matériau et aussi spécifier les propriétés électriques et physiques comme la mobilité et la durée de vie.

a- Les matériaux :

Région numéro=..... matériaux=..... x minimum=.... x maximum=.... y minimum=.....
y maximum=.....

b- Les électrodes :

Electrode nom= anode x minimum=..... x maximum=..... y minimum=..... y
maximum=.....

c- Le dopage :

Doping uniforme région=..... Type p (ou n selon le dopage) concentration=
.....

d- Durée de vie et mobilité :

Matériau=InP taun= taup= μ_{un} = μ_{up} =.....

e- Recombinaison :

Models matériau=..... fldmob srh

4.2.3 Etape 3 : Spécifications des méthodes numériques

L'étape suivante est la spécification des méthodes. Dans notre cas nous avons utilisés la méthode de Newton car elle est la plus précise.

4.2.4 Etape 4 : spécifications des solutions

Dans cette étape nous avons utilisés Log pour enregistrer les caractéristiques terminales dans un fichier, Solve pour définir les conditions de simulation et Save pour sauvegarder la simulation dans un fichier.

Une fois que toutes ces étapes ont été décrites, nous avons lancé le programme et avons obtenu la structure représentée sur la figure 46. Sur cette figure est représenté les différents matériaux constituant notre composant, ainsi que les différents niveaux d dopage.

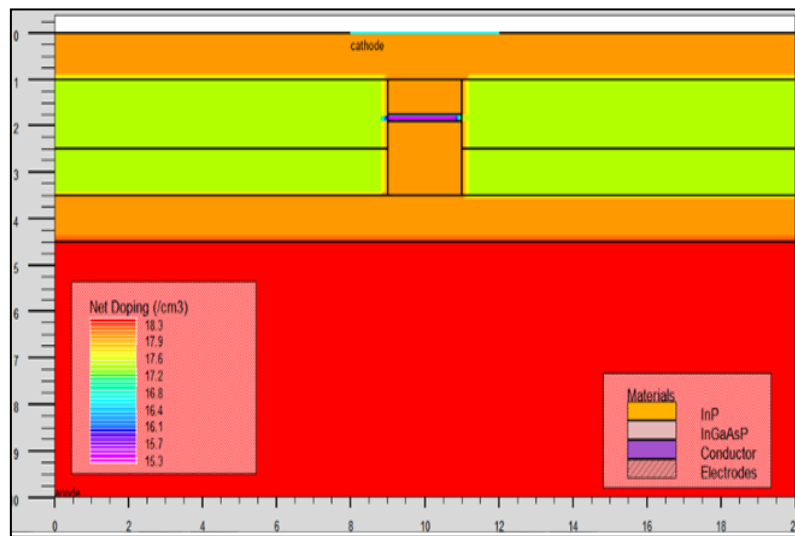


Figure IV.45 : Structure d'une diode LASER.

4.3 Résultats et discussions

Dans cette partie nous allons présenter les principaux résultats obtenus par la simulation de la diode.

4.3.1 La variation du gain en fonction de la tension

La figure IV.46 représente la variation du gain en fonction de la tension appliquée. Nous remarquons pour les tensions moins de 1V les valeurs du gain sont négatives, ceci peut s'expliquer par l'absence d'émission stimuler du LASER. Lorsque la tension dépasse 1V, les valeurs du gain sont devenues positives et augmentant jusqu'à se stabiliser pour une tension appliquer de 1.1V. A partir de la tension 1.1V le gain est stable ce qui peut s'interpréter comme étant le phénomène de l'émission stimuler qui se produit au niveau du LASER.

L'absence ou la faible polarisation de la diode LASER, a engendré des valeurs négatives du gain, ce qui veut dire absence d'émission stimulé. Lorsque la tension de polarisation à augmenter cela veut dire il y'a injection d'électron-trou dans la région active ce qui va augmenter la recombinaison électron-trou et par conséquent émission de photon.

