



N° d'ordre :
N° de série :

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

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Département D'électronique

Mémoire de fin d'études présenté
Pour l'obtention du diplôme de

Master ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et techniques**
Filière : **Electronique**
Spécialité : **Télécommunications**

Présenté par : **Yasser FEGUIR**

La modulation électro-optique

Soutenu le 27/ 06/ 2012

Devant le jury composé de :

M. **Ferhat REHOUMA**
M. **Abdelkader MADJOURI**
M. **Kamel AYADI**
M. **Riadh AJGOU**
M. **Saïd MEHELLOU**

Pr.
MA.
MC.
MA.
MA.

Président
Examineur
Examineur
Examineur
Rapporteur

2011-2012

Table des matières

	Page
Remerciements	I
Dédicaces	II
Table des matières	III
Liste des figures.	VI
Liste des tableaux	IX
Abréviations et acronymes	X
Introduction générale	1

Chapitre 1 : Evolution des télécommunications et introduction aux modules**optoélectroniques**

Introduction	4
1.1 Brèf historique des télécommunications	4
1.2 systèmes de télécommunications actuelle	6
1.3 Evulution des systèmes de télécommunications actuelle	7
1.4 Introduction aux modules optoélectroniques	8
1.5 Télécommunications optiques	9
1.5.1 Historique	9
1.5.2 Evolution de la capacité de transmission optique	12
1.5.3 Réseaux de télécommunications par fibres optiques actuels	14
1.5.3.1 Architecteur de réseaux	14
1.5.3.2 Techniques de multiplexage	16
Conclusion	17

Chapitre 02 : Supports et outils de transmission optique

Introduction	20
2.1 Chaîne de transmission optique	20
2.2 La fibre optique	21
2.2.1 Définition et structure générale	21
2.2.2 Classification des fibres optiques	22
2.2.3 Propagation de la lumière dans la fibre optique	24
2.2.4 L'atténuation	25
2.2.5 Les effets linéaires	26
2.2.5.1 La dispersion chromatique	26
2.2.5.2 Dispersion modale de polarisation : PMD	28
2.2.6 Les effets non linéaires	29
2.3 Le module d'émission	30
2.3.1 Le principe du laser	31
2.3.2 Les sources	33
2.3.2.1 La diode électroluminescente LED	33
2.3.2.2 Les diodes lasers	35

2.3.3	La modulation	38
2.3.3.1	La modulation directe	38
2.3.3.2	Modulation externe	38
2.4	Le module de réception	39
2.4.1	La photodiode PIN	39
2.4.2	Photodiode à avalanche (APD)	40
2.5	Eléments du bloc de transmission	40
2.5.1	Amplificateurs optiques	41
2.5.2	Les isolateurs	41
2.5.3	Les coupleurs	41
2.5.4	Les filtres optiques	42
	Conclusion	42

Chapitre 03 : La modulation électro-optique

	Introduction	44
3.1	Définition	44
3.2	La modulation directe	44
3.3	Le modulation externe	46
3.3.1	Modulateurs électro-absorption	47
3.3.2	Modulateurs électro-optique	49
3.3.2.1	Comportements diélectriques	49
3.3.2.2	Effet électro-optique	51
3.3.3	Modulateur Mach-Zehnder	55
3.3.3.1	Principe du modulateur Mach-Zehnder	55
3.3.3.2	Modulateur LiNbO3 en coupe X	57
3.3.3.3	Modulateur LiNbO3 en coupe Z	59
3.3.3.4	Autres configurations	60
	Conclusion	62

Chapitre 4 : Présentation des outils des simulation

	Introduction	64
4.1.	Le logicielle OptiSystem	65
4. 2	L'éditeur de schéma-bloc	66
4.2.1	La fenêtre de mise en projet	67
4.2.2	Bibliothèque de composants	67
4.2.3	Les paramètres de configurations	68
4.2.4	Propriétés de composants	68
4.2.5	Le calcule	69
4.3	Les résultats de simulation	70
4.3.1	La visualisation et le traitement des résultats	70
4.3.2	Critères de qualité	71
4.3.2.1	Le diagramme de l'œil	71
4.3.2.2	Le taux d'erreur binaire	71
4.4	La simulation	72
4.4.1	Simulation d'un système optique utilise la modulation directe à 10G	72
4.4.1.1	La simulation	72
4.4.1.2	Les résultats et discussions	74
4.4.2	Simulation d'un système optique utilise la modulation externe à 40G	79
4.4.2.1	La simulation	79

4.4.2.2 Les résultats et discussions	80
Conclusion	82
Conclusion générale	83
Référence bibliographie	87

Remerciements

Je veut remercie au premier lieu le dieu qui m'avoir le fort pour compléter ces modeste travaille.

Je tiens aussi à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur Saïd mehellou, mon Directeur de mémoire.

Je voudrais remercier tous les amis dans le classe de télécommunication et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour achever ce travail.

Je tiens à remercier tous mes amis et mes collègues

Je voudrais également remercier toute ma famille, ma mère, mes frères, , mes oncles qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

Passer seguir

Dédicace

Je dédie ce travail

à ma mère et

mon père

*et à tous ceux qu'ont contribué à élever mon moral pendant la
période de réalisation de ce modeste travail*

Liste des figures

Figure	Titre de la figure	Page
Figure 1.1	: Schéma général d'un système de communication par liaison hertzienne	6
Figure 1.2	: Schéma général d'un système de communication par fibre optique.	6
Figure 1.3	: Expérience de John Tyndall : Comment a été l'attente des résultats.	10
Figure 1.4	: Expérience de John Tyndall : Quel fut le résultat.	10
Figure 1.5	: Forme du support pour guidée la lumière.	10
Figure 1.6	: Différentes configurations de réseaux locaux.	15
Figure 2.1	: Schéma de principe d'une liaison optique	20
Figure 2.2	: Constitution d'une fibre optique.	21
Figure 2.3	: Le guidage du signal optique dans une fibre optique	22
Figure 2.4	: Classification des fibres optiques.	23
Figure 2.5	: Atténuation spectrale d'une fibre.	26
Figure 2.6	: Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit.	27
Figure 2.7	: Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à une biréfringence aléatoire de la PMD	29
Figure 2.8	: Absorption d'un photon.	31
Figure 2.9	: Emission spontanée d'un photon	32
Figure 2.10	: Emission stimulée	32
Figure 2.11	: Principe de l'amplificateur à boucle de rétroaction.	33
Figure 2.12	: Structure d'une diode LED simple.	34
Figure 2.13	: Structure d'une diode LED GaAs- AlGaAs de type 'Burris'	35
Figure 2.14	: Diode Laser à double hétérojonction	36
Figure 2.15	: Spectre d'émission d'une diode Laser. (a) juste en-dessous du seuil d'émission laser ; (b) au-dessus du seuil	36
Figure 2.16	: Puissance émis par une diode Laser en fonction du courant.	37
Figure 2.17	: Puissance émise par une diode Laser en fonction du temps.	37
Figure 2.18	: Photodiode PIN.	38
Figure 3. 1:	: Synoptique de la modulation directe.	44
Figure 3. 2:	: Modulation directe d'une diode laser.	45
Figure 3. 3	: Le phénomène d'oscillation et de relaxation.	46

Figure 3. 4:	: Synoptique de la modulation externe.	47
Figure 3. 5:	: : Schéma simplifié du modulateur à électro-absorption..	47
Figure 3. 6:	: Ellipsoïdes de cristaux uniaxes. La figure a) illustre un cristal uniaxe positif ($n_e > n_o$), l'ellipsoïde des indices a une forme allongée verticalement. La figure b) illustre un cristal uniaxe négatif ($n_e < n_o$), l'ellipsoïde des indices a une forme aplatie.	51
Figure 3. 7:	: Schéma de principe d'un modulateur externe de type Mach-Zenhder.	56
Figure 3. 8:	: Courbe caractéristique $T(V)$ d'un composant MZM réel.	57
Figure 3.6	: Schéma du transfert d'énergie de l'ytterbium vers l'erbium	57
Figure 3. 9:	: Vue 3D d'un modulateur en coupe X single drive ; configuration des électrodes en Push-Pull ; état de polarisation TE.	58
Figure 3. 10	: Vue 3D d'un modulateur en coupe Z single drive ; configuration des électrodes en Push-Pull ; état de polarisation TM.	59
Figure 3. 11	: Vue en coupe d'un modulateur Mach-Zehnder LiNbO3 en coupe X, avec une structure à dual-driver.	61
Figure 3. 12	: Vue en coupe d'un modulateur Mach-Zehnder LiNbO3 en coupe Z, avec une structure à dual-driver.	61
Figure 4.1	: L'éditeur de schéma-bloc d'OptiSystem.	64
Figure 4.2	: La fenêtre de mise en projet d'OptiSystem.	66
Figure 4.3	: La Bibliothèque de composants dans l'OptiSystem.	67
Figure 4.4	: Les composants disponibles dans le dossier Default de la bibliothèque d'OptiSystem.	68
Figure 4.5	: La fenêtre des paramètres de configuration pour la mise en projet.	68
Figure 4.6	: La fenêtre des propriétés de composants (par ex : <i>CW Laser Measured</i>).	69
Figure 4.7	: La fenêtre des calculs de mise en projet.	69
Figure 4.8	: Les fenêtres de la visualisation et le traitement des résultats.	70
Figure 4.9	: Montage pour la simulation d'un système de transmission optique utilisant la modulation directe.	73
Figure 4.10	: Diagramme d'œil avec les trois longueurs différentes dans le cas de la modulation directe.	76

Figure 4.11	: Phénomènes d'oscillation de relaxation et le chirp de la modulation directe.	77
Figure 4.12	: Phénomènes d'oscillation de relaxation et le chirp dans le cas de la modulation externe avec le modulateur de MZ à daut-drive.	78
Figure 4.13	: Montage pour la simulation d'un système de transmission optique utilisant la modulation externe avec le modulateur de MZ daut drive.	79
Figure 4.14	: : Diagramme d'œil avec les trois longueurs différentes dans le cas de la modulation externe.	81

Liste des tableaux

Tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 1. 1	: Comparaison entre les trois types de réseau fixe.	15
Tableau 3. 1	: Principales propriétés optiques des cristaux de LiNbO ₃ .	53
Tableau 4.1	: Caractéristiques des fibres optiques de type SMF et DCF.	74
Tableau 4.2	: Influence du facteur Q et du TEB sur le débit dans un système utilisant la modulation directe.	74
Tableau 4.3	: Influence de la longueur sur le facteur Q et le TEB pour un système utilisant la modulation directe.	77
Tableau 4.4	: Variation du débit en fonction du facteur Q et du TEB pour le système utilisant la modulation externe de type MZ.	80
Tableau 4.5	: variation de la longueur de transmission en fonction du facteur Q et TEB pour un système utilisant la modulation externe de type MZ.e.	80

Abréviations et acronyms

ETDM	Electrical Time Division Multiplexing
OTDM	Optical Time Division Multiplexing
WDM	Wavelength Division Multiplexing
ON	L'ouverture numérique
NLSE	Non Linear Schrödinger Equation
PMD	Dispersion modale de polarisation
SPM	Self Phase Modulation
XPM	Cross-Phase Modulation
SRS	Stimulated Raman Scattering
FWM	Four Waves Mixing
LED	Diode electroluminescent
LASER	amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement
DL	Diode LASER
APD	Photodiode à avalanche
EAM	Modulateur électro-absorption
MZM	Mach-Zehnder modulator
DCF	Dispersion Compensation Fiber
EDFA	amplificateur à fibre dopé Erbium
SMF	Single Mode Fiber

Introduction générale

L'ère de la vitesse, est une étiquette que nous entendons souvent à l'heure actuelle. En effet, dans la plupart des domaines, nous constatons que les chercheurs et les scientifiques cherchent des moyens pour accomplir des tâches plus rapidement et à moindre coût, et le domaine qui relève le plus de cette étiquette, est le domaine des télécommunications.

Avec l'avènement d'Internet et sa diffusion à travers le monde, les besoins en bande passante sont devenus de plus en plus importants afin de véhiculer la masse grandissante d'information sur les différents réseaux, avec fiabilité et en préservant une bonne qualité de service. En effet, ceci a nécessité le développement de systèmes de communications assez performants et fiables pour interconnecter un nombre constamment en croissance d'utilisateurs à travers le monde. A l'heure actuelle, la technologie la plus efficace et la plus répandue repose sur les systèmes de transmission par fibres optiques.

La fibre optique offre en théorie des bandes passantes de plusieurs centaines de gigahertz. Néanmoins, la quantité d'information transmise est limitée en partie par la technique de modulation. Pour des débits supérieurs à 10 Gbps, les émetteurs commerciaux utilisent aujourd'hui la modulation externe. Cette technique, moins sensible à la dispersion chromatique et offrant une plus grande pureté spectrale, est réalisée à partir d'une source laser continue et d'un modulateur optique.

L'objectif de ce travail est d'étudier la modulation externe et en particulier le modulation électro-optique pour connaître l'étendue de son impact sur les performances des systèmes de transmission optique et de faire une comparaison avec la modulation directe qui souffrent de plusieurs problèmes tels que les chirp et l'oscillation de relaxation, et cela par l'utilisation du système de simulation OptiSistem 7 pour simuler les deux types de modulation dans une même chaîne de transmission.

Ce mémoire est organisé en 4 chapitres

Le premier chapitre commence par un bref historique des télécommunications, une présentation de l'évolution des systèmes de télécommunication hertziens et optiques et des modules optoélectroniques. En fin on termine par une présentation de l'architecture des réseaux et les techniques de transmission par fibre optique.

Le deuxième chapitre est consacré à une description détaillée des liaisons optiques, des sources, des détecteurs et en se concentrant tout particulièrement sur la fibre optique, parce qu'elle est le porteur de l'information et les problèmes qui en découlent y compris la dispersion chromatique à cause de la génération des impulsions n'est pas purement monochromatique, ce qui justifie l'utilisation de la modulation externe.

Le troisième chapitre débute par une introduction sur la modulation optique et ses différents types direct et externe. Il est consacré aussi à la présentation du phénomène électro-optique dans les modulateurs Mach-Zehnder (MZ) intégrés sur niobate de lithium LiNbO_3 (LN) en commençant par un rappel sur le principe de fonctionnement et les différentes technologies de configuration du modulateur.

Le quatrième chapitre contient deux parties :

La première partie est une description générale du simulateur OptiSystem 7 et ses critères de qualité tels que le diagramme d'œil, le TEB ...etc.

La deuxième partie est une simulation des deux types de modulation directe et externe dans un système utilisant la fibre standard télécom (Single Mode Fiber, SMF) à haut dispersion et une fibre ayant une dispersion chromatique de signe opposé pour la compensation s'appelant la fibre DCF (Dispersion Compensation Fiber), ceci est pour voir jusqu'à quel point le débit et la distance de la fibre peuvent atteindre dans les deux types de modulation.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale et perspectives.

Chapitre

1

Evolution des télécommunications et introduction aux modules optoélectroniques

Sommaire

Introduction	4
1.1 Bref historique des télécommunications	4
1.2 Systèmes de télécommunications actuels	6
1.3 Evolution des systèmes de télécommunications actuels	7
1.5 Introduction aux modules optoélectroniques	8
1.5 Les télécommunications optiques	9
1.5.1 Historique	9
1.5.2 Evolution de la capacité de transmission optique.....	12
1.5.3 Réseaux de télécommunications par fibres optiques actuel	14
1.5.3.1 L'architecteur de réseaux	14
1.5.3.2 Les techniques de multiplexage	16
Conclusion.....	17

Introduction

Le développement des télécommunications s'est caractérisé par l'utilisation d'un domaine de fréquences de plus en plus vaste, depuis les quelques kilohertz des premières lignes téléphoniques jusqu'aux quelques dizaines de gigahertz des liaisons radio. Il était donc a priori logique que la lumière puisse être utilisée afin de prolonger le spectre. Elle ne pouvait cependant devenir un moyen de télécommunication que dans la mesure où il était possible de moduler une source optique à des fréquences élevées et de transmettre les signaux sur un support stable et peu atténuant. Le premier problème a été résolu par la mise au point des dispositifs à semi-conducteurs comme les lasers et le second par les fibres optiques.

La transmission des données par fibre optique nécessite des conversions : électrique - optique ou optique - électrique du signal. Ce chapitre se terminera donc par une brève description des modules optoélectroniques avant d'entamer l'étude des dispositifs qui sont responsables à cette conversion. Mais, nous devons tout d'abord passer en revue les étapes de l'évolution des télécommunications depuis l'apparition du télégraphe jusqu'aux communications optiques.

1.1 Bref historique des télécommunications [35][36]

En fait, la préhistoire des télécommunications s'étend sur des millénaires, mais on peut dire que l'histoire proprement dite des télécommunications n'a commencé qu'à la fin du XVIIIe siècle avec l'apparition, en France, du télégraphe optique de Claude Chappe. Ce télégraphe optique a connu un grand succès à la fin du XVIIIe siècle et pendant toute la première moitié du XIXe siècle. Avant cet événement on ne peut plus réellement parler, à ce sujet, de préhistoire des télécommunications. Beaucoup estiment même que l'ère des télécommunications s'est ouvert avec la mise au point du télégraphe optique de Claude Chappe en France entre 1790 et 1793. Il paraît plus raisonnable de dire que l'invention de Chappe est un événement clé de l'histoire des moyens de télécommunications. L'ère des télécommunications modernes ne commencera réellement qu'avec l'invention du télégraphe électrique en 1837.

La mise en mémoire, le traitement et la transmission à courte ou longue distance, sous forme électronique, des informations de toute nature (voix, écrits, signaux, données, images fixes et animées) reposent sur l'existence de composants électroniques actifs qui permettent la

réalisation des fonctions élémentaires nécessaires (mémorisation, amplification, échantillonnage...).

L'invention du transistor en 1948, par William Shockley et son équipe des Bell Telephone Laboratories ouvrait une ère technologique nouvelle qui préludait au développement prodigieux des télécommunications et de l'informatique. En fait, la grande mutation technique ne commencera véritablement qu'au début des années 1960 avec l'apparition des « circuits intégrés », puis, un peu plus tard, avec le développement des circuits intégrés à grande échelle (LSI) et à très grande échelle (VLSI).

Le monde des télécommunications a lui aussi connu l'intrusion puis l'envahissement des puces électroniques, à la fois par substitution dans les domaines d'emploi traditionnels des composants électroniques, comme dans les dispositifs de transmission, mais aussi par remplacement de techniques non électroniques, dans les autres domaines. C'est ainsi que la commutation, à l'origine électromécanique, a été entièrement bouleversée par les techniques de numérisation de la parole et de commutation temporelle, fondées sur des traitements électroniques de l'information et donc sur l'emploi des circuits intégrés électroniques.

D'autre part, l'apparition du numérique, qui permet la transformation et la transmission de toute information visuelle sous la forme de bits, constitue un des principaux moteurs de la transformation du secteur des télécommunications.

Dans le domaine des transmissions, l'électronique devint rapidement un constituant essentiel, avec le multiplexage et le câble coaxial. Le multiplexage a en effet permis d'empiler un grand nombre de communications sur un même support, et en outre sur les câbles coaxiaux. Parallèlement une autre technique de transmission, également basée sur l'électronique, fit également son apparition dans les années 1950 : le faisceau hertzien. En 1951, le premier faisceau hertzien transcontinental (entre New-York et San Francisco) fut mis en service. L'électronique intervint également dans les liaisons sous-marines, et en 1956 fut inaugurée la première liaison téléphonique transatlantique par câbles coaxiaux. En 1960, les câbles sous-marins sont concurrencés par les satellites de télécommunications, et en 1962 fut mis en œuvre la première liaison transatlantique de télévision par satellite. Parallèlement à l'essor des satellites, de nouveaux supports de transmission se développent : les fibres optiques. Dès la fin des années 1980 les fibres optiques s'imposèrent, et en 1988 fut mis en service le premier système transatlantique en fibres optiques.

1.2 Systèmes de télécommunications actuels [35]

Nous pouvons distinguer deux types de systèmes de télécommunications : les systèmes hertziens (satellite, radio...) et les systèmes filaires (câble coaxial, fibre optique...).