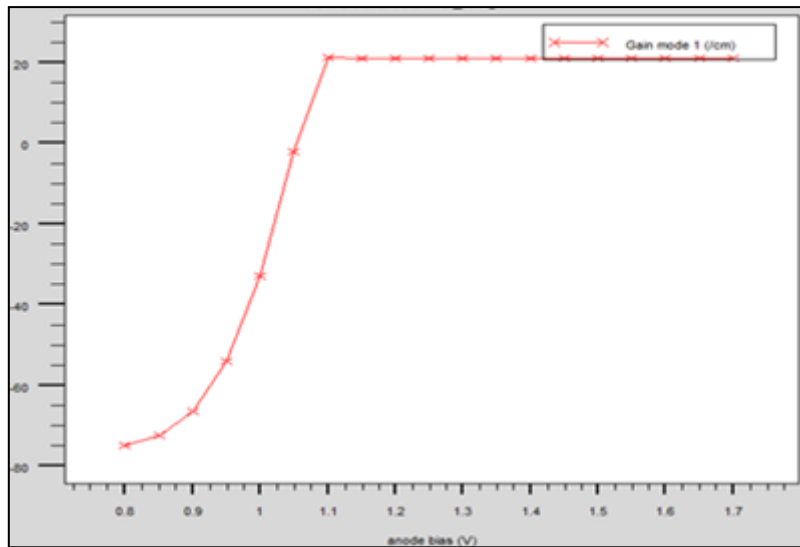


Figure IV.46 : Variation du gain en fonction de la tension.

4.3.2 La variation de densité de photon en fonction de l'énergie de photon

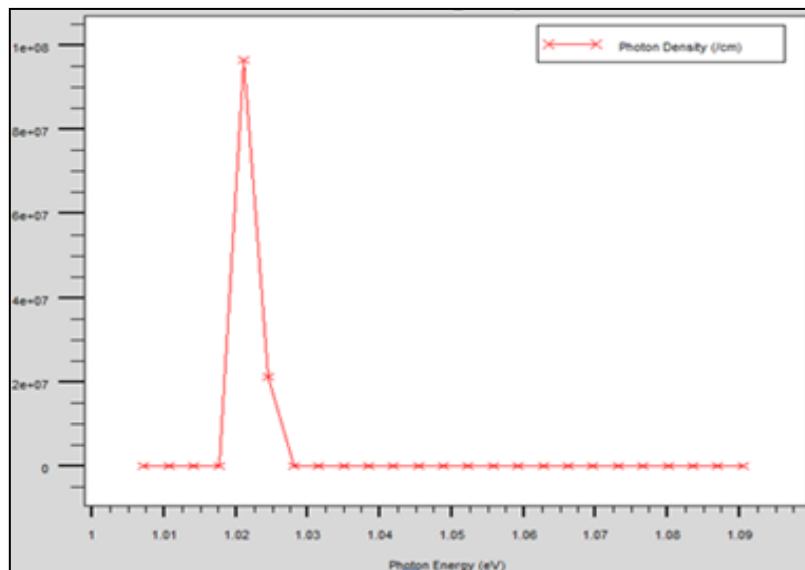


Figure IV.47 : la variation de densité de photon en énergie de photon.

La figure 47 montre la variation de la densité de photons en fonction de l'énergie des photons. Nous observons un pic très prononcé à une énergie légèrement supérieure à 1.02 eV, cela indique que la diode émet principalement pour des énergies de photons spécifiques. Aussi pour les valeurs au-dessous de 1.02 eV et au-dessus de 1.03 eV nous constatons que la densité de photon est nulle.

La présence du pic étroit indique que le LASER émet de manière cohérente à une énergie spécifique, correspond à une longueur d'onde bien définie. Cette dernière appartient au domaine d'infrarouge, cette région souvent utilisée dans les télécommunications optiques.

5 Modélisation d'une photodiode PIN à base de silicium

5.1 Principe :

Le composant récepteur que nous avons étudié dans notre travail est une photodiode PIN réalisée à base du semi-conducteur Silicium (Si).

5.2 Spécification des commandes

5.2.1 La spécification de la structure

La spécification de la structure est réalisée par la définition du maillage, des régions, des électrodes et du dopage. Tel que pour :

- Le maillage est une série de définition de lignes horizontales et verticales espacées entre elles. Dans notre étude le maillage est à deux dimensions pour cela seuls les paramètres x et y sont utilisés.
- Les régions permettent de séparer le maillage en bloc distincts et définir les matériaux utilisés, et dans notre travail nous avons utilisés qu'une région à base d'un seul semi-conducteur qui est silicium.
- Les électrodes permettent de définir l'anode et la cathode qui sont placé en haut et en bas de la structure.
- Le dopage permet d'introduire les atomes au semi-conducteur.

5.2.2 La spécification du modèle et du matériau

Dans cette étape, nous avons fait la déclaration du matériau, spécifier les propriétés électriques et physiques comme la mobilité et la durée de vie, ...etc.

5.2.3 Spécifications des méthodes numériques

L'étape suivante est la spécification des méthodes numériques. Comme pour la diode LASER nous avons utilisés la méthode de Newton car elle est plus précise.

5.2.4 Spécifications des solutions

Dans cette étape nous avons utilisés Solve pour définir les conditions de simulation et Save pour sauvegarder la simulation dans un fichier et de la visualiser. Log pour enregistrer les caractéristiques terminales dans un fichier et visualiser les différentes caractéristiques.

Une fois le programme saisi, nous lançons l'exécution du programme et nous obtenons la structure de la figure IV.48.

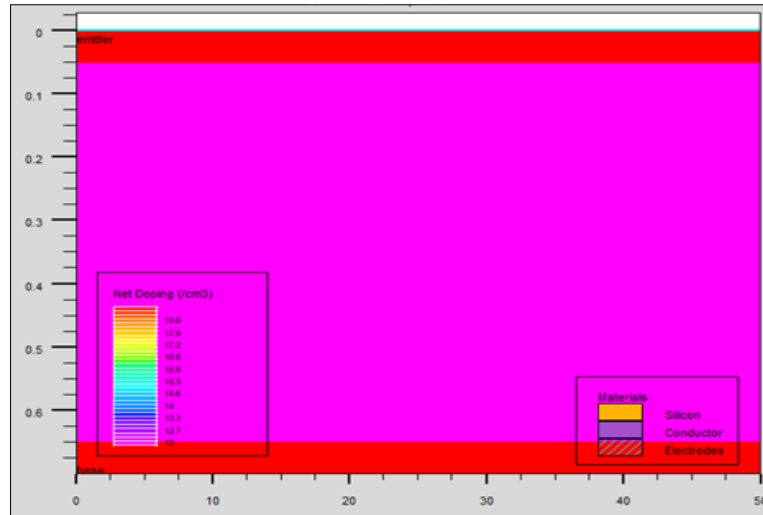


Figure IV.48 Structure de la diode PIN.