La Figure 1.1 illustre le schéma général d'un système de communication par liaison hertzienne, et la Figure 1.2, le schéma général d'un système de communication par fibre optique.

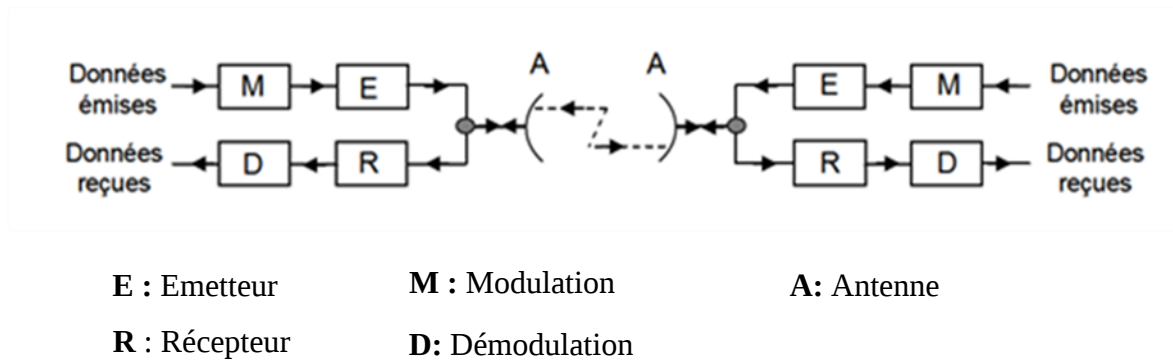


Figure 1.1: Schéma général d'un système de communication par liaison hertzienne.

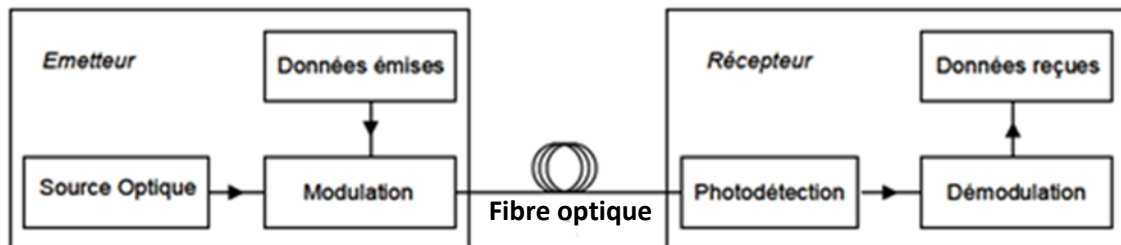


Figure 1.2: Schéma général d'un système de communication par fibre optique.

Ces deux systèmes ne sont pas similaires, la différence essentielle réside dans la manière de transmettre l'information : dans le cas du système hertzien, le support de transmission est l'air, et dans le cas du système par fibre optique, le support de transmission est la fibre optique. Les éléments constituant les modules émetteur et récepteur sont donc conçus en fonction de ce paramètre, et sont donc différents pour ces deux systèmes, mais les fonctions les composant restent identiques : dans les deux cas nous retrouvons les fonctions de modulation et démodulation. La modulation permet de modifier les caractéristiques d'une

onde électromagnétique pour lui faire porter l'information à transmettre. La démodulation permet d'effectuer l'opération inverse, et permet de fournir des données reçues aussi semblables que possible à celles émises, appliquées avant la modulation.

1.3 Evolution des systèmes de télécommunications actuels [35]

Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, l'évolution des télécommunications est sans cesse. Aujourd'hui, et quel que soit le système de télécommunication (système hertzien ou système par fibre optique), l'objectif est toujours d'améliorer les performances, tout en minimisant les coûts de fabrication et d'utilisation. L'évolution des télécommunications est permanente, et accompagnée de l'évolution de la consommation : avec l'essor d'Internet, de la téléphonie mobile... la demande du grand public et des professionnels, en termes de rapidité, mobilité..., est toujours accrue.

L'amélioration des performances d'un système se traduit essentiellement par la montée en fréquence d'application, l'augmentation du débit transmis, et de la distance sur laquelle se fait cette transmission.

L'évolution des systèmes de télécommunications s'accompagne également par une augmentation de la densité d'intégration. Regrouper les fonctions dans un même module, tout en augmentant ses performances, permet d'une part de supprimer un certain nombre de transitions et de connexions entre éléments, qui sont sources de pertes, et d'autre part de diminuer l'encombrement du dispositif, ainsi que son poids, qui est, par exemple, un paramètre important dans le cas des systèmes embarqués sur un satellite. Un autre avantage de regrouper les fonctions au sein d'un seul et même module est la diminution du coût du packaging, puisqu'un seul boîtier est alors nécessaire.

1.5 Introduction aux modules optoélectroniques

Comme leur nom l'indique, les composants optoélectroniques permettent de transformer l'énergie électrique en énergie lumineuse et réciproquement. Ils apparaissent donc d'emblée comme particulièrement importants dans un grand nombre d'applications qui vont du domaine grand public à celui du professionnel hautement spécialisé : visualisation, affichage, lecteur de codes barres, imprimante laser, lecteurs de disques compacts, caméscope, télécommunications, optronique militaire. Les composants optoélectroniques assurent, entre autres, deux fonctions principales : l'émission et la réception.

L'émission correspond à la réalisation d'une source lumineuse. Cette source peut être incohérente (émission simultanée de plusieurs longueurs d'onde sans relation entre elles, analogue à l'émission d'une ampoule électrique classique). C'est la diode électroluminescente. Cette diode peut émettre dans divers domaines du spectre : l'infrarouge, le rouge, le vert et plus récemment le bleu. Une autre source, plus difficile à réaliser mais plus riche d'applications est la diode laser : son rayonnement est monochromatique, avec des propriétés de cohérence de phase et de directivité spatiale.

La réception est l'opération inverse, transformant un signal lumineux en un signal électrique facilement détectable et traitable à l'aide des outils et techniques habituels. La forme la plus simple à base de semi-conducteurs est la diode p-n (le plus souvent, c'est une structure un peu plus compliquée dite : p-i-n avec une zone intrinsèque en sandwich entre les zones p et n) complétée éventuellement par un élément préamplificateur tel que FET (transistor à effet de champ). Des performances supérieures de détectivité (sensibilité ...) peuvent être obtenues avec des diodes dites à avalanche (abréviation usuelle APD pour avalanche photodiode) dans lesquelles une multiplication de porteurs, analogue à ce qui se passe dans un tube photomultiplicateur classique, est réalisée à l'intérieur même de la structure détectrice.

Dans les télécommunications, on recherche avec un très haut degré de priorité à utiliser des composants optoélectroniques à base de semi-conducteurs. Ceux-ci possèdent en effet de remarquables propriétés : haut rendement de conversion électrique-optique, faible tension d'excitation facilitant ainsi grandement les conditions d'utilisation, fiabilité... Tout élément ou composé semi-conducteur (Ge, Si, GaAs, InP, ...) peut être utilisé comme récepteur basé sur les transitions entre bande de valence et bande de conduction. Il n'en est pas de même pour l'émission laser qui requiert une bande interdite directe et exclut donc le germanium et le

silicium au profit des semi-conducteurs composés parmi lesquels l'arséniure de gallium (GaAs) et le phosphure d'indium (InP) sont les plus utilisés, ce dernier l'emportant largement. Les systèmes de télécommunications requièrent, pour être opérationnels, de mettre en œuvre comme émetteurs des lasers à semi-conducteurs fonctionnant en continu à température ambiante avec possibilité de modulation directe par variation du courant d'excitation. Cela est simple à dire, mais plus difficile à réaliser ! Il a fallu près de dix ans entre la première démonstration de l'effet laser dans un semi-conducteur (1962 pour un fonctionnement en impulsions à 4°K dans GaAs) et le premier fonctionnement en continu à la température ambiante (1970, avec une durée de vie très réduite!).

Comme cela a été signalé, la réalisation des premiers systèmes de télécommunications par fibres optiques a bénéficié du « miracle » de la conjonction de la « première fenêtre » de transmission des fibres à base de silice (3dB/km) avec le domaine d'émission de l'arséniure de gallium (0,85 mm).

Les améliorations de la fabrication des fibres ont permis de profiter de la deuxième (1,3 mm 0,4 dB/km) puis de la troisième (1,55 mm 0,2 dB/km) fenêtre. Ce sont les composés à base de phosphure d'indium qui sont adaptés à ces longueurs d'onde. Les composés quaternaires (In, Ga, As, P) et ternaires (In, Ga, A) ont fait l'objet d'études intensives depuis une vingtaine d'années pour aboutir aux composants aux propriétés remarquables actuellement utilisés et qui sont en cours d'amélioration continue. Ces propriétés et performances résultent de progrès dans la définition des structures (des matériaux massifs aux structures à puits quantiques) ainsi que, et sans doute surtout, dans la mise au point de nouvelles technologies d'élaboration (épitaxie par jets moléculaires, épitaxie en phase vapeur par décomposition de composés organométalliques). Ces technologies, qui supplantent l'épitaxie en phase liquide, permettent une précision ultime (la couche atomique) dans l'épaisseur des dépôts, leur composition, leur homogénéité sur de grandes surfaces, points essentiels pour atteindre les performances et la fiabilité requises.

1.5 Les télécommunications optiques

1.5.1 Historique

Boston, Massachusetts, Etats-Unis, 1870. Un physicien irlandais son nom est John Tyndall a fait une démonstration d'une expérience qui non seulement réfuté cette croyance, mais a donné naissance à une révolution dans la technologie des communications [3]. Son

idée était très simple. Il a rempli un conteneur par l'eau et il a fait un trou pour entrer dans le allumer de bougie, et un autre trou pour la sortie d'eau et de lumière ensemble.

On s'attendait à ce que la lumière rayonner tout droit sorti du trou et l'eau vers le bas, comme indiqué à la figure 1.3.

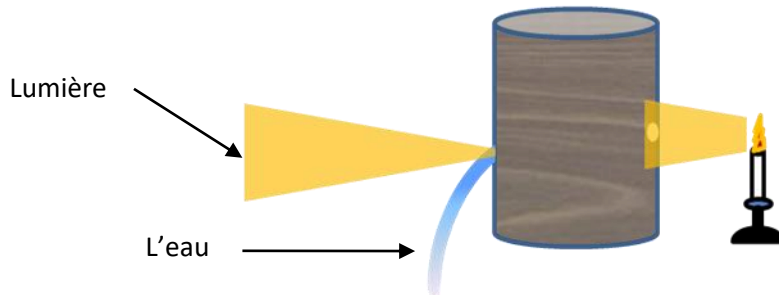


Figure 1. 3: Expérience de John Tyndall : **Comment a été l'attente des résultats.**

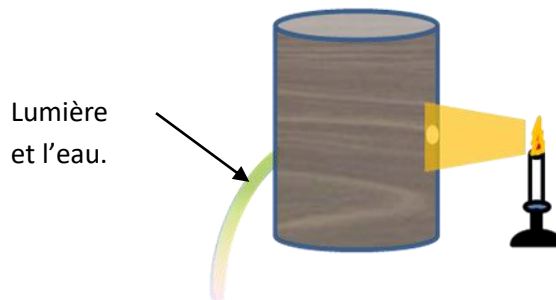


Figure 1. 4: Expérience de John Tyndall : **Quel fut le résultat.**

Maintenant, regardez la figure 1.4 pour ce qui s'est réellement passé.

Il avait trouvé un moyen de guider la lumière.

Les exigences de base restent les mêmes aujourd'hui - une source de lumière et d'un matériau transparent (généralement en plastique ou en verre). La lumière peut être guidée autour de n'importe quel chemin complexe comme dans la figure 1.5.

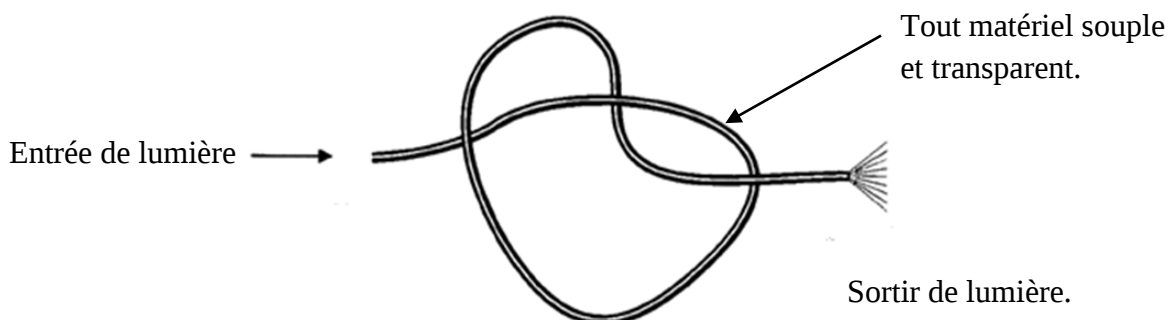


Figure 1. 5: Forme du support pour guidée la lumière.

L'utilisation de la lumière pour envoyer des messages n'est pas nouvelle. Les feux ont été utilisés pour la signalisation dans les temps bibliques, les signaux de fumée ont été utilisés pour des milliers d'années. L'idée d'utilisation la fibre de verre pour porter un signal de communications optique origine d'Alexander Graham Bell [1] [2] [3] [7].

En 1880, quatre ans seulement après son invention du téléphone, Alexander Graham Bell a utilisé la lumière pour la transmission de la parole. Il a appelé son appareil un Photophone. Il était un tube avec un miroir flexible à son extrémité. Il a parlé dans le tube et le son du miroir vibrant. La lumière modulée est détectée par une cellule photoélectrique placée à une distance d'environ deux cent mètres. Le résultat n'était certainement pas bien, mais le discours pourrait au moins être compris.

Suite à l'invention du laser à rubis en 1960 [4] [7], l'utilisation directe de la lumière pour la communication a été réétudiée. Toutefois, les liaisons de données souffrent encore de la nécessité d'un chemin sans obstacle entre l'émetteur et le récepteur. En 1966, C. Kao de 'Standard Télécommunications Laboratoires' montra l'intérêt que pouvait présenter un système de communication reposant sur un faisceau laser guidé par une fibre optique sans défauts et en 1970 une équipe de chercheurs dans les laboratoires de Corning, R. Maurer, D. Beck et P. Schultz, parvint à adapter cette méthode pour produire une préforme de fibre optique. Les fibres qui furent obtenues à partir de cette préforme avaient un cœur dopé au titane. Elles étaient d'une qualité telle qu'elles rendaient possibles les télécommunications par voie optique [18]. En 1983 il a été utilisé pour envoyer un message, par le code Morse, sur une distance de 240 km (150 miles) entre deux sommets.

La réflexion totale interne dans les fibres optiques responsable du phénomène de base guidant la lumière est connue depuis le dix-neuvième siècle. Bien que les fibres de verre ont été fabriquées dans les années 1920. Le domaine de la fibre optique n'est pas né avant les années 1950 lorsque l'utilisation d'une couche de revêtement conduit à une amélioration considérable des caractéristiques des fibres. L'idée que les fibres optiques bénéficieraient d'un revêtement diélectrique n'était pas évidente et a une histoire remarquable. Le domaine de la fibre optique s'est développé rapidement au cours des années 1960, principalement dans le but de la transmission d'images à travers un faisceau de fibres à verre. Ces fibres sont extrêmement précoces perte (perte > 1000 dB / km) de la norme moderne. Cependant, la situation radicalement changé en 1970 [4] [7]. Les pertes de fibres de silice ont été réduits à moins de 20 dB / km. De nouveaux progrès dans la technologie de fabrication a entraîné en 1979 une

perte de seulement 0,2 dB / km dans la région de longueur d'onde de 1,55 μm , un niveau de perte limitée principalement par le processus fondamental de la diffusion de Rayleigh [4].

La disponibilité de fibres de silice à faible perte a conduit non seulement à une révolution dans le domaine des communications à fibres optiques, mais aussi à l'avènement du nouveau champ de la fibre optique non linéaire. Raman stimulée de Brillouin et de diffusion de processus dans les fibres optiques ont été étudiées dès 1972. Une contribution importante a été faite en 1973 quand il a été suggéré que les fibres optiques peuvent soutenir un soliton comme un résultat d'une interaction entre la dispersion et les effets non linéaires. Solitons optiques ont été observés dans une expérience de 1980 et a conduit à un certain nombre de progrès au cours des années 1980 dans la génération et le contrôle des impulsions optiques ultra-brèves.

1.5.2 Evolution de la capacité de transmission optique [7]

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

- ✓ Les fibres uni-modales faibles pertes;
- ✓ Les fibres à dispersion décalée;
- ✓ Les diodes laser fonctionnant à 1.55 μm ;
- ✓ L'amplificateur à fibre;
- ✓ La technique du WDM.

On a réussi à faire coïncider le minimum d'atténuation et le minimum de dispersion des fibres (grâce aux fibres à dispersion décalées) autour de 1.55 μm et il se trouve que cette valeur correspond approximativement au milieu de la bande de gain de l'amplificateur à fibre dopée à l'Erbium.

A l'heure actuelle, pour des liaisons transatlantiques par exemple, des solutions commerciales proposent des débits de l'ordre de 1.26 Tb/s ce qui correspond à la possibilité d'acheminer simultanément presque 20 millions de conversations téléphoniques, A raison de 0.2 centimes d'euro la minute de communication, une liaison de ce type engendre un chiffre d'affaire qui est de l'ordre de 4 million d'euro la minute !

Quatre générations de systèmes de télécommunications optiques basés sur des technologies distinctes se sont succédé jusqu'à 2002.

*** Système de première génération 1975-1978**

- Fibres multi-modes et diodes lasers à 0.9 μm ;
- Problèmes de dispersion modale;
- Débits quelques Gb/s.km.

*** Système de deuxième génération 1978-1983**

- Fibres uni-modales, diodes laser à 1.3 μm ;
- Plus de problèmes de dispersion modale;
- Amplification électronique en ligne;
- Débit 500 Gb/s.km.

*** Système de troisième génération 1983-1989**

- Fibres à dispersion décalée;
- Diodes lasers à 1.5 μm ;
- Minimisation de l'atténuation;
- Débit 500 Gb/s.km.

*** Système de quatrième génération 1989-2002**

- Amplificateur à fibre.
- Possibilité d'utiliser simultanément plusieurs longueurs d'ondes sur la même fibre: système WDM;
- Débit 100000 Gb/s.km.

1.5.3 Réseaux de télécommunications par fibres optiques actuel

1.5.3.1 L'architecteur de réseaux

Un réseau est un ensemble d'équipements reliés entre eux, grâce à des lignes physiques (câbles, fibre optique, ...) ou des ondes hertziennes dans le but d'échanger des données selon des règles (protocoles) bien définies. Si le lien est physique (câble, fibre, ...) le réseau est dit fixe ; si le lien est sous forme d'ondes hertziennes, appelée réseau sans fil. La suite concerne la transmission par fibres optiques. Comme l'indique la figure 1.2 la transmission optique est un système fixe.

Le réseau de communications optiques est segmenté en fonction des différents besoins en débit, en bande passante, en distance de transmission, ...

On distingue trois grandes catégories :

A - Les réseaux longues distances (ou les WAN, Wide Area Network)

Ce sont les réseaux déployés à l'échelle d'un pays ou d'un continent et dont les nœuds sont de très grands centres urbains.

B - Les réseaux métropolitains (Metropolitan Area Network MAN)

Qui correspondent aux réseaux mis en œuvre dans une grande ville ou une agglomération et qui permettent de relier entre eux par exemple différents arrondissements.

C - Les réseaux locaux (Local Area Network = LAN)

Encore appelés réseaux de distribution ou réseaux d'accès. Ils représentent le dernier maillon et finissent d'acheminer les informations à l'abonné. Ils sont donc plus courts et moins gourmands en capacité.

Selon la localisation de la terminaison optique, différentes configurations sont envisageables :

- FTTH/FTTO (Fiber To The Home / Fiber To The Office) : la terminaison de réseau optique, qui est propre à un abonné donné, est implantée dans ses locaux. La fibre va donc jusqu'à son domicile ou son bureau, et la partie terminale en cuivre est très courte.

- FTTB (Fiber To The Building) : la terminaison de réseau optique est localisée soit au pied de l'immeuble, soit dans un local technique généralement situé en sous-sol, soit dans une

armoire ou un conduit de palier. Elle est partagée entre plusieurs abonnés qui lui sont raccordés par des liaisons en fil de cuivre.

- FTTC/FTTCab (Fiber To The Curb / Fiber To The Cabinet) : la terminaison de réseau optique est localisée soit dans une chambre souterraine, soit dans une armoire sur la voie publique, soit dans un centre de télécommunications, soit sur un poteau. Selon le cas, il est envisagé de réutiliser le réseau terminal en cuivre existant ou de mettre en œuvre une distribution terminale par voie radioélectrique.

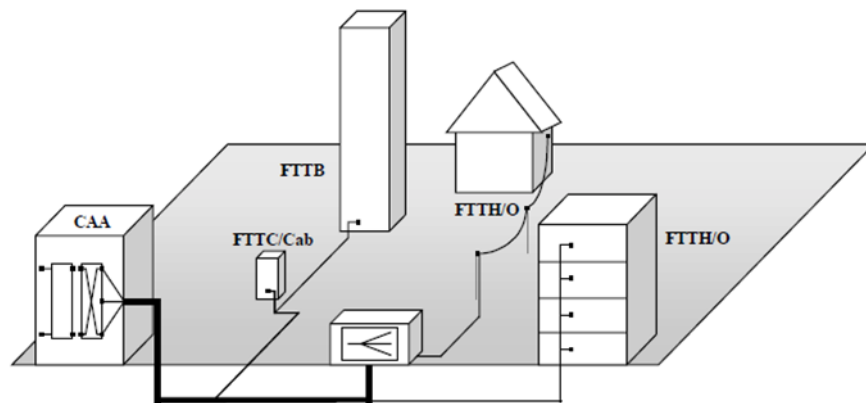


Figure 1. 6: Différentes configurations de réseaux locaux.

Les caractéristiques des trois types de réseau fixe sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	réseau LAN	réseau MAN	réseau WAN
Nombre d'éléments	un ensemble d'équipements appartenant à une même société	interconnecte plusieurs LANs	interconnecte plusieurs LANs ou MANs
Dispersion géographique	les machines sont situées sur un périmètre géographiquement restreint	réseaux LANs géographiquement proches	très grandes distances
Protocoles utilisés	Ethernet, Token Ring, FDDI, etc.	FDDI, ATM, SDH, etc.	SDH, SONET, WDM, etc.

Tableau 1. 1: Comparaison entre les trois types de réseau fixe.

1.5.3.2 Les techniques de multiplexage [23]

Pour répondre aux besoins de transmettre toujours plus d'information, deux techniques de multiplexages ont été développées dans les télécommunications optiques : le multiplexage temporel (Time Division Multiplexing qui peut être électrique ETDM ou optique OTDM) et le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing).

A - Multiplexage temporel électrique ETDM

Electrical Time Division Multiplexing, c'est la technique qui nécessite le moins d'opérations, son principe repose sur le fait que si l'on veut multiplexer N trains d'éléments binaires représentant N informations différentes, il faut diviser par N la longueur temporelle de chaque élément et les décaler les uns par rapport aux autres, grâce à des multiplexeurs 2 : 1 ou 4 : 1. Ce type de multiplexage est réalisé pour une longueur d'onde optique.

B - Multiplexage en longueur d'onde WDM

La bande passante potentielle d'une longueur d'onde autour de $1.55 \mu\text{m}$, définie comme la fenêtre sur laquelle l'atténuation reste suffisamment faible pour permettre la transmission, est théoriquement très grande, une dizaine de THz. Les débits qui peuvent être transmis sont donc extrêmement élevés. Néanmoins, l'utilisation de cette capacité se heurte à divers problèmes, ne serait ce que la dégradation due à l'interférence entre symboles provoquée par la dispersion de la fibre, qui devient de plus en plus importante lorsque le débit à une longueur d'onde donnée augmente. C'est pourquoi au lieu d'utiliser une seule longueur d'onde optique, il est possible d'utiliser N canaux (ou N longueurs d'onde) transportant chacun un débit N fois moindre. Dès lors que le spectre de chaque canal est séparé de celui de son voisin, il est possible de récupérer l'information transmise sans diaphonie.

Le principe du multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing) consiste donc à partager le débit numérique à transmettre D_b entre N porteuses optiques à différentes longueur d'onde transmettant chacune un débit D_b / N . Par exemple on transmettra quatre fois 2.5 Gbit/s sur quatre porteuses optiques à quatre longueurs d'onde différentes au lieu de transmettre 10 Gbit/s sur une longueur d'onde. Les principales limites de ce type de multiplexage sont : la bande passante des amplificateurs optiques et l'espacement minimum possible entre chaque longueur d'onde. Néanmoins différentes techniques permettent d'accroître le potentiel de ce type de multiplexage.

Conclusion

Scientifiques et chercheurs des télécommunications sont à la recherche toujours de la plus grande rapidité et la plus grande capacité de transfert de données. Cela se produit lorsque on passe à des fréquences plus élevées, Mais le changement des fréquences conduit à un changement de la nature des composants électroniques utilisés, par exemple les fréquences d'ordre GHz (micro-ondes) ne conviennent pas avec l'électronique classique pour cela les circuits intégrés sont apparues pour donner une plus grande vitesse de transfert des informations.

L'apparition de l'Internet et la prolifération des réseaux des télécommunications à travers le monde et ses complexités ont donné besoin à une plus grande vitesse de transfert d'informations. Les télécommunications déplacées vers les fréquences d'ordre THz (la lumière visible) est une nouvelle notion qui a apparus pour le transfert d'informations, dites télécommunications optiques. Dans cette technologie le photon remplace l'électron et la fibre optique le câble de cuivre. Cette technologie apparaît en premier lieu dans la partie modulation, ce qui nécessite des composants optoélectroniques pour faire le lien électrique / optique. Les chapitres suivants approfondiront l'étude de cette technologie.

Chapitre

2

Supports et outils de transmission optique

Sommaire

Introduction.....	20
2.1 Chaîne de transmission optique	20
2.2 La fibre optique	21
2.2.1 Définition et structure générale.....	21
2.2.2 Classification des fibres optiques.....	22
2.2.3 Propagation de la lumière dans la fibre optique.....	24
2.2.4 L'atténuation	25
2.2.5 Les effets linéaires	26
2.2.5.1 La dispersion chromatique	26
2.2.5.2 Dispersion modale de polarisation : PMD	28
2.2.6 Les effets non linéaires	29
2.3 Le module d'émission.....	30
2.3.1 Le principe du laser.....	31
2.3.2 Les sources.....	33
2.3.2.1 La diode électroluminescente LED.....	33
2.3.2.2 Les diodes lasers	35
2.3.2 La modulation	38
2.3.2.1 La modulation directe	38
2.3.2.2 Modulation externe	38
2.4 Le module de réception.....	39
2.4.1 La photodiode PIN	39
2.4.2 Photodiode à avalanche (APD)	40
2.5 Eléments du bloc de transmission	40

2.5.1 Amplificateurs optiques	41
2.5.2 Les isolateurs.....	41
2.5.3 Les coupleurs	41
2.5.4 Les filtres optiques	42
Conclusion	42

Figure 2. 1: Schéma de principe d'une liaison optique	20
Figure 2. 2: Constitution d'une fibre optique.	21
Figure 2. 3: Le guidage du signal optique dans une fibre optique	22
Figure 2. 4: Classification des fibres optiques.	23
Figure 2. 5: Atténuation spectrale d'une fibre.....	26
Figure 2. 6: Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit.	27
Figure 2. 7: Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à une biréfringence aléatoire de la PMD.....	29
Figure 2. 8: Absorption d'un photon.	31
Figure 2. 9: Emission spontanée d'un photon.	32
Figure 2. 10: Emission stimulée.	32
Figure 2. 11: Principe de l'amplificateur à boucle de rétroaction.....	33
Figure 2. 12: Structure d'une diode LED simple.	34
Figure 2. 13: Structure d'une diode LED GaAs- AlGaAs de type 'Burris'.	35
Figure 2. 14: Diode Laser à double hétérojonction.	36
Figure 2. 15: Spectre d'émission d'une diode Laser. (a) juste en-dessous du seuil d'émission laser ; (b) au-dessus du seuil.....	36
Figure 2. 16: Puissance émise par une diode Laser en fonction du courant.	37
Figure 2. 17: Puissance émise par une diode Laser en fonction du temps.	37
Figure 2. 18 : Photodiode PIN.....	39

Introduction

Une liaison de transmission optique peut être définie comme le support physique sur lequel une information porteuse de signal optique se propage entre un émetteur et un récepteur. Dans l'émetteur d'une porteuse optique, généralement la sortie d'un laser, est modulée avec une séquence de bits. Au niveau du récepteur, le signal optique est à nouveau converti en un signal électrique en utilisant une ou plusieurs photodiodes. Après une décision binaire, idéalement, la séquence de bits transmis est de nouveau obtenue.

En longue distance des systèmes de transmission par exemple WDM, il ya essentiellement cinq limitations dominantes: OSNR, largeur de bande optique, la dispersion chromatique, PMD et des dépréciations non-linéaires. La tolérance à l'égard de ces échelles limites linéairement, ou même quadratique, avec le débit binaire. Par conséquent, pour construire de solides systèmes de transmission longue distance à haut débit ces dégradations de transmission doivent être considérées et si possible compensées.

L'étude dans ce travail s'accroîtra sur la modulation électro-optique qui fait partie de l'émetteur. Par conséquent, on doit passer en revue tous les éléments constitutifs de base d'un système de transmission optique, l'émetteur, le support de transmission et le récepteur et les problèmes qui en découlent.

2.1 Chaîne de transmission optique

Le principe de toute transmission de données est de faire circuler des informations entre un émetteur et un récepteur en minimisant les risques de déformation du signal reçu, de façon à assurer une fiabilité maximale du transfert de l'information.

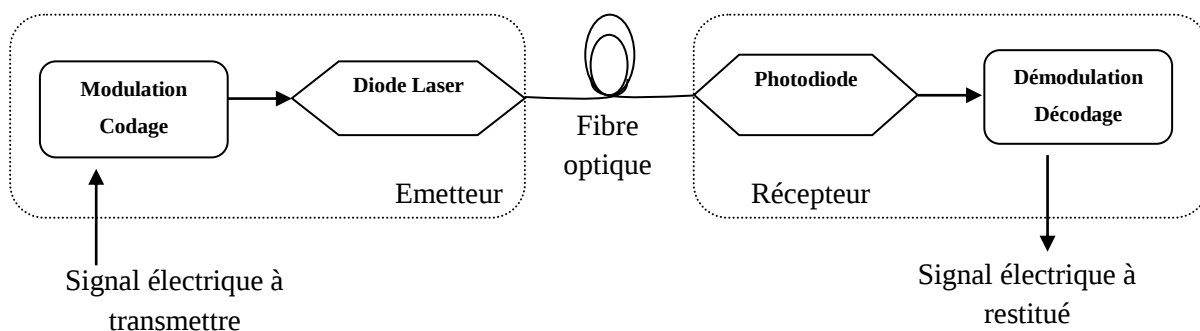


Figure 2. 1: Schéma de principe d'une liaison optique

Dans le cas d'une transmission par fibre optique, le signal est tout d'abord codé ou modulé suivant une séquence connue qui peut être contrôlée à la réception. Ce signal est injecté dans la fibre optique par l'intermédiaire de l'émetteur. À la sortie de la fibre, le signal est reçu par une photodiode puis amplifié avant d'être décodé pour être remis sous sa forme initiale.

2.2 La fibre optique

2.2.1 Définition et structure générale

Une fibre optique est un guide diélectrique permettant de conduire la lumière le long de son axe sur une grande distance. C'est un guide d'onde à symétrie circulaire constitué de deux diélectriques concentriques : un diélectrique interne dans lequel l'énergie lumineuse se trouve confinée, c'est le cœur d'indice de réfraction n_1 et un diélectrique externe, la gaine d'indice de réfraction n_2 . La fibre optique est souvent recouverte d'un revêtement protecteur qui ne joue aucun rôle dans le guidage de la lumière [15] [16] [17].

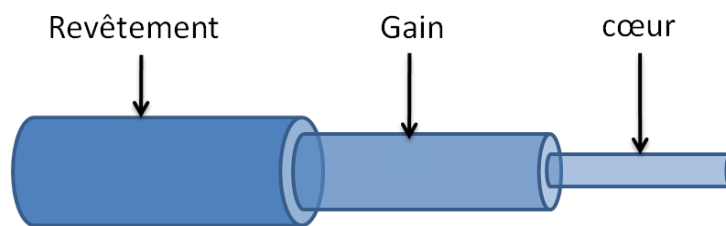


Figure 2. 2: Constitution d'une fibre optique.

Les fibres optiques sont en verre de silice pure synthétisée obtenue par fusion des molécules SiO_2 . La différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine est réalisée par l'utilisation sélective de dopants au cours du processus de fabrication. Les dopants tels que GeO_2 et P_2O_5 augmentent l'indice de réfraction de la silice pure et sont adaptés pour le noyau, tandis que les matériaux tels que le bore et le fluor sont utilisés pour la gaine parce qu'ils diminuent l'indice de réfraction de la silice. D'autres dopants supplémentaires peuvent être utilisés en fonction des applications spécifiques. Par exemple, pour faire des amplificateurs à fibre et de lasers, le noyau des fibres de silice est dopé avec ions de terres rares en utilisant des dopants tels qu' ErCl_3 et Nd_2O_3 . De même, Al_2O_3 est parfois ajouté pour contrôler le spectre de gain des amplificateurs à fibre [4].

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine (Figure 2.3). 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 (une différence de quelques % est suffisante). La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. L'ouverture numérique de la fibre ON représente le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre, α max, pour que la lumière puisse être guidée sans pertes ; cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre [16].

$$ON = \sin \alpha = \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2} \quad (2.1)$$

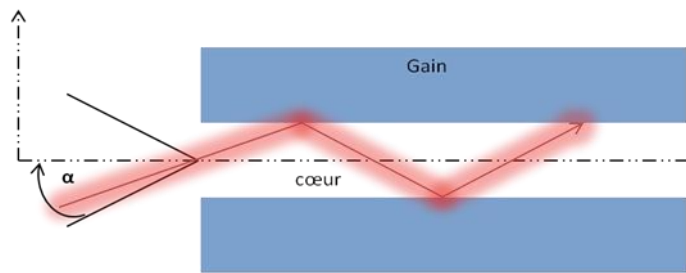


Figure 2. 3: Le guidage du signal optique dans une fibre optique

2.2.2 Classification des fibres optiques [15] [17]

En fonction de la distribution radiale de l'indice de réfraction du cœur, on peut classer les fibres en deux types principaux :

- Les fibres à saut d'indice, dans lesquelles l'indice de réfraction du cœur est homogène dans toutes les directions.
- Les fibres à gradient d'indice, dans lesquelles l'indice de réfraction du cœur décroît transversalement à partir de l'axe longitudinal.

Dans une fibre à saut d'indice, la propagation des rayons lumineux s'effectue comme le montre la figure 2.4. Il s'agit donc de propagation par chemins multiples et les différents rayons, qui se propagent à la même vitesse quel que soit leur angle par rapport à l'axe longitudinal, arrivent au récepteur avec des retards différentiels qui deviennent rapidement prohibitifs au-delà d'une certaine distance ; il en résulte une dispersion de l'énergie du signal dans le temps qui se traduit par un accroissement de la durée de l'impulsion et de ce fait par une interférence entre-symboles.

Par contre au sein d'une fibre à gradient d'indice les trajectoires sont courbes (voir figure 2.4) et la vitesse est plus faible au centre de la fibre où l'indice de réfraction est plus élevé. Les différents

rayons qui composent le signal se propagent sensiblement à la même vitesse. Ce type de fibre permet donc de réduire notablement la dispersion des différentes composantes du signal et par conséquent sa distorsion.

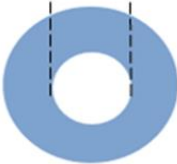
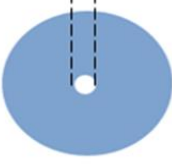
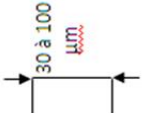
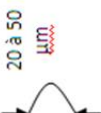
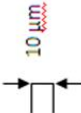
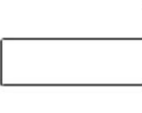
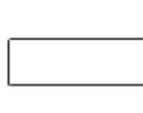
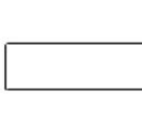
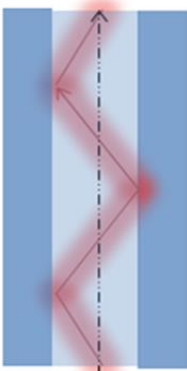
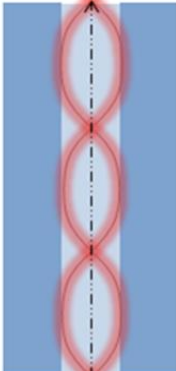
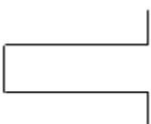
Type de fibre	Fibre à saut s'indice	Fibre à gradient D'indice	Fibre monomode
Coupe transversale			
Profilé d'indice et le diamètre de cœur			
Signal d'entrée			
Trajet lumineux			
Signal de sortie			
B	> 100 MHz.Km	> 0.2 à 1.5 GHz.Km	> 10 GHz.Km

Figure 2. 4: Classification des fibres optiques.

Les fibres à gradients d'indice sont généralement utilisées pour le câblage à l'intérieur des bâtiments dans le cas des réseaux privés.

Donc selon le diamètre du cœur, Il existe deux types de fibres : multimode et monomode.

- Fibre multimode dont le diamètre du cœur est de 50 μm environ, valeur supérieure à la valeur de la longueur d'onde du signal lumineux d'où les trajets multiples que peuvent avoir ces signaux lumineux. En utilisant une fenêtre de transmission de 1.3 μm , la portée est de 30km entre deux récepteurs.
- Fibre monomode caractérisée par un faible diamètre du cœur de l'ordre de 10 μm , valeur voisine de la longueur d'onde du signal lumineux qui, de ce fait, est transmis suivant l'axe de la fibre. La propagation ne subit pas beaucoup de perturbation, de plus, la bande de fréquences peut atteindre plusieurs dizaines de GHz.

2.2.3 Propagation de la lumière dans la fibre optique

Le développement en série de Taylor de la constante de propagation $\beta(\omega)$ autour de la fréquence ω_0 peut s'écrire :

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{\beta_2}{2} (\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2.2)$$

$$\text{Où } \beta_n = \left. \frac{d^n \beta}{d \omega^n} \right|_{\omega = \omega_0} \quad (2.3)$$

La propagation de la lumière dans une fibre optique est modélisée par l'équation non linéaire de Schrödinger (NLSE, Non Linear Schrödinger Equation) [16][19], dès lors que la largeur typique des impulsions est supérieure à la picoseconde. Cette équation décrit plusieurs phénomènes physiques d'une importance fondamentale pour les fibres optiques.

$$j \frac{\partial E}{\partial z} = \underbrace{\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 E}{\partial t^3}}_{\text{Dispersion}} - \underbrace{j \frac{\alpha}{2} E}_{\text{Atténuation}} - \underbrace{\gamma |E(t)|^2 E - j \zeta [S_R(t) * E(t)^2]}_{\text{Effets non-linéaires}} \quad (2.4)$$

Où $E(z, t)$ est l'enveloppe complexe du champ électrique, α l'atténuation, β_2 et β_3 sont liés à la dispersion chromatique, γ est le coefficient d'effet non linéaire Kerr, ζ et S_R sont liés à l'effet non linéaire Raman.

L'équation de Schrödinger 2.4 résume le fait que la fibre est un milieu à pertes, dispersif et non linéaire pour la propagation de la lumière. Elle décrit tous les phénomènes linéaires (atténuation, dispersion chromatique) et les phénomènes non linéaires (l'effet Kerr et l'effet Raman) qui interviennent lors de la propagation dans la fibre optique. La suite de ce partie est discuté ces paramètres un par un.