5.3 Résultats et discussions

5.3.1 La variation du courant émis en fonction de longueur d'onde

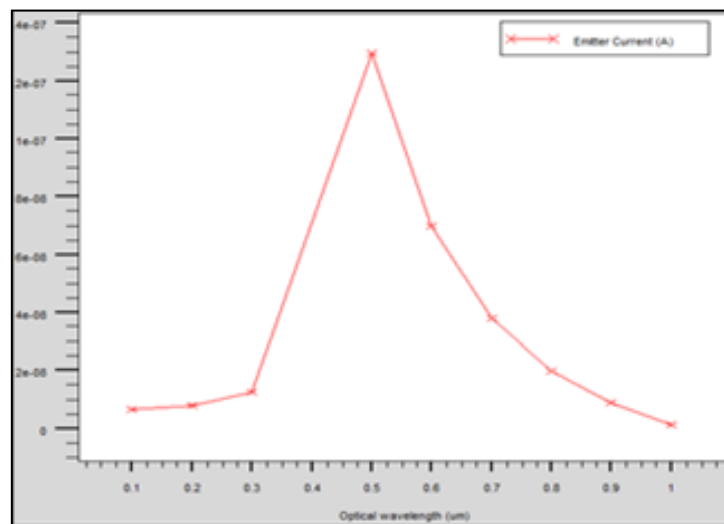


Figure IV.49 La variation du courant en fonction des longueurs d'ondes.

La figure IV.49 représente les variations du courant émis par la PIN en fonction des différentes longueurs d'onde qu'elle a reçues. Nous observons que pour les longueurs d'onde inférieure à 0.3 µm le courant généré est presque nul. A partir de 0.3 µm le courant commence à augmenter indiquant une réponse croissante de la diode ou le photo-courant augmente. Ensuite, Nous remarquons un pic étroit pour la longueur d'onde de 0.5 µm ce qui indique que le courant généré atteint son maximum à cette longueur d'onde. Enfin, au-delà de 0.5 µm le courant généré diminue ce qui signifie que la diode réagit moins efficacement à ces longueurs d'ondes.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons créé deux modèles des deux composants utilisés dans une chaîne de transmission optique, à savoir une diode LASER comme émetteur optique et une diode PIN comme récepteur optique. Nous avons constaté que pour le bon fonctionnement de la diode LASER il faut lui appliquer une tension minimum de 1.1 V. tandis que pour la photodiode PIN que nous avons créé à base du silicium, nous avons constaté qu'elle génère un photon-courant pour les longueurs d'onde correspondant à la lumière visible.

Conclusion générale

Conclusion

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études porte sur l'étude des émetteurs et un récepteur optique ainsi qu'une modélisation de ces deux dispositifs qui sont à base de matériaux semi-conducteurs à savoir : InP/InGaAsP et le Silicium, respectivement.

Nous avons commencé par une présentation des généralités sur la lumière et la fibre optique, en traitant leurs caractéristiques fondamentales ainsi que les différents types de fibre optique et les effets qui limitent sa capacité de transmission.

Les émetteurs et les récepteurs optiques sont des dispositifs cruciaux afin d'assurer une transmission d'information efficace, précise et fiable sur de longues distances. C'est pour cela que nous avons étudié deux types d'émetteur optique : une diode électroluminescente LED et une diode LASER : ces émetteurs convertissent les signaux électriques en signaux optiques. Aussi trois types de récepteurs optique qui sont : les photo-détecteurs PN, PIN et à Avalanche, qui ont pour rôle de convertir les signaux optiques en signaux électriques ont été étudié, en mettant en évidence leurs caractéristiques, leurs principes de fonctionnement et les phénomènes physiques qui se produisent dans ces dispositifs.

Le modèle de la diode LASER que nous avons simulé est à base de InP/InGaAsP, nous a permet de constater que pour le bon fonctionnement de ce dispositif, une tension minimale de 1.1 V doit être appliqué. Au-dessous de cette tension, nous avons constaté l'absence d'émission stimulée. Aussi, nous avons constaté que la densité de photon est maximale pour l'énergie de photon de 1.02 eV.

La diode PIN à base de Silicium que nous avons simulé, a généré un photo-courant variable dans la plage des longueurs d'onde de 0.1 μm à 0.9 μm . Cependant, nous avons constaté que cette diode a généré un photo-courant maximum pour la longueur d'onde $\lambda=0.5 \mu\text{m}$.

Ces dispositifs peuvent être intégrés dans une chaîne de transmission optique, selon le besoin et les caractéristiques de la chaîne en question.