2.2.4 L'atténuation

Un paramètre important des fibres est la mesure des pertes en puissance pendant la transmission de signaux optiques à l'intérieur de la fibre. Si P_0 est la puissance injectée à l'entrée d'une fibre de longueur L , la puissance transmise est donnée par [4] :

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L) \quad (2.5)$$

La raison essentielle du choix de la silice réside dans son extraordinaire transparence. Les limites théoriques de cette transparence sont imposées par la diffusion de la lumière produite par les électrons de la matière (diffusion Rayleigh). Le coefficient d'absorption responsable de cet effet est [18] [3] :

$$\alpha = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1)^2 \kappa K_B T_F \quad (2.6)$$

Dans l'équation (2.6) n est l'indice de réfraction, κ est la compressibilité, T_F est la température fictive, K_B est la constante de Boltzmann et λ est la longueur d'onde de la lumière.

Dans le cas des fibres optiques, on exprime habituellement l'atténuation α du signal en décibels (dB) par [4] [22]:

$$\alpha_{dB} = -4.343 \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = 4.343 \alpha z \quad (2.7)$$

Où I / I_0 est le rapport de l'intensité transmise à l'intensité incidente et z est la longueur de la fibre.

Soit en tenant compte de (2.7) :

$$\alpha(dB) = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1)^2 \kappa K_B T_F Z \quad (2.8)$$

Sur la figure 2.5, les variations de l'atténuation α en fonction de λ en prenant $n = 1.5$, $\kappa = 2.7 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$, $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$, $T_F = 1473 \text{ K}$ et $z = 1 \text{ km}$. La présence de trois pics d'absorption dus à la présence d'eau dans la fibre. Les meilleures transparences se trouvent vers 1300 nm et vers

1500 nm. À 1500 nm l'atténuation est de l'ordre 0,2 dB.km, ce qui correspond à 95 % de transmission après un parcours de 1 km dans le verre. Pour tirer le meilleur parti des fibres de silice, les émetteurs de lumière le plus souvent utilisés sont les diodes lasers à infrarouge.

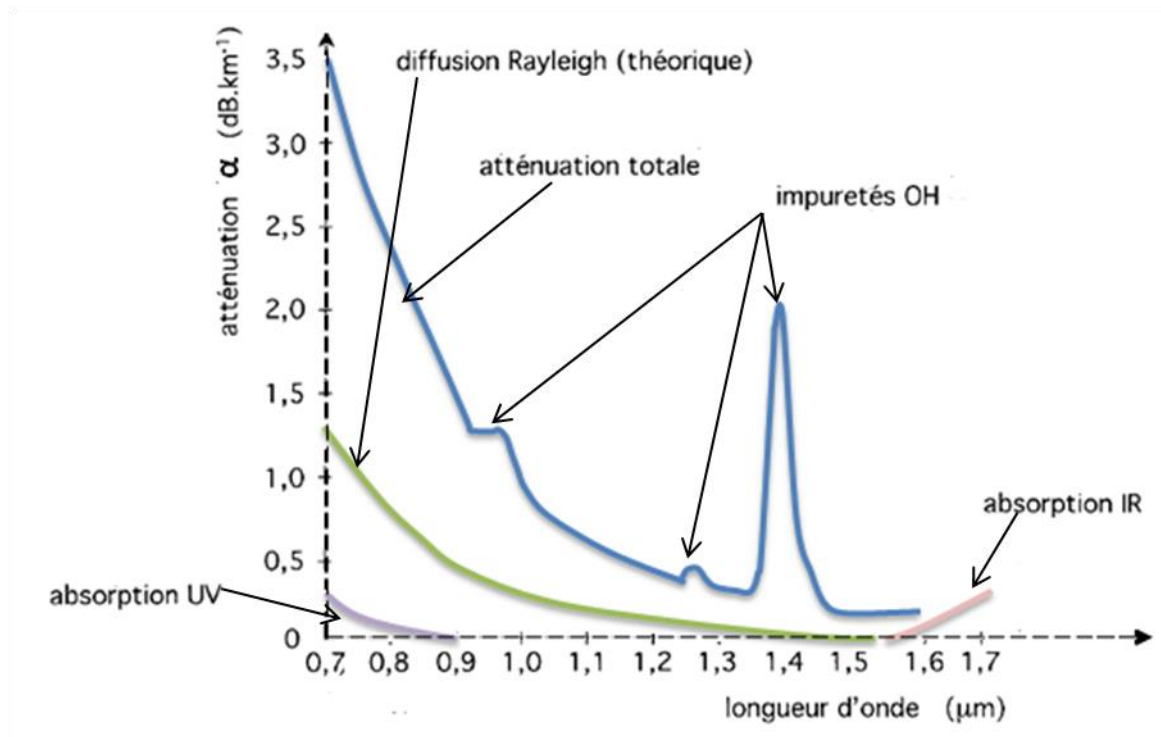


Figure 2. 5: Atténuation spectrale d'une fibre.

2.2.5 Les effets linéaires

La dispersion chromatique et la dispersion modale de polarisation sont les deux phénomènes linéaires susceptibles de dégrader les performances des systèmes : ils affectent les différents canaux individuellement et l'effet sur un canal ne dépend donc pas de la présence des autres.

2.2.5.1 La dispersion chromatique

Lorsqu'une onde électromagnétique interagit avec les électrons liés d'un diélectrique, la réponse du milieu, en général, dépend de la fréquence ω optique. Cette propriété, appelée la dispersion chromatique, se manifeste à travers la dépendance en fréquence de la réfraction d'indice $n(\omega)$. À un niveau fondamental, l'origine de la dispersion chromatique est liée à des fréquences de résonance caractéristiques à laquelle le milieu absorbe le rayonnement électromagnétique à travers les oscillations d'électrons liés [4] [21] [20].

La dispersion chromatique apparaît clairement dans les communications numériques. Le phénomène qui influe sur ce type de communication s'appelle : les interférences entre symboles. Elle est due à l'élargissement de deux impulsions successives comme l'indique la figure 2.6, donc il influe directement sur le débit binaire [20].



Figure 2. 6: Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit.

Dans les fibres monomodes la dispersion chromatique provient de deux causes principales [16] :

- La dispersion du matériau D_m : elle est liée à la dépendance de l'indice de réfraction de la longueur d'onde. Pour la silice, D_m varie d'environ -100 ps/km/nm à 0,85 μm à +25 ps/km/nm à 1,55 μm elle s'annule à 1,27 μm .
- La dispersion du guide D_g : liée à la structure géométrique du guide d'onde, elle résulte de la variation de la constante de propagation β avec la fréquence normalisée V (qui dépend elle même de la longueur d'onde λ , la dispersion du guide est toujours négative et dépend des paramètres de la fibre.

La dispersion du matériau D_m est donnée par :

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{coeur}}(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (2.9)$$

C : est la vitesse de la lumière dans le vide.

La dispersion du guide D_g est donnée par :

$$D_g(\lambda) \approx -\frac{n_{\text{gaine}} - n_{\text{coeur}}}{c\lambda} \left[V \frac{\partial^2 (bV)}{\partial V^2} \right] \quad (2.10)$$

La dispersion chromatique D est donc la somme de D_m et D_g :

$$D = D_g + D_m \quad (2.11)$$

À cause de la dispersion chromatique la vitesse de groupe v_g à l'intérieur d'un mode de propagation varie en fonction de la longueur d'onde λ . Le retard de groupe du signal après une longueur de propagation L sera alors :

$$D_g(\lambda) = - \frac{L}{v_g(\lambda)} = L \frac{d\beta(\omega)}{d\omega} \quad (2.12)$$

Pour un signal optique possédant un spectre de largeur $\Delta\lambda$, la dispersion du temps de retard de groupe τ_g peut s'écrire :

$$\tau_g = \frac{dt_g}{d\lambda} \Delta\lambda \quad (2.13)$$

La dispersion chromatique, D est alors définie par :

$$\tau_g = DL \Delta\lambda \quad (2.14)$$

$$D = \frac{1}{L} \frac{dt_g}{d\lambda} \text{ (ps/km/nm)} \quad (2.15)$$

Dans la silice, dans la région du proche infrarouge pour les longueurs d'ondes croissantes la dispersion est d'abord négative, c'est la dispersion normale, passe par un zéro à $\lambda \approx 1310$ nm, appelé zéro de dispersion, et puis devient positive. Cela correspond à la dispersion anormale. Le zéro de dispersion est important puisque pour cette longueur d'onde les signaux ne subissent pas, en théorie, de distorsion. Les fibres optiques monomodes standards présentent une dispersion chromatique de 17 ps / nm/ km autour de 1500 nm.

Par rapport à l'équation de Schrödinger 2.4 le terme β_2 est lié au paramètre de dispersion chromatique D par la relation suivante [16] :

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = - \frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \beta_2 \quad (2.16)$$

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne donc différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques. Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre symboles est possible.

2.2.5.2 Dispersion modale de polarisation : PMD [15]

En principe, la polarisation, dans une fibre parfaitement circulaire, ne devrait pas évoluer le long de la fibre. On n'observe rien de tel dans la pratique. Un petit tronçon de fibre apparaît généralement comme une lame biréfringente, avec un mode dit rapide et un mode dit lent qui ont des polarisations rectilignes orthogonales.

Ce phénomène est dû à la non-symétrie de révolution du profil d'indice dans le cœur de la fibre, non-symétrie intrinsèque à la fabrication de la fibre et/ou extrinsèque lors de la pose de la fibre. Les origines intrinsèques peuvent être une symétrie géométrique circulaire imparfaite de la fibre ou une non-homogénéité de l'indice de la fibre. Les causes extrinsèques peuvent être un écrasement, un étirement, une torsion ou une courbure de la fibre. Ceci induit un effet photo-élastique, d'où une biréfringence et une polarisation variable.

Quand on envoie un signal sur une fibre « biréfringente », sans se soucier de sa polarisation, on excite les deux modes à la fois. Chacun d'entre eux a sa propre vitesse de propagation. Ce décalage des temps de propagation de groupe a pour effet le dédoublement du signal à la sortie de la fibre, et donc un brouillage de l'information (Figure 2.7), appelé dispersion modale de polarisation (Polarization Mode Dispersion, PMD, en angloaméricain).

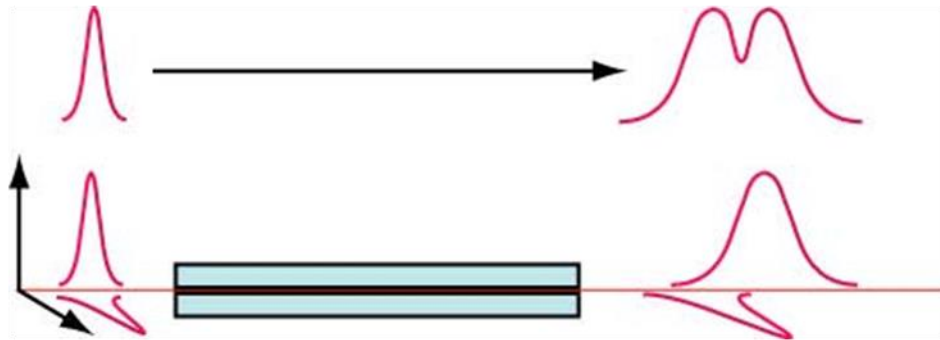


Figure 2. 7: Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à une biréfringence aléatoire de la PMD.

2.2.6 Les effets non linéaires

La réponse, selon un quelconque diélectrique, à la lumière devient non linéaire pour des champs électromagnétiques intenses, pour des fibres optiques sans exception. Sur un plan fondamental, l'origine de la réponse non linéaire est liée au mouvement anharmonique des électrons consolidés au titre de l'influence d'un champ appliqué. En conséquence, la polarisation P totale induite par des dipôles électriques n'est pas linéaire dans le champ électrique E , mais satisfait à la relation plus générale [4] [24] :

$$P = \varepsilon_0 (\chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} \cdot EE + \chi^{(3)} \cdot EEE + \dots) \quad (2.18)$$

Où ε_0 est la permittivité du vide et $\chi^{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots$) est la susceptibilité d'ordre j -ième. En général, $\chi^{(j)}$ est un tenseur de rang $j+1$. La susceptibilité linéaire $\chi^{(1)}$ représente la contribution dominante à

P. Ses effets sont inclus dans l'indice de réfraction n et le coefficient d'atténuation α discuté à la section 2.3.1. La susceptibilité de second ordre $\chi^{(2)}$ est responsable de ces effets non-linéaires en tant que générateur de la deuxième harmonique et de la somme des fréquences. Cependant, il est non nul seulement pour les médias qui n'ont pas une symétrie d'inversion au niveau moléculaire. Comme SiO_2 est une molécule symétrique, $\chi^{(2)}$ disparaît pour les verres de silice. En conséquence, les fibres optiques ne présentent pas normalement effets de second ordre non linéaires. Néanmoins, les moments électriques quadripolaires et dipolaires magnétiques peuvent générer de faibles effets de second ordre non linéaires.

Les effets non linéaires d'ordre le plus bas dans les fibres optiques proviennent de la susceptibilité d'ordre trois $\chi^{(3)}$, qui est responsable de phénomènes comme générateur de la troisième harmonique, mélange à quatre ondes, et de réfraction non linéaire.

De manière générale, l'impact de ces effets sur la qualité d'une transmission WDM dépend par nature, de la puissance des canaux injectée dans chaque tronçon de liaison, mais également de l'écartement spectral entre deux canaux optiques adjacents, des orientations relatives des états de polarisation optique des divers canaux et, surtout, de la dispersion chromatique de la fibre de la ligne. L'auto-modulation de phase SPM (Self Phase Modulation) et la modulation de phase croisée XPM (Cross-Phase Modulation), qui est due à une variation de l'indice de réfraction dans chaque canal par la puissance optique de chaque onde, créent de la diaphonie. La diffusion Raman stimulée SRS (pour Stimulated Raman Scattering) provoque des transferts de puissance d'un canal à l'autre (diaphonie) ou une atténuation du canal qui a servi de pompe. Le mélange à quatre ondes FWM (pour Four Waves Mixing) crée d'autres ondes lumineuses et de la diaphonie par intermodulation du 3^{ème} ordre.

L'équation 2.18 reflète l'importance de ce travail. Parce que dans la susceptibilité de second ordre $\chi^{(2)}$ il y a un autre effet en plus de la génération de deuxième harmonique et la génération de la somme des fréquences, y compris l'effet Pockels qui décrit la réponse optique linéaire du matériau au champ électrique excitateur (le modulateur électro-optique) [24] [25].

2.3 Le module d'émission

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

Sans oublier le support de transmission, comme on l'a indiqué précédemment. Lorsque, l'intensité de la puissance et la largeur du spectre générées des relations dues aux effets linéaire et non-linéaire dans la fibre optique, comme en particulier la dispersion chromatique. Il faut donc toujours obtenir des impulsions monochromatiques et non déformées autant que possible.

2.3.1 Le principe du laser

Les lasers sont des dispositifs qui produisent un rayonnement cohérent pour des longueurs d'onde situées dans les domaines infrarouge (IR), visible, ultraviolet (UV) du spectre électromagnétique [10]. Les postulats de Bohr (1913) indiquent que l'énergie totale d'un atome (terme générique pour atome, molécule, ion, semi-conducteur...) ne peut prendre que certaines valeurs discrètes, et qu'elle ne peut changer que lors de sauts quantiques (quantum jumps) accompagnés, par exemple, de l'émission ou de l'absorption d'un photon. Cette conversion d'énergie particulière fait partie de la théorie d'Einstein (1917) des interactions entre matière et rayonnement électromagnétique de trois manières différentes : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée [9] [8]. Ces trois phénomènes sont représentés comme suit.

Soient E_1 et E_2 deux niveaux d'énergie possibles d'un système microscopique, avec $E_1 < E_2$. L'atome peut échanger de l'énergie avec le milieu extérieur par trois phénomènes radiatifs distincts [13] :

a - L'absorption

L'atome initialement est dans l'état inférieur d'énergie E_1 . Si l'on envoie sur ce système une radiation de fréquence ν telle que $h\nu = E_2 - E_1$, où $h \approx 6,626\,075\,10^{-34}$ J.s, l'électron pourra absorber un photon et passer dans l'état supérieur E_2 : il y aura absorption de lumière.

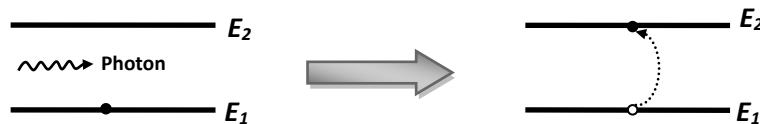


Figure 2. 8: Absorption d'un photon.

b - L'émission spontanée

Supposons que le système ait été porté, par exemple à l'aide d'une décharge électrique, dans le niveau supérieur d'énergie E_2 . Il peut se désexciter, c'est-à-dire perdre l'énergie qu'il vient d'acquérir, en émettant spontanément un photon de fréquence ν telle que $h\nu = E_2 - E_1$. Il revient

alors dans l'état initial E_1 : il y aura émission spontanée d'un photon. Il est impossible de prédire à quel instant et dans quelle direction l'émission va se produire. Le moment de désexcitation est aléatoire comme dans le phénomène de la désintégration de particules radioactives. Le temps de vie d'un niveau excité d'un atome est typiquement de l'ordre de 10^{-8} s (ce temps peut être beaucoup plus long pour des niveaux métastables).

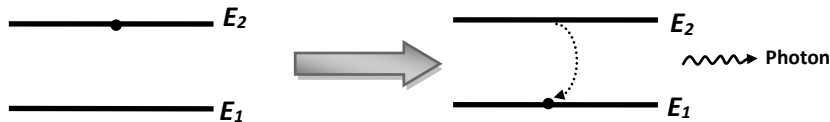


Figure 2. 9: Emission spontanée d'un photon.

c - L'émission induite ou stimulée

Supposons que l'atome ait été initialement porté dans le niveau supérieur E_2 . L'impact, sur un tel système, d'un photon incident d'énergie $h\nu$ provoque la désexcitation de celui-ci vers le niveau E_1 avec émission d'un deuxième photon. Les deux photons émergents (photon incident et photon émis) sont alors identiques (même direction de propagation, même fréquence).

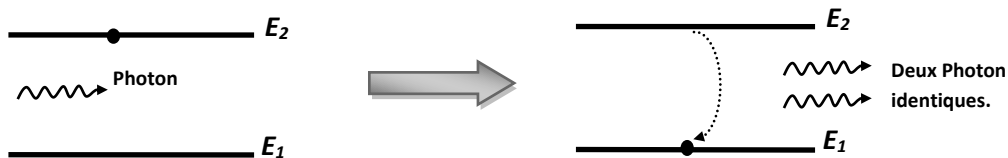


Figure 2. 10: Emission stimulée.

Les divers processus d'absorption et d'émission de photons peuvent augmenter le nombre de photons de fréquence ν moyennant la condition suivante : il faut que le nombre d'atomes dans l'état supérieur E_2 soit plus grand que celui des atomes dans l'état inférieur E_1 . C'est l'inversion de population par rapport à l'équilibre thermodynamique, où le nombre de particules dans l'état inférieur E_1 est plus grand que celui des particules dans l'état supérieur E_2 . Cet effet amplificateur est à la base du laser.

Pour obtenir l'amplification, premier pas vers l'effet laser, il faut donc réaliser deux conditions :

- ✓ Disposer d'un milieu actif;
- ✓ Avoir obtenu une inversion de population.

Un laser peut donc être vu comme un oscillateur. Tout oscillateur peut être présenté selon la sémantique propre à l'automatique comme un circuit bouclé composé d'un amplificateur et d'un filtre sélectif (figure 2.11). Les conditions d'oscillation, c'est à dire les conditions d'émission du laser, sont de deux natures:

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

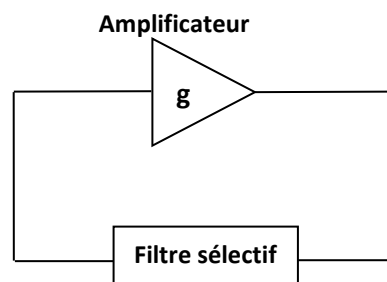


Figure 2. 11: Principe de l'amplificateur à boucle de rétroaction.

L'exemple plus connus d'un amplificateur optique, c'est la cavité Fabry Péro qui est constitué d'un milieu actif (Amplificateur) pour amplifier l'onde lumineuse et deux miroirs à l'extrémité de la cavité (filtre sélectif), l'un est semi-réfléchissant [26].

2.3.2 Les sources

Deux sources optiques de semi-conducteurs sont actuellement disponibles, la diode électroluminescente (LED) et la diode laser (LASER : amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement). Les LED ont une mauvaise pureté spectrale et à basse vitesse dans la modulation directe, et sont donc inadaptées aux systèmes de communication de longue distance ou à haute vitesse [5] [6], Contrairement à une diode laser.

Dans ce qui suit nous justifieront l'utilisation préférentielle d'une diode laser au détriment de la diode électroluminescente LED dans la plupart des systèmes transmissions optiques,

2.3.2.1 La diode électroluminescente LED

Une LED est une jonction PN polarisée en direct. Les électrons ou les trous qui constituent les porteurs majoritaires sont injectés dans le voisinage de la jonction. Leur recombinaison donne lieu

à une émission de la lumière. Ces diodes sont généralement utilisées pour les applications bas débit [15] [10].

La Figure 2.12 montre la structure la plus simple d'une diode LED. Comme la jonction p-n est réalisée entre deux semi-conducteurs de même nature, on parle d'une homo-jonction. Les photons sont générés principalement dans la zone p, près de la surface émettrice.

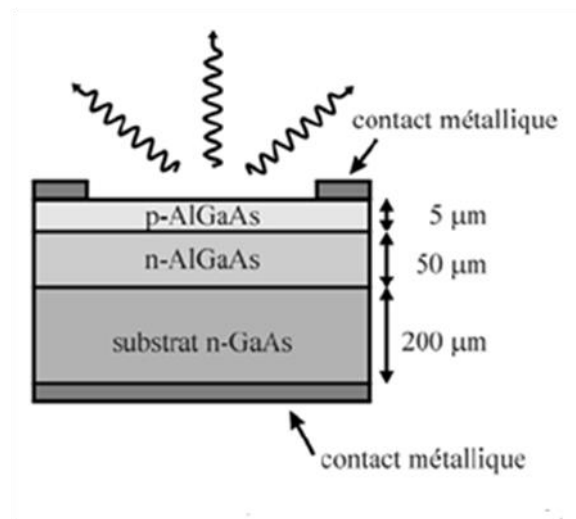


Figure 2. 12: Structure d'une diode LED simple.

En effet, avant de quitter la diode, les photons peuvent être réabsorbés dans le semi-conducteur. Une diode électroluminescente classique se présente donc généralement comme une structure p sur n. La zone p est une couche d'une épaisseur de l'ordre de 5 µm, près de la surface émettrice, de sorte que les photons sont produits près de la surface afin de minimiser leur absorption. De plus, et de façon plus importante, même s'ils ne sont pas absorbés, les photons ne peuvent pas nécessairement quitter la diode. L'émission de photons suite aux transitions radiatives est isotrope. Pour sortir de la diode, la lumière doit passer d'un matériau dont l'indice de réfraction est proche de 3,5 à la longueur d'onde émise (le semi-conducteur III-V) vers un matériau d'indice de réfraction 1 (l'air). L'angle critique de réflexion totale i_c se situe alors vers 17° . Tous les photons arrivant sous un angle supérieur à i_c sont donc réfléchis vers l'intérieur de la diode, ce qui représente une fraction émise de l'ordre de 2%.

Par ailleurs, l'émission à partir de la surface de la diode se fait dans toutes les directions, avec une intensité proportionnelle à $\cos(r)$, où r est l'angle entre la direction d'émission et la normale à la surface émettrice. La puissance diminue donc d'un facteur 2 lorsque $r = 60^\circ$. Cette émission très large implique qu'une grande partie de la lumière émise ne sera pas 10^{-6} transmise dans une fibre

optique, à cause de l'ouverture numérique faible des fibres. Typiquement, la perte par couplage dans une fibre avec une ouverture numérique de 0,24 est de l'ordre de 12,5 dB.

Afin d'améliorer le couplage de la lumière dans la fibre, différentes améliorations ont été apportées à la structure des diodes LED. La structure la plus connue est la diode "Burrus", ainsi appelée du nom de son inventeur (Figure 2.12). Elle comporte notamment un contact métallique en face arrière de petit diamètre, destiné à injecter les porteurs dans une zone active petite, compatible avec la section de la fibre. Une résine transparente est utilisée pour attacher la fibre le plus près possible de la surface émettrice. Cette résine a un indice de réfraction intermédiaire entre celui du GaAs et celui de la fibre, permettant de diminuer les pertes par réflexion totale. La diode proprement dite est une structure multicouche, faisant intervenir plusieurs couches très minces d'AlGaAs de composition et donc de largeur de bande interdite légèrement différente. Une telle structure permet d'optimiser le rendement quantique interne de la diode.

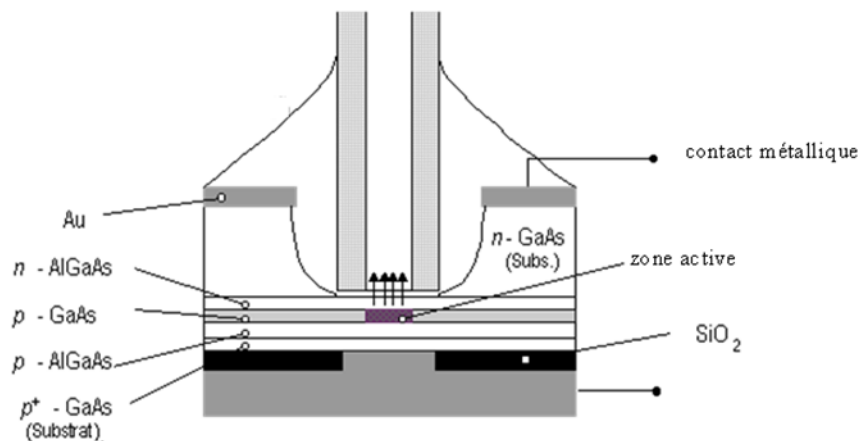


Figure 2. 13: Structure d'une diode LED GaAs- AlGaAs de type 'Burrus'.

2.3.2.2 Les diodes lasers

La diode laser est une source lumineuse utilisant l'émission stimulée c'est-à-dire qu'un photon incident peut provoquer la désexcitation d'un électron et entraîner l'émission d'un autre photon de même phase. Ces deux photons peuvent à leur tour déclencher d'autres émissions synchrones et provoquer un effet d'avalanche. Il y a donc, pour ce type d'émission, apparition de gain.

La configuration la plus simple d'une diode laser est constituée à partir d'un double hétéro-structure, formée par la couche active et les deux couches de confinement, par clivage des deux extrémités qui constituent les miroirs de la cavité optique. Afin d'obtenir le seuil d'émission laser

pour des intensités faibles, l'épaisseur de la zone active est réduite à environ $0.2\ \mu\text{m}$ et le passage du courant est limité à un ruban très étroit (quelques micromètres de large) dont la longueur est celle de la cavité [17].

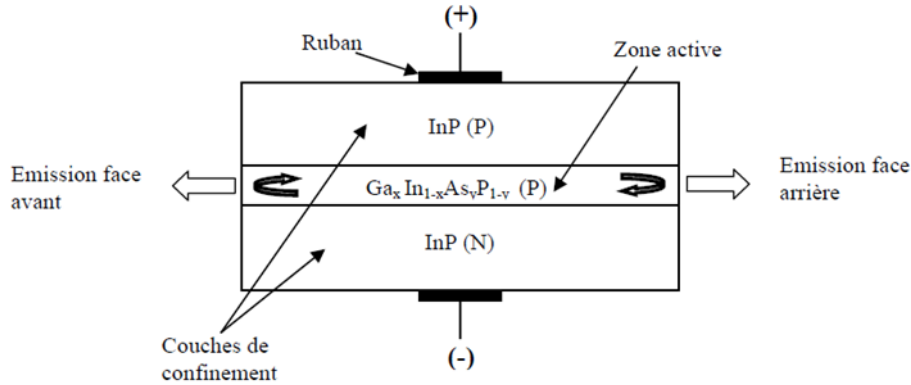


Figure 2. 14: Diode Laser à double hétérojonction.

Si le courant dans la jonction est faible, il y a émission spontanée dans toutes les directions. Le spectre d'émission ressemble alors au spectre d'une diode LED et pour l'augmentation de courant, l'inversion de population devient suffisante pour produire l'émission laser. Les longueurs d'onde qui peuvent participer à l'émission stimulée sont celles qui correspondent aux transitions radiatives entre la bande de valence et la bande de conduction, Il en résulte un spectre formé d'un ensemble de raies très étroites (Figure 2.14.b). Dans certains cas, on finit par obtenir un spectre dominé par un seul mode très étroit, si on augmente suffisamment le courant.

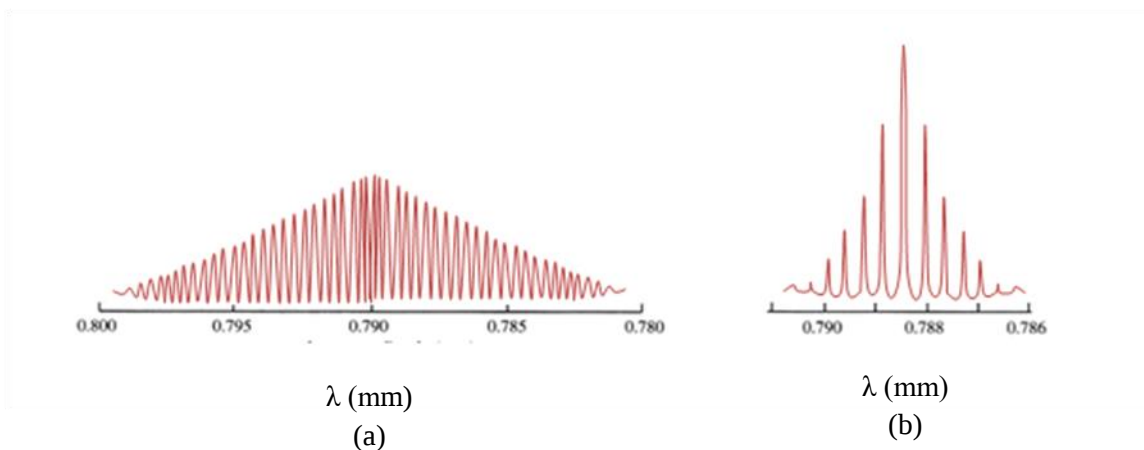


Figure 2. 15: Spectre d'émission d'une diode Laser. (a) juste en-dessous du seuil d'émission laser ; (b) au-dessus du seuil.

Il existe donc un seuil de courant en-dessous duquel on n'observe pas l'émission stimulée. La Figure 2.16 montre la puissance émise par le laser en fonction du courant. Aux courants faibles, la

puissance émise augmente faiblement avec le courant. Au-dessus du seuil, la puissance émise augmente fortement.

Lorsque le laser est activé, nous obtiendrons les fluctuations à court terme de l'intensité de la lumière produite appelés «oscillations de relaxation».

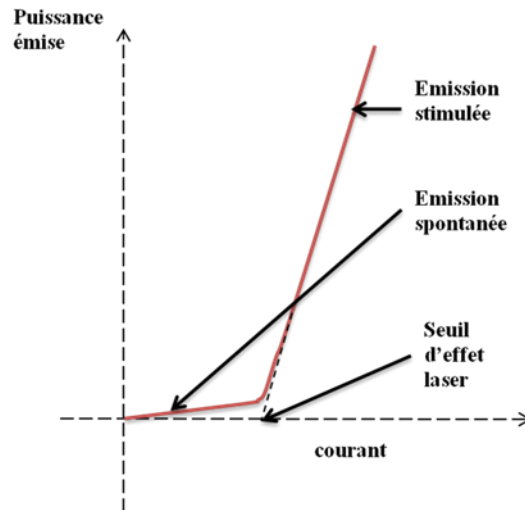


Figure 2. 16: Puissance émise par une diode Laser en fonction du courant.

A chaque variation du courant injecté au laser, un équilibre doit à nouveau s'installer entre photons et électrons dans ce régime de fonctionnement dynamique. Après résolution d'un système d'équations, les solutions montrent que le laser tend naturellement à osciller à une certaine fréquence propre Ω_{R0} appelée oscillation de relaxation, qui disparaît progressivement grâce à un terme d'amortissement en $e^{-\beta t}$ (Figure 2.17). Ces oscillations sont de même origine que la résonance fondamentale : les populations d'électrons et de photons oscillent avant d'atteindre l'état stationnaire d'autant plus brutalement que leurs temps de vie respectifs sont différents [15].

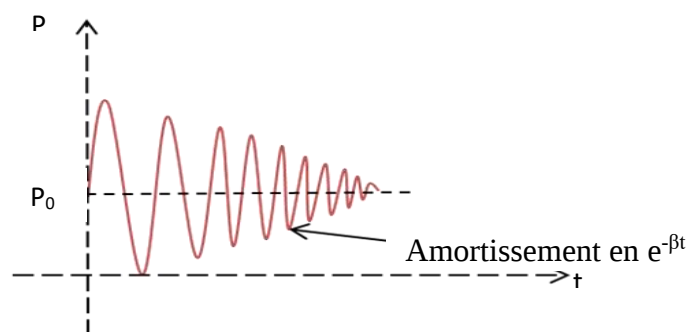


Figure 2. 17: Puissance émise par une diode Laser en fonction du temps.

2.3.2 La modulation

La modulation est la variation dans le temps d'une caractéristique physique d'un signal (onde porteuse) en fonction des informations à transmettre. Donc pour transmettre les informations, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre.

Dans les systèmes de transmission optique, Il existe deux formes de modulation, la modulation directe (ou interne) et la modulation indirecte (ou externe).

2.3.2.1 La modulation directe

La modulation directe peut être assimilée à une technique de modulation de type "classique". En effet, on va ici moduler directement le courant injecté en entrée de la diode (LED ou LD). A la suite de cette modulation de courant, l'intensité de la lumière produite par la diode sera affectée. Plus le courant reçu par la diode est important, plus l'intensité lumineuse qu'elle délivrera sera puissante.

2.3.2.2 Modulation externe

La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents dans le signal optique. La modulation externe est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable qui est le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe $v(t)$, modulée et représentative de l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie. Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon $v(t)$. Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de $v(t)$ et choisir les modifications du facteur de transmission [16].

Deux principaux types de modulateurs sont employés actuellement :

- Modulateur électro-optique : Ce type de modulateur utilise la variation de l'indice de réfraction en fonction du champ électrique (effet électro-optique) dans le niobate de lithium (LiNbO_3).

- Modulateur électro-absorbant : Il utilise la variation de l'absorption (effet d'électro-absorption) dans les matériaux semi-conducteurs.

2.4 Le module de réception

Le but général du récepteur optique est de convertir le signal optique en signal électrique. La photodiode est basée sur l'effet photoélectrique c'est-à-dire sur la capacité d'une substance à émettre des électrons quand elle est frappée par un rayonnement lumineux. L'énergie d'un photon est $\Delta E = h\nu$. Cette énergie croît avec la fréquence du rayonnement lumineux.

Les détecteurs développés aujourd'hui pour les télécommunications sont des photodiodes GaInAs sur substrat InP. Les premières structures développées sont de type planar à éclairage par la surface. Leur réponse spectrale couvre les deuxième et troisième fenêtres de transmission.

Deux types de dispositifs à semi-conducteurs répondent aux conditions précédentes, à savoir la photodiode PIN et la photodiode à avalanche APD [16] [17].

2.4.1 La photodiode PIN

Le photo-détecteur le plus simple est une jonction P-N (photodiode) polarisée en inverse, dans laquelle les photons absorbés créent des paires électrons-trous. Le photo-courant correspondant est détecté dans une charge résistive. Cette structure simple est améliorée en insérant une région très faiblement dopée, dite intrinsèque (I), entre les zones P et N, d'où le nom de « PIN »

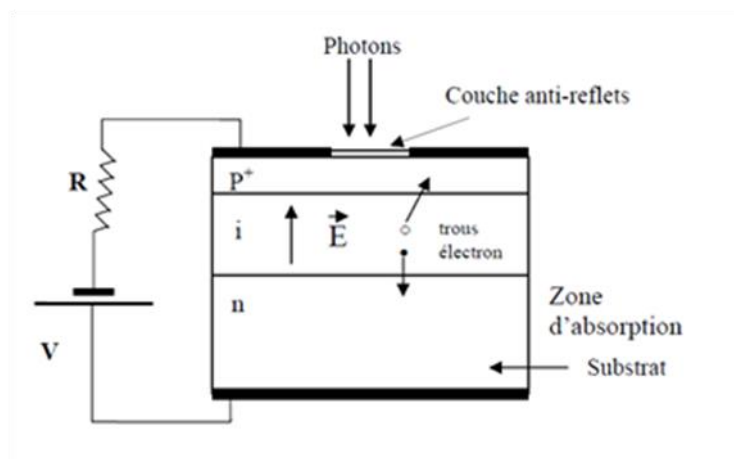


Figure 2. 18 : Photodiode PIN.

Dans la région intrinsèque, les photons incidents créent des paires électrons-trous qui sont dissociés par le champ électrique intense qui existe. Dans les régions P et N, seuls les photons proches de la région intrinsèque créent un photo-courant.

La profondeur de pénétration des photons dans la photodiode dépend du type de matériau utilisé ainsi que de la longueur d'onde. Plus celle-ci est élevée, plus l'onde pénètre dans le semi-conducteur. Les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont rapidement dissociées et collectées par les électrodes. La zone (P) traversée par la lumière doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflets qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau.

La photodiode PIN fonctionne avec une tension inverse faible et a un temps de réponse très court (inférieur à 1 ns).

2.4.2 Photodiode à avalanche (APD)

Il est possible d'accroître la sensibilité d'une photodiode par un processus de multiplication interne à effet d'avalanche. Si les électrons et les trous dus à l'absorption des photons sont créés dans une zone où règne un champ électrique intense, ils pourront acquérir suffisamment d'énergie pour créer à leur tour d'autres paires électrons-trous et ainsi de suite. Ce phénomène est appelé l'ionisation par impact : c'est l'effet d'avalanche qui, s'il n'est pas contrôlé, aboutit au claquage de la jonction.

À la différence de la photodiode PIN, la photodiode à avalanche possède donc un gain interne dû à cette multiplication d'électrons.

Le choix du détecteur est particulièrement déterminé par le rapport signal à bruit (S/B) qui est défini par le rapport du photo-courant engendré par la puissance du signal optique sur le courant de bruit du photo-détecteur plus le courant de bruit de l'amplificateur. Pour de faibles niveaux, le rapport S/B est meilleur avec une photodiode à avalanche alors que pour des niveaux plus forts, il vaut mieux utiliser une photodiode PIN.

2.5 Eléments du bloc de transmission [16][15]

Le principal élément de la partie transmission est la fibre optique, vue au début de ce chapitre. Elle offre une très grande capacité de transport, plus grande que les convertisseurs optique-électronique et les composants électroniques. D'où l'idée de traiter le plus souvent possible le

signal lumineux avant sa conversion électrique. Pour cela, de nombreux progrès ont été réalisés sur les composants optiques.

Aujourd'hui, on ne peut plus parler de systèmes de télécommunications sans ces éléments.

2.5.1 Amplificateurs optiques

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

L'amplification optique repose sur le phénomène d'émission stimulée, déjà présentée dans le paragraphe (2.3.1). Le signal est amplifié dans un guide (semi-conducteur ou fibre) grâce à un apport extérieur d'énergie appelé pompage (courant injecté ou source de lumière) qui vient créer une inversion de population. La recombinaison électron-trou peut ensuite être provoquée par un photon incident, ce qui donne naissance à un deuxième photon de même fréquence, de même phase et même direction. Cette émission est dite stimulée et conduit à une amplification du signal.