Parmi les perspectives que nous pouvons envisager dans le cadre de cette étude nous pouvons citer :

- ✓ Utiliser d'autre matériaux semi-conducteurs afin d'améliorer la réponse des composants que nous avons étudiés.
- ✓ Introduire d'autre paramètre tels que : modification du dopage, la mobilité et la recombinaison afin d'étudier l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques électriques et optiques de ces composants.
- ✓ Crée des modèles d'une LED et des photorécepteurs PN et à Avalanche pour faire une étude comparative avec les composants simulé dans cette étude.

Références bibliographiques

Références

- [1] P. Surmely, La fibre optique, Technologies et applications, paris: MASSON, 1995.
- [2] G. Rania, «Etude des lasers a fibres de deux microns a impulsions ultra-courtes,» Memoire Master, Universite 8 Mai 1945-Guelma, juillet 2021. [En ligne].
- [3] P. Anne, «Radiofrequence et sante : ou en sommes-nous ?, Encyclopedie de l'Environnement,» 13 avril 2021.
- [4] T. M. Merabta et C. Sabra, «Analyse Numerique Et Etude Spectrale De Reseaux De Bragg A Fibre : Compensation De La Dispersion Chromatique Dans Une Ligne De Transmission,» Memoire Master,Universite de Blida 1, 2019. [En ligne].
- [5] A. Faycal, Khiati Nadhir, Amara Yacine et Bahat Abdelkrim, «Etude des Techniques de Compensation de Dispersion dans une Liaison a Fibre Optique,» Memoire Master, Universite de Tipaza-Abd Allah Morsli, 2021. [En ligne].
- [6] J.-L. Verneuil, «Simulation de systemes de telecommunications par fibre optique a 40Gbit/s,» universite de LIMOGES, 2003.
- [7] O. Sadia et A. Romaissa, «Etude d'un emetteur recepteur electro-optique,» Memoire Master, Universite Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2019/2020.
- [8] «<http://community.fs.com/fr/article/step-index-multimode-fiber-vs-graded-index-multimode-fiber.html>,».
- [9] K. Cheima, «Etude de la fibre optique pour la transmission de donnees,» Memoire master,Universite Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2019/2020.
- [10] M. s. Mohammed, «Transmission simultanee fixe FTTH et Mobile 5G sur fibre optique basee sur les modulations a double polarisation,» Memoire Master,Universite Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2020.
- [11] F. hakima, «Etude et simulation d'une chaine de transmission optique,» Memoire Master,Universite moouloud mammeri de tizi-ouzou.
- [12] «<http://exam2ham.free.f/donnees/filtres.html>,» .
- [13] «Physique.unice.fr/sem6/2006.2007/pageweb/telecom/application.html,».
- [14] G. Pujolle, Les Reseaux, Eyrolles, 2006.