Pour une liaison à 40 Gbits/s, les amplificateurs à fibre dopée semblent plus adéquats et ont été retenus dans cette étude.

2.5.2 Les isolateurs

En optique comme en électricité, un isolateur est un dispositif passif non réciproque qui a une faible atténuation dans un sens et une forte atténuation dans l'autre sens. Il a donc une entrée et une sortie. Dans les systèmes de télécommunications par fibre optique, les isolateurs sont le plus souvent employés pour atténuer la lumière issue des réflexions parasites.

Le principe de fonctionnement d'un isolateur à prismes de rutile est différent. La biréfringence du rutile fait qu'un rayon incident se sépare à son entrée dans le cristal en deux rayons. Ces deux rayons sont polarisés à angle droit. Dans le sens passant, les angles des prismes sont tels que les rayons doivent se focaliser dans la fibre. Et dans l'autre sens, ils se focalisent en des points hors du cœur de la fibre.

2.5.3 Les coupleurs

Dans les réseaux de fibres optiques, les coupleurs permettent de distribuer le signal optique vers plusieurs fibres ou inversement, acheminer le signal venant de plusieurs fibres vers une seule. Le principe de base est celui du couplage par onde évanescence entre deux fibres dont les cœurs sont très proches. Le champ électromagnétique s'étend au delà des cœurs. De ce fait, la lumière

qui se propage dans un guide sent la présence de l'autre guide et se transfère progressivement dans l'autre guide. Si les guides sont identiques, la totalité de la lumière passe dans le second guide après une longueur d'interaction L_{inter} . Si cette région d'interaction est supérieure à L_{inter} , la lumière repasse dans le premier guide.

2.5.4 Les filtres optiques

Le filtrage a pour but de limiter l'occupation spectrale d'un signal. La séparation spectrale est réalisée en réfléchissant une certaine gamme de longueurs d'onde et en transmettant les autres. On caractérise donc le filtre par sa bande passante, c'est-à-dire le domaine de fréquences (ou de longueurs d'onde) pour lequel il laisse passer la lumière et par sa bande atténuée, c'est-à-dire le domaine de fréquences (ou de longueurs d'onde) pour lesquelles il réfléchit la lumière incidente. Ces deux domaines spectraux peuvent être très larges notamment pour les filtres passe-haut et passe-bas.

Conclusion

L'impulsion se propageant dans une fibre optique souffre de problème de linéarité, cela est dû à la nature de matériau par lequel est fabriquée la fibre et aussi de la nature de cette impulsion, parce que les impulsions ne sont pas purement monochromatiques, ce qui justifie l'utilisation de diode LD au détriment de la diode LED, Parce qu'elle génère des impulsions de largeur spectrale étroite, donc moins de dispersion au niveau de la fibre et une bonne détection de l'information au niveau du récepteur (photodiode).

Les systèmes de communication optique comme ceux de la communication classique (électronique) contiennent des éléments développés afin d'améliorer leur rendement, tels que les amplificateurs, les filtres...etc. Ces éléments sont de nature optique pure, pour éviter la conversion électrique-optique ou optique-électrique, autre élément de ces systèmes est le modulateur.

Les modulateurs optiques sont des dispositifs qui permettent de générer des impulsions monochromatiques et sans déformation tant que possible. Donc une contribution importante pour améliorer les performances des systèmes optiques.

Chapitre

3

La modulation électro-optique

Sommaire

Introduction.....	44
3.1 Définition	44
3.2 La modulation directe	44
3.3 Le modulation externe	46
3.3.1 Modulateurs électro-absorption	47
3.3.2 Modulateurs électro-optique	48
3.3.2.1 Comportements diélectriques	49
3.3.2.2 Effet électro-optique	51
3.3.3 Modulateur Mach-Zehnder	55
3.3.3.1 Principe du modulateur Mach-Zehnder	55
3.3.3.2 Modulateur LiNbO_3 en coupe X.....	57
3.3.3.3 Modulateur LiNbO_3 en coupe Z.....	59
3.3.3.4 Autres configurations	60
Conclusion	62

Introduction

Transmettre par voie optique une information (signal) électrique, suppose de disposer de transducteurs électrique/optique à l'émission et de transducteurs inverses optique/électrique en réception, pour restituer le signal. La première opération de conversion électrique/optique porte le nom de modulation optique. En effet, le signal est transporté sur la porteuse optique et ceci s'accompagne d'une transposition spectrale. La modulation optique n'est pas comme la modulation électrique, Elle est moins complexe.

Ce chapitre étudiera les différentes techniques de la modulation optique, directe et indirecte (externe). Mais l'accent sera plus sur la modulation externe et plus particulièrement sur le modulateur de Mach-Zehnder de Niobate de Lithium qui utilise l'effet électro-optique.

3.1 Définition

La modulation permet d'imprimer les informations à transmettre sur le signal optique à envoyer dans la fibre optique, en modifiant les caractéristiques de la lumière en fonction du signal de commande. Son action peut s'appliquer sur la puissance optique, la phase ou encore la fréquence.

Alors comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, il existe deux types de modulation, directe et externe.

3.2 La modulation directe

La modulation directe peut être assimilée à une technique de modulation de type "classique". En effet, on va ici moduler directement le courant injecté en entrée de la diode. A la suite de cette modulation de courant, l'intensité de la lumière produise par la diode sera affectée. Et plus le courant reçu par la diode est important, plus l'intensité lumineuse qu'elle délivrera sera puissante.



Figure 3. 1: Synoptique de la modulation directe.

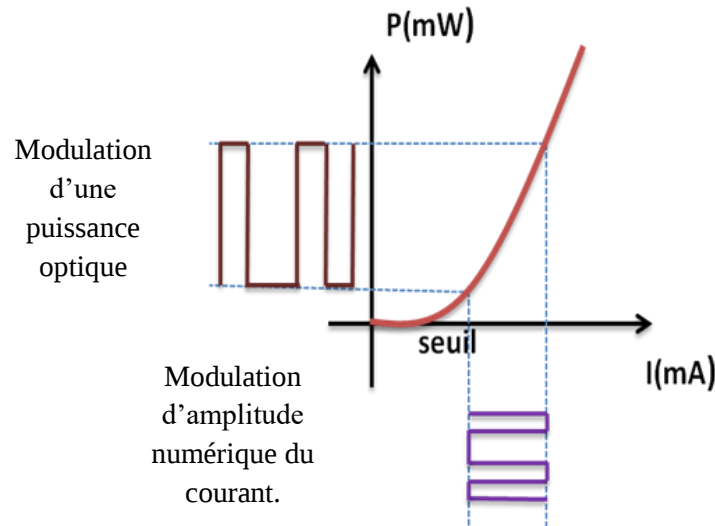


Figure 3. 2: Modulation directe d'une diode laser.

Dans les systèmes de télécommunications numériques par fibre optique, la modulation est constituée de signaux binaires pour lesquels la puissance optique, et donc le courant de polarisation, doivent commuter brusquement entre un niveau bas et un niveau haut. De ce fait, la compréhension de la réponse transitoire est particulièrement importante, et en plus de ça le phénomène d'oscillation de relaxation [15] [31] [32] [42].

L'émission de la lumière suit l'envoi du courant avec un retard qui peut aller jusqu'à quelques nanosecondes si le courant part de zéro (Figure 3.3). La réponse du laser n'est donc pas instantanée. En effet, ce retard correspond au temps nécessaire pour que la concentration de porteurs atteigne sa valeur seuil et donc pour que l'émission stimulée soit prépondérante sur l'émission spontanée. Cette valeur sera atteinte d'autant plus rapidement que le flux de porteurs injectés et donc que le courant injecté est important. Le retard dépend donc directement du courant d'alimentation du laser.

Ce retard est suivi des oscillations de relaxation vu précédemment. Tout comme le paramètre τ , le paramètre d'amortissement β dépend de la valeur du courant injecté dans le laser. La durée d'oscillations est d'autant plus longue et néfaste si le courant est faible et proche du seuil (Figure 3.3).

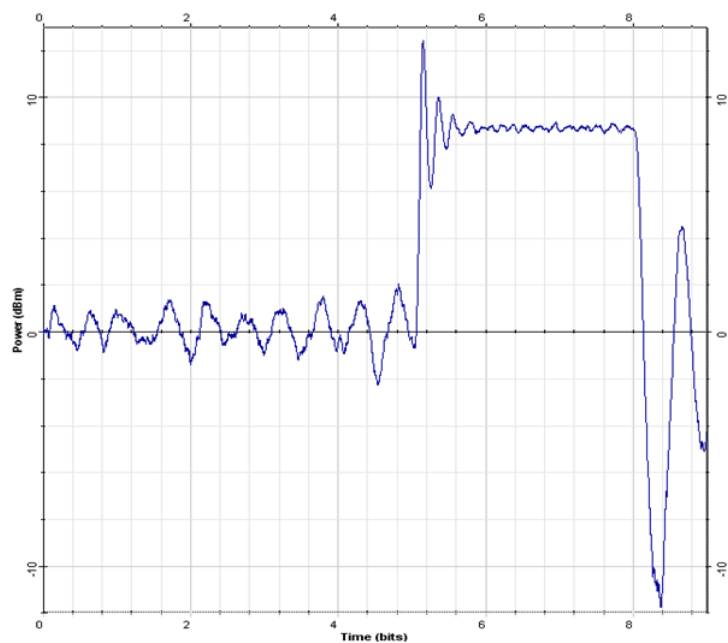


Figure 3. 3 Le phénomène d'oscillation et de relaxation.

Ces deux paramètres du laser exigent une durée suffisamment importante de l'impulsion pour qu'elle se stabilise à la valeur souhaitée et donc un débit limité.

La modulation directe connaît beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en œuvre. Mais elle comporte aussi des limites : la trop faible puissance disponible en sortie (qui peut être remédié par les amplificateurs optiques), l'apparition d'une modulation de fréquence parasite possible, appelé aussi chirp. Les effets conjugués de la dispersion chromatique de la fibre et du chirp provoquent une dégradation du signal transmis par un élargissement des impulsions).

Afin de réduire les effets de dispersion chromatique, on utilise le principe de la modulation externe.

3.3 Le modulation externe

La technique de modulation externe permet de résoudre les difficultés de la modulation interne. Il est employé aux fréquences élevées de modulation (supérieures à la dizaine de GHz). L'émetteur est alors constitué d'une source optique suivie d'un élément supplémentaire qui est le modulateur externe (Figure 3.4). Dans cette famille de modulateurs, il y a principalement les modulateurs à électro-absorption (l'effet repose sur la modification du spectre d'absorption du semi-conducteur soumis à un champ électrique), les modulateurs

acousto-optiques (les ultras sons permettent de dévier la lumière) et les modulateurs électro-optiques [28] [29].

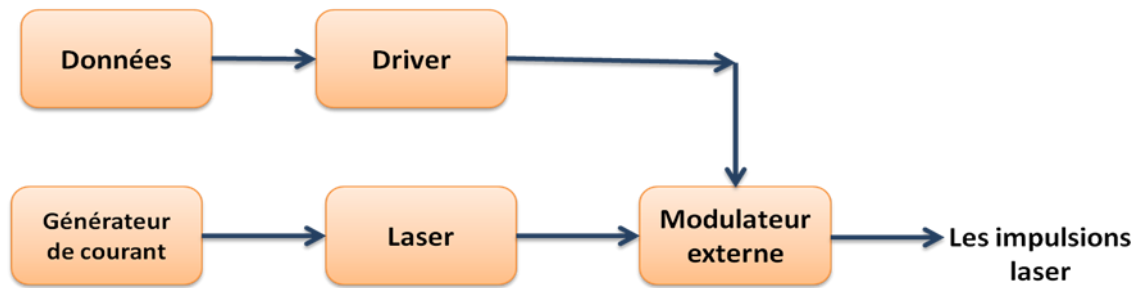


Figure 3. 4: Synoptique de la modulation externe.

3.3.1 Modulateurs électro-absorption

Un EAM (modulateur électro-absorption) est un dispositif à semi-conducteur qui permet de contrôler l'intensité d'un faisceau laser par l'intermédiaire d'une tension électrique (Figure 3.4). Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet Franz-Keldysh : une modification du spectre d'absorption due à un champ électrique appliqué, qui ne comporte normalement pas l'excitation de porteurs par le champ électrique [33].

La plupart des modulateurs électro-absorptions sont réalisés sous la forme d'un guide d'ondes avec des électrodes pour appliquer un champ électrique dans une direction perpendiculaire au faisceau lumineux modulé. Pour parvenir à un taux d'extinction élevé, on exploite généralement l'effet Stark confiné quantique dans une structure de puits quantique.

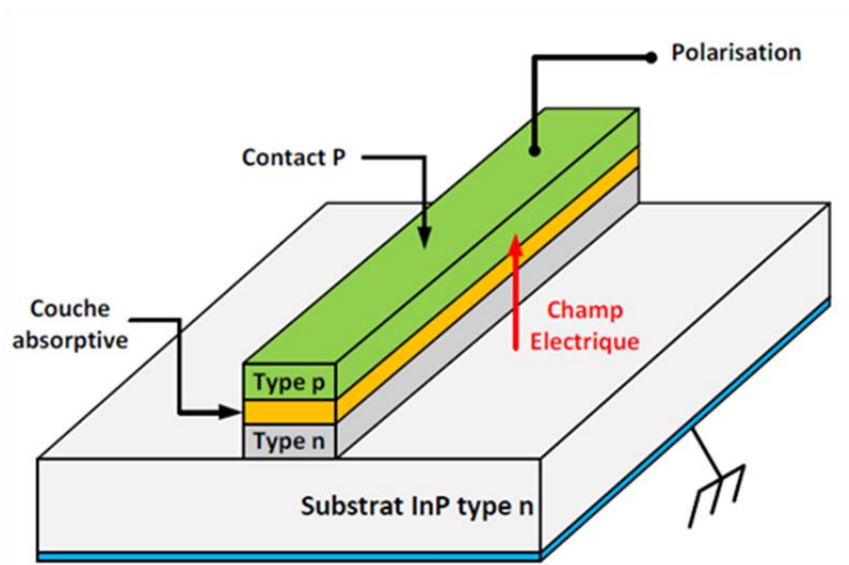


Figure 3. 5: Schéma simplifié du modulateur à électro-absorption.

En comparaison avec les modulateurs électro-optiques, les modulateurs électro-absorptions peuvent fonctionner avec des tensions beaucoup plus faibles (quelques volts au lieu de centaines ou de milliers de volts). Ils peuvent être utilisés à très grande vitesse, avec une bande passante de modulation de dizaines de gigahertz ce qui rend ces dispositifs utiles pour les communications par fibres optiques.

Le laser résultant dépend du courant de polarisation qui produit un ensemble d'effets non-linéaires dépendant du gain du matériau et de la structure de sélection du mode émis par le laser. Le modulateur est capable d'atteindre de larges bandes passantes grâce au compromis d'une forte absorption et d'une faible capacité de la jonction PIN qui le compose [34].

A l'heure actuelle, on trouve des modulateurs à électro-absorption offrant une bande passante de 40 GHz. Toutefois les modulateurs électro-optiques procurent une qualité de signal optique supérieure nécessaire aux transmissions longues distances.

Le MEA est disponible commercialement pour des débits supérieurs à 40 Gbit/s ce qui est largement suffisant dans le cadre de l'accès. Néanmoins ce composant est coûteux puisque les prix à l'unité atteignent 10k€ pour un 40 Gbit/s. Pour un 10 Gbit/s, le prix descend à environ 2 k€, avec une marge de baisse raisonnable pour les MEA intégrés avec d'autres composants (laser par exemple) car le couplage puce-fibre est un des points sensibles qui nécessite du temps à l'assemblage et donc augmente le prix du composant. La limite de cette technique vient des pertes d'insertion du modulateur (10 dB au minimum), or le signal doit faire un aller-retour OLT-ONU-OLT, ce qui fait un budget de liaison difficile, voire impossible à tenir. Un amplificateur à semi-conducteur est donc généralement associé au modulateur à électro-absorption pour compenser ces pertes. Des dispositifs sont en cours d'élaboration chez certains fabricants, intégrant sur le même substrat un modulateur à électro-absorption et un amplificateur à semi-conducteur afin d'avoir un composant minimisant les pertes de couplage et pouvant donc avoir du gain optique [36].

3.3.2 Modulateurs électro-optique

Le principe des modulateurs électro-optiques repose sur la modification de l'indice de réfraction de certains matériaux sous l'application d'un champ électrique. Les modulateurs électro-optiques existent sous plusieurs formes de configuration, qui se distinguent par la nature du matériau électro-optique utilisé.

Lors de ce paragraphe nous présenterons le principe de fonctionnement d'un modulateur électro-optique. Ce principe est commun à tous les modulateurs électro-optiques, mais ce travail se concentre sur le modulateur de type Mach-Zehnder sur Niobate de lithium, De plus, d'autres matériaux peuvent être utilisés pour la réalisation des modulateurs électro-optiques, tels que les polymères et les semi-conducteurs III-V [35].

Mais avant d'aborder ces détails, quelques caractéristiques générales des matériaux qui sont à la base de ces modulateurs seront présentées.

3.3.2.1 Comportements diélectriques

Lorsque les champs électromagnétiques qui éclairent la matière ne sont plus négligeables devant les champs atomiques, la réponse électromagnétique de la matière n'est plus une fonction linéaire de l'excitation. Cette réponse est développée en puissance du champ électromagnétique [24] [25] [27] [38].

En milieu isotrope, le vecteur champ électrique E , induction électrique D et polarisation P sont liés par les relations (3.1) et (3.2).

$$\vec{P} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E} \quad (3.1)$$

$$= \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (3.2)$$

Où ϵ_0 , ϵ_r et χ représentent respectivement la permittivité diélectrique du vide, la constante de permittivité diélectrique relative scalaire ($\epsilon_r = n^2$), et la susceptibilité électrique du matériau.

Dans un milieu anisotrope, dont les propriétés varient suivant la direction de l'espace, la relation scalaire (3.2) devient tensorielle avec des tenseurs d'ordres supérieurs $[K_{ij}]$ et $[\chi_{ij}]$, où i et j peuvent prendre les valeurs 1, 2 ou 3. Ainsi, on obtient les relations (3.3) et (3.4) avec $[K_{ij}]$ tenseur de permittivité diélectrique relative dont les termes sont homogènes au carré d'un indice de réfraction n . Le fait de remplacer le scalaire ϵ_r par le tenseur $[K_{ij}]$ revient donc à décrire le milieu comme possédant des indices de réfraction différents en fonction de l'orientation du champ électromagnétique. C'est ce qui s'appelle le phénomène de biréfringence. Le système d'axe de référence par rapport auquel on devra définir l'orientation du champ électromagnétique est précisément fixé par ce qu'on appelle les axes propres du milieu anisotrope.

$$\vec{P} = \epsilon_0 [K_{ij}] \vec{E}_j \quad (3.3)$$

$$= \epsilon_0 ([K_{ij}] - [I]) \vec{E}_j$$

$$= \epsilon_0 \chi_{ij} \vec{E}_j \quad (3.4)$$

Où : $\varepsilon_0 \vec{E} = \frac{\vec{D}}{[K_{ij}]} = [\eta_{ij}] \vec{D}$ avec $[\eta_{ij}] = [K_{ij}]^{-1}$ le tenseur d'imperméabilité diélectrique relative. Dans le système d'axes propres du cristal:

$$D_1 \eta_1 = \varepsilon_0 E_1$$

$$D_2 \eta_2 = \varepsilon_0 E_2$$

$$D_3 \eta_3 = \varepsilon_0 E_3$$

Avec $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$ et $\vec{D} = \vec{D}_1 + \vec{D}_2 + \vec{D}_3$. Mais il peut arriver que le vecteur de propagation $\vec{u}$ ne soit pas confondu avec un des axes propres du cristal. Dans ce cas, un changement de système d'axes est nécessaire pour se placer dans une configuration plus simple.

De manière pratique, on représente les propriétés optiques du milieu cristallin sous la forme d'un ellipsoïde des indices définie par l'équation suivante :

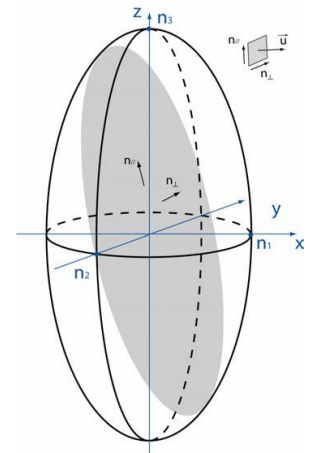
$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (3.5)$$

La direction de propagation $\vec{k}$ est donnée par $\vec{k} = \|\vec{k}\| \cdot \vec{u}$

– Le plan normal à $\vec{u}$ coupe l'ellipsoïde en une ellipse dont les grands et petits axes définissent $n_\perp$ et $n_\parallel$.

– Dans un système d'axes quelconque, $x \rightarrow X_1$, $y \rightarrow X_2$ et $z \rightarrow X_3$

L'ellipsoïde a pour équation $\sum_{ij} B_{ij} X_i X_j = 1$. Avec $B_{ij} = \frac{1}{n_{ij}^2}$.



Les relations naturelles entre les trois indices de réfraction n_1 , n_2 et n_3 définissent la nature du cristal. Lorsque ces trois indices sont tous différents entre eux ($n_1 \neq n_2 \neq n_3$) le cristal est appelé biaxe. Les cristaux biaxes appartiennent aux systèmes cristallins triclinique, monoclinique ou orthorhombique.

Toutefois, certains milieux ne possèdent que deux indices de réfraction différents ($n_1 = n_2$ ou $n_1 = n_3$ ou $n_2 = n_3$). Les indices sont alors appelés indice ordinaire (correspondant à la valeur des deux indices égaux) et indice extraordinaire (correspondant à l'indice différent), notés respectivement n_o et n_e . Le cristal est alors classé dans la famille des cristaux uniaxes. Les cristaux uniaxes appartiennent aux systèmes cristallins trigonal, tétragonal ou hexagonal.

La différence $n = n_e - n_o$ définit la biréfringence naturelle du milieu. Suivant le signe de cette différence, se place dans un des deux cas suivants (Fig. 3.5) :

- $n > 0$: le milieu est dit uniaxe positif.
- $n < 0$: le milieu est dit uniaxe négatif.

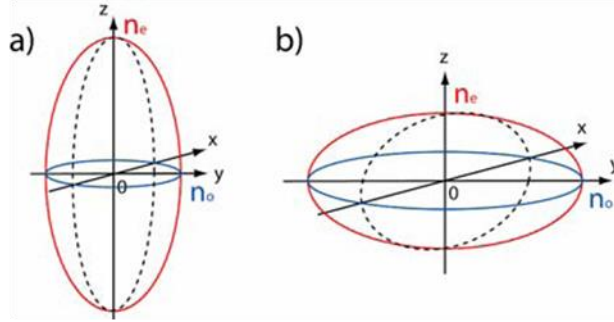


Figure 3. 6: Ellipsoïdes de cristaux uniaxes. La figure a) illustre un cristal uniaxe positif ($n_e > n_o$), l'ellipsoïde des indices a une forme allongée verticalement. La figure b) illustre un cristal uniaxe négatif ($n_e < n_o$), l'ellipsoïde des indices a une forme aplatie.

La biréfringence naturelle d'un cristal agit directement sur l'état de polarisation d'une onde envoyé à travers ce cristal. Pour illustrer ce phénomène, un exemple simple est la modification de l'état de polarisation d'une onde électromagnétique qui traverse un tel milieu.

3.3.2.2 Effet électro-optique

Lors de l'application d'un champ électrique extérieur sur un matériau non linéaire, l'anisotropie optique est modifiée ainsi que, par voie de conséquence, les indices de réfractions du milieu. Plus généralement d'une déformation de l'ellipsoïde des indices du milieu comme vu précédemment [25] [30] [37].

$$\left(\frac{1}{n_x^2} + \left(\frac{1}{n^2}\right)_1\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_y^2} + \left(\frac{1}{n^2}\right)_2\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_z^2} + \left(\frac{1}{n^2}\right)_3\right)z^2 + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 yz + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 xz + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 xy = 1 \quad (3.6)$$

Pour un champ électrique $\vec{E}$ appliqué à un matériau non linéaire, la perturbation liée au champ extérieur peut être décomposée suivant une série de Taylor :

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_j r_{ij} E_j + \sum_{jk} s_{ijk} E_j E_k \quad (3.7)$$

Avec $i=1, \dots, 6$; $j=1, 2, 3$ et $k=1, 2, 3$ sont associés aux axes x, y, z du matériau.

r_{ij} et s_{ijk} sont respectivement les tenseurs électro-optiques linéaire et quadratique qui caractérisent le matériau non linéaire. Ce mémoire concerne les modulateurs électro-optiques à effets Pockels, dans la suite, nous ne tiendrons ainsi compte que des coefficients électro-optiques linéaires. La perturbation liée au champ électrique appliqué pourra ainsi s'écrire :

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Dans ces conditions, l'équation (3.6) de l'ellipsoïde des indices devient :

$$\left(\frac{1}{n_x^2} + \sum_k r_{1k} E_k \right) x^2 + \left(\frac{1}{n_y^2} + \sum_k r_{2k} E_k \right) y^2 + \left(\frac{1}{n_z^2} + \sum_k r_{3k} E_k \right) z^2 + 2yz \sum_k r_{4k} E_k + 2xz \sum_k r_{5k} E_k + 2xy \sum_k r_{6k} E_k = 1 \quad (3.9)$$

Avec : $k=1, 2, 3$.

Suivant les symétries présentées au sein du matériau, le nombre de composantes indépendantes non nulles du tenseur électro-optique peut être considérablement réduit. A titre d'exemple, le tenseur électro-optique linéaire du cristal de niobate de lithium (LiNbO₃), l'un des matériaux inorganiques couramment utilisés pour les applications commerciales [30].

Le Niobate de Lithium est actuellement l'un des matériaux les plus utilisés en optique intégrée grâce à la combinaison de ses nombreuses propriétés et caractéristiques qui permettent d'adapter la réponse du matériau à la réalisation de divers composants photoniques et à la possibilité de faire croître des cristaux aux excellentes qualités optiques. La méthode la plus répandue pour faire croître ce cristal, inexistant à l'état naturel, est la méthode Czochralski, qui permet la fabrication de cristaux très homogènes de plusieurs kilogrammes, et à des coûts relativement faibles. De tels monocristaux possèdent des propriétés électro-optiques, piézoélectriques, photo-élastiques et de non-linéarités optiques étonnantes.

Ce matériau est un composé chimique de Niobium de Lithium et d'Oxygène (LiNbO₃) de structure cristalline trigonale, transparent pour des longueurs d'ondes entre 350 et 5000 nanomètres et exhibant un effet électro-optique Pockels. Sa biréfringence dépend fortement de la température : un ajustement précis de celle-ci permet de contrôler un éventuel accord de

phase. Dans sa forme cristalline, il se présente sous la forme de matériau solide, chimiquement très stable à température ambiante faisant ainsi de lui un matériau particulièrement attractif pour des applications en optique spatiale ou intégrée [38].

Le tableau suivant résume quelques propriétés optiques de Niobium de Lithium :

Fenêtre de transmission	350 – 5000 nm
indice de réfraction	$n_o = 2.29$, $n_e = 2.20$ à 633 nm et $n_o = 2.21$, $n_e = 2.14$ à 1550 nm
Constante diélectrique	$\epsilon_{11} = 85$, $\epsilon_{33} = 29$
Champ coercitif	≈ 4 KV/mm
Effet optique	acousto-optique, électro-optique photo-réfraction, non-linéarité.
Coefficient EO linéaire	$r_{33} = 30.8$ pm/v, $r_{13} = 8.6$ pm/v, $r_{22} = 3.4$ /v, $r_{51} = 28$ pm/v.

Tableau 3. 1 : Principales propriétés optiques des cristaux de LiNbO₃.

Le tenseur électro-optique $[r_{ij}]$ du niobate de lithium dans le repère Oxyz, qui caractérise complètement les propriétés de ce matériau, est le suivant :

$$r_{LiNbO_3} = \begin{bmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{13} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec $r_{33} = 30.8$ pm/v, $r_{13} = 8.6$ pm/v, $r_{22} = 3.4$ /v, $r_{51} = 28$ pm/v.

Les coefficients électro-optiques linéaires s'expriment en picamètre par volt (pm/V). Pour ces matériaux, les termes les plus importants sont le r_{13} et le r_{33} , qui valent respectivement 9,6 et 30,9 pm/V. Pour le niobate de lithium. Pour les matériaux polymères, les valeurs sont du même ordre de grandeur, mais elles dépendent de la composition chimique (ou formulation) du matériau.

Dans le cas du niobate de lithium, à partir des composantes non nulles du tenseur et pour un champ électrique extérieur appliqué suivant la direction Oz correspondant à l'axe optique du cristal, l'équation (3.9) devient :

$$\left(\frac{1}{n_x^2} + r_{13} E_z\right) x^2 + \left(\frac{1}{n_y^2} + r_{13} E_z\right) y^2 + \left(\frac{1}{n_z^2} + r_{33} E_z\right) z^2 + 1 \quad (3.10)$$

Dans cette configuration, la déformation de l'ellipsoïde des indices ne fait intervenir que les termes singuliers en x, y, z des coefficients r_{13} et r_{33} . Dans ces conditions, les axes principaux restent les mêmes, seuls les indices de réfraction changent (notés $n_{x'}$, $n_{y'}$ et $n_{z'}$) et s'expriment:

$$\begin{aligned}\frac{1}{n_{x'}^2} &= \frac{1}{n_x^2} + r_{13} E_z = \frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \\ \frac{1}{n_{y'}^2} &= \frac{1}{n_y^2} + r_{13} E_z = \frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \\ \frac{1}{n_{z'}^2} &= \frac{1}{n_z^2} + r_{33} E_z = \frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z\end{aligned}\tag{3.11}$$

Les variations d'indice étant faibles, on peut approximer les nouveaux indices par un développement limité du premier ordre :

$$\begin{aligned}n_{x'} &= n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z \\ n_{y'} &= n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z \\ n_{z'} &= n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z\end{aligned}\tag{3.12}$$

La direction de propagation de l'onde lumineuse et sa polarisation (TE ou TM) vont déterminer l'indice vu par l'onde ainsi que sa variation. Dans le cas d'une propagation suivant la direction Ox, avec une onde polarisée TE, c'est à dire une onde dont le champ électrique est perpendiculaire à l'axe optique et au champ extérieur E_z , l'onde est exposée à la variation de l'indice ordinaire du cristal de niobate de lithium :

$$\Delta n_o = \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z\tag{3.13}$$

Dans le cas d'une polarisation TM, le champ électrique est suivant Oz (parallèle à l'axe optique et au champ extérieur). L'onde est alors exposée à la variation de l'indice extraordinaire :

$$\Delta n_e = \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z\tag{3.14}$$

C'est dans cette dernière configuration que la variation d'indice du niobate de lithium est maximale. L'effet Pockels est utilisé en optique intégrée pour moduler un signal optique à partir d'un signal électrique. Plus précisément, l'information portée par le signal électrique est transférée sur une onde lumineuse par la variation de l'indice de réfraction du guide sous l'effet du champ électrique extérieur. Cette variation de l'indice du guide d'onde, à la fréquence du champ électrique, permet suivant la structure du guide d'inscrire l'information sur l'onde optique sous la forme d'une modulation de phase ou d'amplitude.

Le modulateur d'intensité Mach-Zehnder à deux bras est un composant essentiel dans le système de transmission optique. Le fonctionnement de ce composant est basé sur un effet optoélectronique (effet Pockels), présenté précédemment, dans les matériaux non-centro-symétrique. Dans le paragraphe suivant nous présenterons le principe de fonctionnement du modulateur d'intensité Mach-Zehnder.

3.3.3 Modulateur Mach-Zehnder

3.3.3.1 Principe du modulateur Mach-Zehnder

La plupart des modulateurs électro-optiques exploitent l'effet Pockels à l'aide d'un interféromètre de type Mach-Zehnder (figure 3.7), qui présente deux jonctions Y : la première permet de séparer de manière équilibrée la puissance sur les deux bras de l'interféromètre; elle se prolonge ensuite sur deux bras parallèles, non soumis au même champ électrique. Des électrodes permettent par effet électro-optique, de modifier l'indice de réfraction des deux bras. Il est alors possible de déphaser les ondes se propageant dans chacun des bras, l'une par rapport à l'autre.

Dans le cas du niobate de lithium, les branches de l'interféromètre de Mach-Zehnder (guides optiques) sont réalisées grâce à des impuretés de titane disposées en Y, diffusées à haute température, qui augmentent localement l'indice du cristal et obligent ainsi le rayon optique à rester dans le guide.

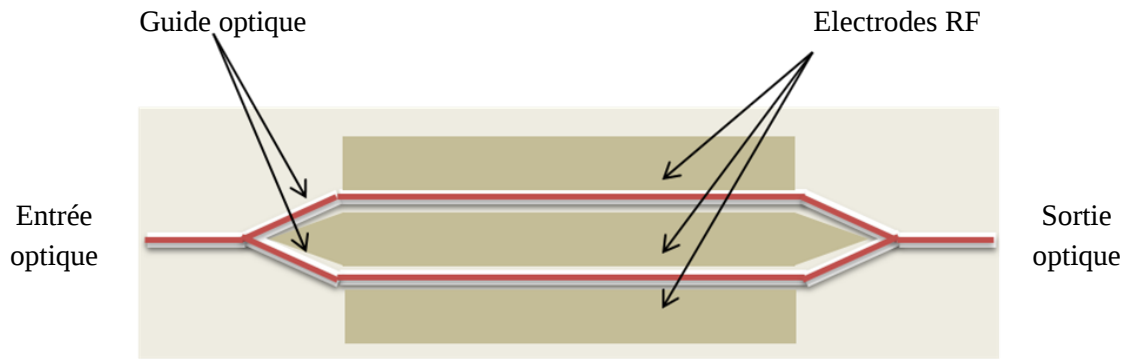


Figure 3. 7: Schéma de principe d'un modulateur externe de type Mach-Zehnder.

Si aucune tension n'est appliquée aux guides d'ondes, la lumière incidente est divisée de manière égale entre les deux bras de l'interféromètre. La recombinaison des ondes provenant des bras conduit à une figure d'interférence. Si une tension est appliquée à l'un des bras de sorte que la différence de phase entre les deux faisceaux de sortie est un multiple impair de π .

La fonction de transfert T du MZM qui lie la puissance optique à son entrée P_{in} , à la puissance optique à sa sortie P_{out} a pour expression [43]:

$$T = \frac{P_{out}(t)}{P_{in}} = \alpha \cos^2 \left(\frac{\pi V(t)}{2 V_{\pi}} \right) \quad (3.14)$$

- $P_{out}(t)$: l'intensité optique à la sortie du modulateur en fonction du temps t ;
- P_{in} : l'intensité optique à l'entrée du modulateur en fonction du temps t ;
- $V(t)$: la tension appliquée à l'électrode du MZM;
- α : le facteur de pertes d'insertion.
- V_{π} : Cette tension, appelée tension d'extinction, correspond à celle nécessaire au MZM pour passer d'un état de transmission maximale à celui de transmission minimale. Elle est caractéristique du composant, et dépend de la géométrie de l'électrode, de l'indice de réfraction du matériau utilisé, et de ses coefficients de tenseur électro-optique.

L'expression de T définit la fonction de transfert 'théorique' du MZM. Les courbes mesurées en réalité sont différentes. La figure 3.8 représente une courbe de transfert pratique d'un MZM. Elle permet de déduire tous les éléments caractéristiques du MZM.

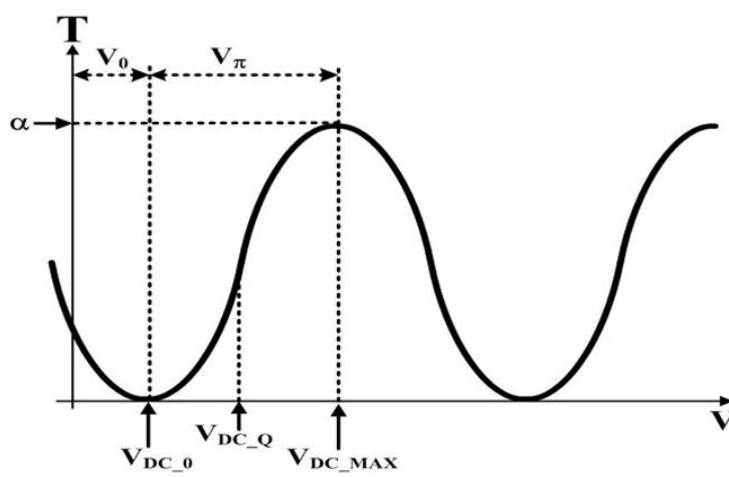


Figure 3. 8: Courbe caractéristique $T(V)$ d'un composant MZM réel.

On constate qu'il existe, par rapport à la théorie, une tension de décalage V_0 qui est également caractéristique de chaque MZM. Le signal $V(t)$ de commande est constitué d'une composante continue V_{DC} , qu'on appelle tension de polarisation continue, et d'une composante variable $V_{RF}(t)$. Il existe trois tensions particulières sur la courbe $T(V)$:

- V_{DC_0} : tension du minimum de transmission du MZM, elle vaut V_0 .
- V_{DC_max} : tension du maximum de transmission du MZM, elle vaut $V_0 + V_\pi$.
- V_{DC_Q} : tension de quadrature, elle se situe au milieu des deux tensions V_{DC_0} et V_{DC_max} , autour de cette tension, $T(V)$ est pratiquement une fonction linéaire.

Il existe deux types de modulateurs, le modulateur en coupe X et le modulateur en coupe Z, qui diffèrent par le positionnement des guides optiques par rapport aux électrodes RF [35][36].

3.3.3.2 Modulateur LiNbO_3 en coupe X

Dans le cas d'un modulateur en coupe X, afin d'exploiter le plus grand coefficient électro-optique du niobate de lithium ($r_{33} = 30.8 \text{ pm/V}$), il faut que les champs électriques et optiques soient polarisés suivant l'axe Z du cristal. Ceci implique que le champ électrique, tout comme le champ optique, soit parallèle au plan du modulateur en coupe X sur la zone des guides optiques : on dit que la polarisation est TE (Transverse Electrique). La direction de propagation est alors la direction Y. Ces conditions de polarisation sont obtenues en plaçant les guides optiques entre les électrodes de modulation (Figure 3. 9).

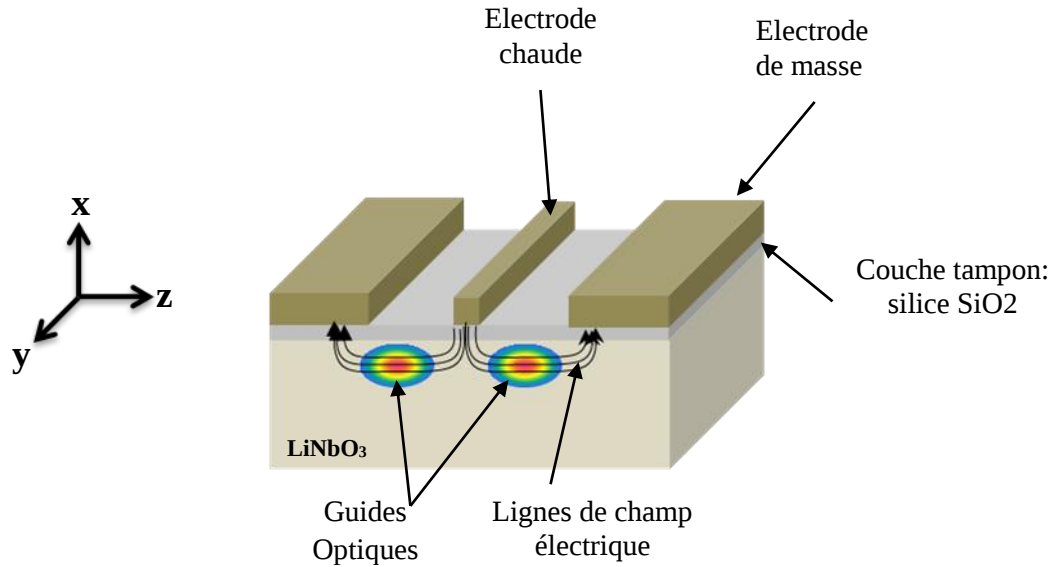


Figure 3. 9: Vue 3D d'un modulateur en coupe X single drive ; configuration des électrodes en Push-Pull ; état de polarisation TE.