- [15] D. Akram, O. kamel et G. Abdesamed, «reseau du Bragg sur fibre optique : application a la compensation de la dispersion chromatique dans les systemes de transmission optique haut debit,» Memoire Master, Université Echahid Hamma lakhdar d'El oued, 2019/2020.
- [16] B. Wassila, «Etude de conception d'une chaine de transmission a tres haut debit a base de semi-conducteur de type III-Nitrides,» These de doctorat, Université Djillali Liabes, Sidi bel Abbes, 2018. [En ligne].
- [17] A. Meriem et E. Aicha, «La technique WDM en telecoms optiques avances,» Memoire Master, Université Mustapha Stamboli, 2015/2016.
- [18] R. Kaci, «Etude d'une chaine de telecommunication optique,» Memoire Master, Université Abderahmane Mira, Bedjaia, 2012/2013.
- [19] G. E. Marwa et M. Oumaima, «Etude des performances d'un systeme DWDM/OCDMA,» Memoire master, Université Larbi Tebessi, Tebessa, 2019/2020.
- [20] R. Tiziri et Y. Samia, «Etude des techniques de detection et leurs impacts dans un systeme SAC_OCDMA,» Memoire Master, Université A Mira Bedjaia , 2018/2019.
- [21] S. Boumama et A. Djemai, «Conception et Configuration des reseaux optiques GPON,» Memoire Master, Université Abou Bekr Belkaid , Tlemcen, 2020.
- [22] G. Ibtissem, «Conceprion et analyse d'un systeme de communication optique DWDM,» Memoire Master, Université Mohammed Khider , Biskra, 2019/2020. [En ligne].
- [23] «<https://www.cisco.com/c/feca/support/docs/optical-networking/ons-15454-m6-multisevice-transport-platform-mstp/212834-pratical-aspects-of=raman-amplifier.html>,» [En ligne].
- [24] Belhaddad Lina et Bourihane Leila, «proprietes structurale et optique d'un emetteur en telecommunication,» Memoire Master, Université Abderrahman Mira , bejaia, 2020/2021. [En ligne].
- [25] «<https://zestedesavoir.com/tutoriels/2256/de-la-logique-aux-processeurs/des-maths-a-lelectronique/>,» .
- [26] L. L. N. E. Islam, «contribution par simulation aux differentes sources de bruits dans les detecteurs optiques,» Memoire Master, Université badji mokhtar, Annaba, 2019. [En ligne].
- [27] Dehhas Youghourta et Temericht Tmane, «Etude et simulation de la caracteristique electronique d'une diode Laser,» Memoire Master, Université Abderahman mira , Bedjaia, 2020. [En ligne].
- [28] Meharzi Amina et Laterche Hayet, «Etude par TCAD SILVACo d'une structure n-on-p dans le cadre du projet du cern,» Memoire Master, Université Saad Dahlab , Blida, 2014/2015. [En ligne].
- [29] Medjoudj Lamia, «Simulation d'une diode schttky a bae d'AlGaAs,» Memoire Master, universite Muloud Mammeri de tizi-ouzou, 2018. [En ligne].
- [30] H. Ridha, «Etude et simulation d'un transistor VDMOS avec TCAD SILVACO,» Memoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2014.
- [31] Melouki Dilmi, «Etude des performances de la cellule InGaP/GaAs/Ge par simulation,» Memoire Master, Université Mohamed Boudiaf , M'sila, 2016.

- [32] Ouarouf celina et Meziane Naouel, «Analyse numerique de l'impact de la couche active sur l'efficacite quantique des Lasers a cavite vertical(VCSEL),» Memoire Master,Universite Abderrahman Mira, Bejaia, 2023. [En ligne].
- [33] Aguemmoume Nour El Houda, «Etude des influences des anneaux de garde sur les performances d'un dispositif semi-conducteur de type diode a jonction p-n,» Memoire Master,Universite Saad Dahlab de Blida, 2014/2015.
- [34] Moustapha Beghdadi, «caracterisation et simulation d'un transistor bipolaire a heterojonction (Si/SiGe) en hautes frequences,» Memoire Master,universite Mouloud Mammeri de tizi-ouzou, 2017.
- [35] Massilia Mansouri et Sarra Massilia, «Simulation numerique des caracteristiques electriques d'une cellule solaire a double jonction en AlGaAs/InP,» Memoire de Master , Universite Mohamed Khider, Biskra, 2020.

Résumé

Le monde des télécommunications a connu des avancées significatives avec l'essor de la fibre optique. Utilisant des fils de verre ou de plastique pour transmettre des données sous forme de lumière.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude des émetteurs et récepteurs optiques qui ont un rôle essentiel dans les systèmes de communication optique. Les émetteurs optiques convertissent les signaux électriques en signaux lumineux pour la transmission via fibre optique, tandis que les récepteurs optiques reconvertissent ces signaux en signaux électriques exploitables.

Une partie du travail consiste à la modélisation de deux dispositifs émetteur-récepteur optiques à savoir une diode LASER et une diode PIN permettant d'étudier les performances de ces dispositifs avant leur fabrication.