La dénomination Push-Pull signifie que les électrodes et les guides en regard sont disposés de telle sorte que le champ électrique de modulation soit en sens inverse dans chacun des deux bras du Mach-Zehnder lorsque l'on applique une tension sur l'électrode chaude. Une seule tension est appliquée entre l'électrode chaude et les plans de masse. On a alors :

$$E_2 = -E_1 = -\frac{V}{e} \text{ et } E_{\pi 2} = -E_{\pi 1} = -\frac{V\pi}{e} \quad (3.15)$$

La tension nécessaire pour faire passer l'intensité de sortie d'un maximum à un minimum est appelée tension de commande ou tension demi-onde V_π . Pour un modulateur en coupe X cette tension s'écrit sous la forme suivante :

$$V_\pi = \frac{\lambda e}{2 r_{33} n^3 \Gamma L} \quad (3.16)$$

Avec :

r_{33} : Coefficient électro-optique;

λ : Longueur d'onde optique;

n : Indice de réfraction optique considéré;

L : Longueur de l'électrode en interaction avec le guide optique;

Γ : Coefficient de recouvrement des composants optiques et électriques;

e : Distance entre les électrodes.

Un modulateur en coupe X est symétrique, les guides optiques sont soumis à la même interaction électro-optique au signe près. Ceci implique que la phase du signal optique issu du

bras 1 compense la phase du signal optique issu du bras 2, et ainsi, le champ optique sortant du Mach-Zehnder ne subit aucune modulation de phase. Par conséquent le paramètre de chirp des modulateurs en coupe X est nul ; cette propriété est très prisée pour les télécommunications à très haut-débits qui exploitent les modulations à 40 Gb/s.

Cependant, les modulateurs en niobate de lithium en coupe X présentent un inconvénient : il nécessite une tension de commande V_π importante (classiquement supérieure à 5V), croissante avec la largeur de la bande passante.

Le modulateur LiNbO₃ en coupe Z apparaît être plus prometteur que celui en coupe X pour obtenir des bandes passantes importantes, pour une tension de commande inférieure (soit un meilleur recouvrement des champs optique et électrique), et donc une plus faible consommation.

3.3.3.3 Modulateur LiNbO₃ en coupe Z

Dans le cas d'un modulateur en coupe Z, l'axe Z du cristal est perpendiculaire au plan du modulateur. Afin d'exploiter le plus grand coefficient électro-optique du niobate de lithium (r_{33}), les électrodes doivent être placées au dessus des guides optiques (Figure 3. 10), et ainsi, le champ électrique est parallèle à l'axe Z du cristal sur la section des guides. Dans ce cas, c'est le champ magnétique qui est parallèle au plan du modulateur : on dit que le mode de polarisation est TM (Transverse Magnétique).

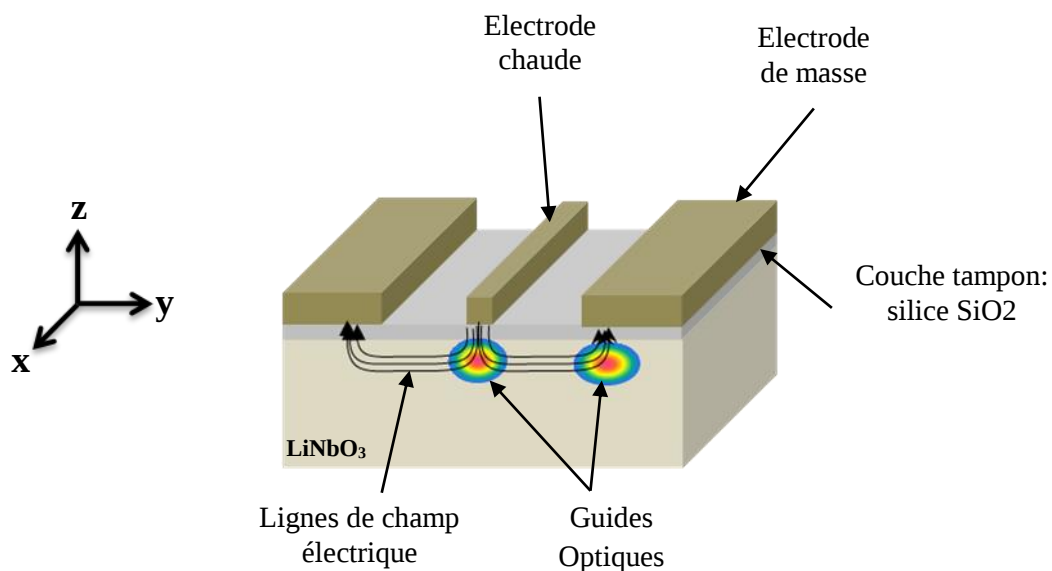


Figure 3. 10: Vue 3D d'un modulateur en coupe Z single drive ; configuration des électrodes en Push-Pull ; état de polarisation TM.

Un modulateur en coupe Z est asymétrique : l'asymétrie des champs électriques appliqués, fait que les ondes se propageant sur les deux bras de l'interféromètre sont soumises à un déphasage différent, et les recouvrements entre les champs électriques et optiques sont différents sous l'électrode centrale et sous les plans de masse ($\Gamma_1 \neq \Gamma_2$). Cette asymétrie entre les deux bras optiques entraîne une modulation de phase résiduelle du champ optique en sortie du modulateur (phénomène de chirp), qui est gênante pour les télécommunications à haut débit.

Pour un modulateur en coupe Z, la tension de commande s'écrit sous la forme suivante :

$$V_\pi = \frac{\lambda e}{2r_{33}n^3(\Gamma_1 + \Gamma_2)L} \quad (3.17)$$

D'après les deux équations (3.16) et (3.17), nous remarquons que la tension de commande V_π du modulateur LiNbO_3 en coupe Z est inférieure à celle en coupe X.

3.3.3.4 Autres configurations

Il existe d'autres configurations de modulateurs de type Mach-Zehnder sur niobate de lithium que celles que nous venons de voir (en coupe X et Z en configuration : single drive). Nous parlons des modulateurs en coupe X et Z en configurations : dual-drive, cette configuration consiste à utiliser deux électrodes centrales.

Sur la figure 3.9 nous avons présenté le modulateur de type Mach-Zehnder sur niobate de lithium en coupe X et sur la figure 3.10 le modulateur Mach-Zehnder sur niobate de lithium en coupe Z, et en configuration : dual-drive.

Dans le cas de la coupe X (figure 3.11), chacun des bras du Mach-Zehnder est placé dans le gap de deux lignes coplanaires différentes. Le but est toujours d'avoir un champ électrique de modulation de sens opposé dans chacun des deux bras et il est possible d'alimenter les deux lignes coplanaires avec deux tensions en phase ou en opposition de phase. Dans chacun des cas, il suffit de placer les bras du Mach-Zehnder dans les bons gaps de manière à avoir une interaction de signe contraire dans chaque bras : avec deux signaux électriques en phase, il convient de placer chaque bras du Mach-Zehnder dans les gaps opposés à la ligne chaude de chaque ligne coplaire, et avec deux signaux en opposition de phase il convient de les placer du même côté de la ligne chaude de chaque ligne coplaire. Dans le cas de la coupe X en configuration : dual-drive, la symétrie des guides optiques par rapport aux électrodes conduit

à un recouvrement identique dans chacun des deux bras, et ainsi la tension de commande V_π est identique à celle obtenue en coupe X en configuration : single drive.

La différence entre les deux configurations : single drive et dual drive, est donc seulement l'utilisation d'un ou de deux drivers, et par conséquent la structure dual-drive en coupe X n'a que peu d'intérêt.

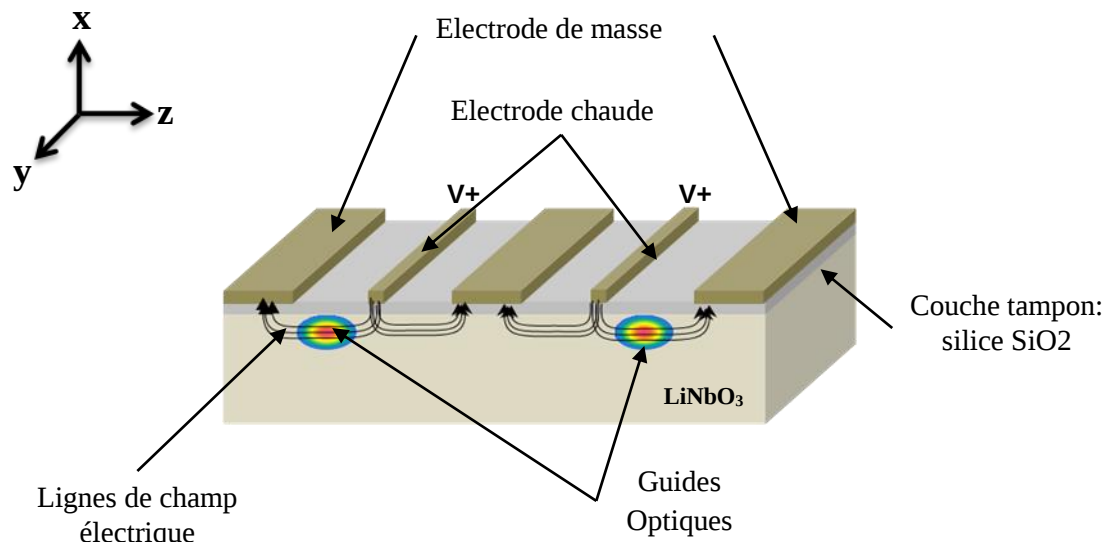


Figure 3. 11: Vue en coupe d'un modulateur Mach-Zehnder LiNbO₃ en coupe X, avec une structure à dual-driver.

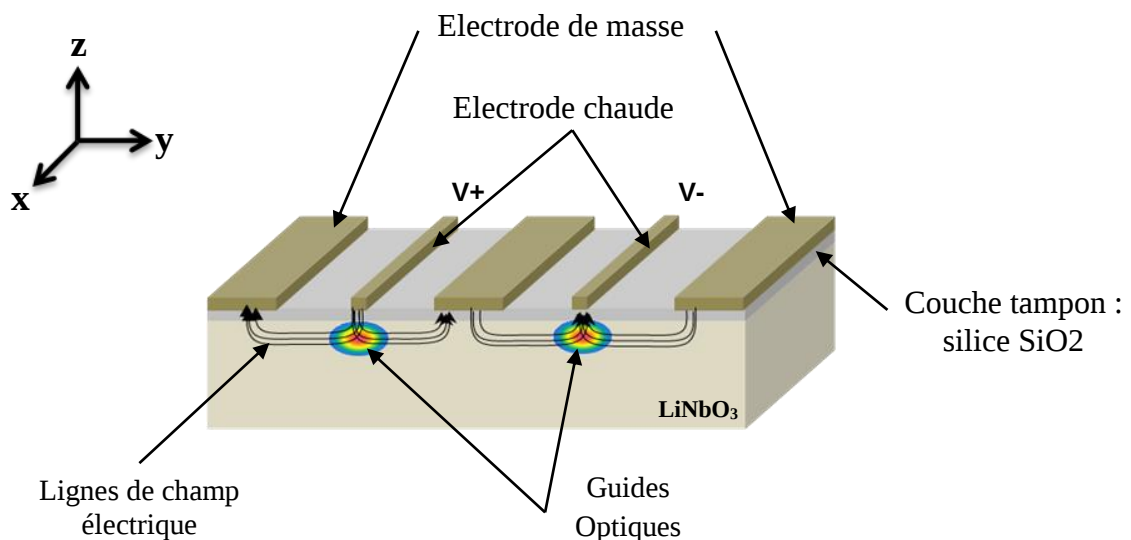


Figure 3. 12: Vue en coupe d'un modulateur Mach-Zehnder LiNbO₃ en coupe Z, avec une structure à dual-driver.

Dans le cas de la coupe Z (figure 3.12), la configuration : dual drive consiste à placer les deux guides optiques constituant les bras du Mach-Zehnder, sous chacune des électrodes

chaudes des deux lignes coplanaires et d'exciter les lignes coplanaires avec des signaux en opposition de phase. Ainsi, dans cette configuration, on bénéficie d'un fort taux de recouvrement entre les composantes verticales des champs de modulation et le champ lumineux sous les électrodes chaudes. En effet, le positionnement des guides optiques sous les électrodes chaudes des lignes coplanaires conduit à la fois à symétriser les recouvrements optiques/électriques et à les augmenter. Les recouvrements sont donc identiques et maximisés: $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_{MZ\ dual-drive}$.

La tension de commande V_π dans la configuration coupe Z dual-drive est donc la suivante :

$$V_\pi = \frac{\lambda e}{2rn^3\Gamma_{MZ\ dual-drive}L} \quad (3.18)$$

En coupe Z, et par comparaison avec la configuration single drive, la configuration dual-drive, permet d'augmenter le recouvrement optique/électrique dans le deuxième bras du Mach-Zehnder, et ainsi de diminuer les tensions de commande. Il faut également noter que la symétrie des recouvrements dans les deux bras du Mach-Zehnder tend à faire chuter le chirp fréquentiel.

Conclusion

La modulation est une technique importante dans le domaine des télécommunications optiques et les modulateurs optiques sont des dispositifs qui permettent de transférer les signaux optiques sans déformation tant que possible pour éviter les problèmes dans les systèmes et pour augmenter le débit. Comme on l'a indiqué précédemment, l'impression directe des informations sur les porteuses lumineuses s'appelle la modulation directe. Mais ce type de modulation comporte plusieurs problèmes qui limitent les performances des systèmes tels que l'oscillation de relaxation et le chirp. Pour ce là, la modulation externe est apparue pour réduire au minimum ces problèmes.

Donc le chapitre suivant vérifiera par simulation les problèmes qui découlent de la modulation directe et ses limitations, et aussi la modulation électro-optique et ses performances.

Chapitre

4

Présentation de l'outil de simulation

Sommaire

Introduction.....	64
4.1 Le logiciel OptiSystem [40] [41].....	65
4.2 L'éditeur de schéma-bloc	65
4.2.1 La fenêtre de mise en projet	66
4.2.2 Bibliothèque de composants.....	67
4.2.3 Les paramètres de configurations	68
4.2.4 Propriétés des composants	68
4.2.5 Le calcul	69
4.3 Les résultats de simulation.....	70
4.3.1 La visualisation et le traitement des résultats	70
4.3.2 Critères de qualité	71
4.3.2.1 Le diagramme de l'œil	71
4.3.2 Le taux d'erreur binaire.....	71
4.4 La simulation	72
4.4.1 Simulation d'un système optique utilisant la modulation directe à 10G	72
4.4.1.1 la Simulation	72
4.4.1.2 Résultats et discussions.....	74
4.4.2 Simulation d'un système optique utilisant la modulation externe à 40G	79
4.4.2.1 la Simulation	79
4.4.2.2 Résultats et discussions.....	80
Conclusion	82

Introduction

Le déploiement de systèmes de communications optiques est coûteux ou non économique et la reconfiguration est impossible dans certains cas ou non économique. Par conséquent les expériences de simulation des systèmes sont nécessaires pour prévoir et optimiser les performances des systèmes. Les systèmes de communications optiques actuels impliquent un très haut degré de complexité. Il ya un besoin croissant d'optimisation à travers les différentes couches du système de communication.

La demande croissante des logiciels commerciaux pour la simulation et la conception de systèmes de communications optiques a conduit à la disponibilité d'un certain nombre de solutions logicielles différentes. La plupart de ces programmes offrent des fonctionnalités similaires et les calculs sont basés sur des algorithmes et de modèles similaires de composants.

Ce chapitre débutera par une description générale du simulateur OptiSystem 7 et ses critères de qualité tel que le facteur Q et TEB (BER en anglais). Puis, après c'est la simulation des deux types de modulation directe et externe dans un système utilisant une fibre standard télécom (Single Mode Fiber, SMF) à haut dispersion et une autre fibre ayant une dispersion chromatique de signe opposé pour la compensation s'appelant fibre DCF (Dispersion Compensation Fiber), pour vérifier les performances de la modulation électro-optique.

4.1 Le logiciel OptiSystem [40] [41]

L'OptiSystem est un outil qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal allant du dispositif le plus élémentaire au système complet de communication. C'est un environnement interactif qui allie des outils numériques à des fonctionnalités graphiques et une interface utilisateur. Il permet d'analyser des systèmes analogiques ou numériques décrits sous la forme de schémas blocs.

C'est un progiciel de simulation par Optiwave Systems Inc, Ottawa, Canada. Une de ses principales caractéristiques, c'est la clarté de l'interface graphique. L'utilisation de ce logiciel est très intuitive et il est fourni avec une bonne aide en ligne et d'autres documents.

L'OptiSystem est un logiciel mature et utilisé par un certain nombre d'autres universités en matière d'éducation et de recherche. En plus de cela, de nombreuses entreprises dans le secteur de la communication optique s'appuyant sur ce logiciel.

4.2 L'éditeur de schéma-bloc

L'OptiSystem offre un environnement intégré où toutes les fonctions d'éditations et de traitements s'articulent autour de l'éditeur de schéma-bloc (Figure 4.1).

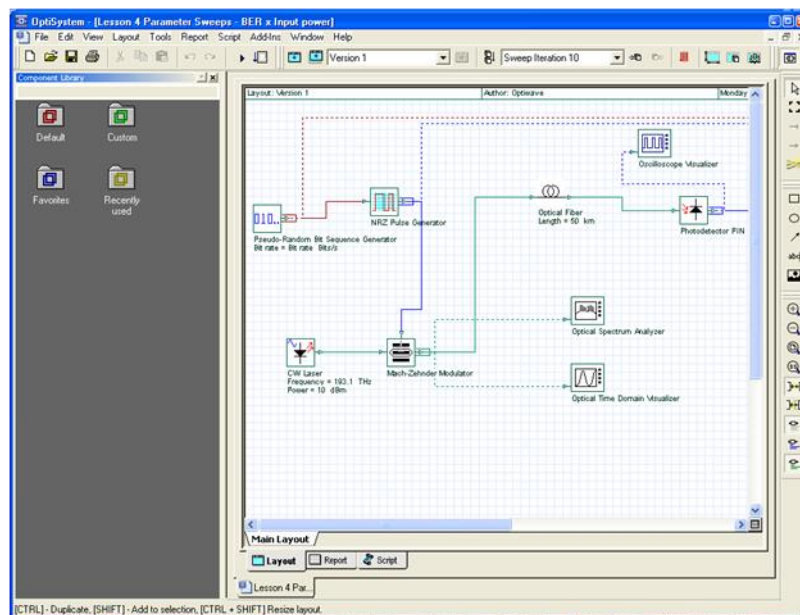


Figure 4.1 : L'éditeur de schéma-bloc d'OptiSystem.

Il se compose de différentes fenêtres, des boutons et des menus, sa fonctionnalité peut être facilement devinée pour les utilisateurs familiers avec le système d'exploitation Windows. De cette façon, le logiciel permet une utilisation intuitive.

Dans l'Optisystem il y a plusieurs opérateurs dont on ne peut pas passer tous en revue, ce chapitre est concentré seulement aux plus importants. Pour plus de détails on peut consulter les documents attachés au programme.

Deux fenêtres principales formant l'interface graphique :

4.2.1 La fenêtre de mise en projet

La fenêtre de mise en projet est la fenêtre la plus importante de l'interface graphique. Une disposition consiste en un ensemble de composants qui forment un système de communication optique. En OptiSystem, un projet de conception peut être constitué de plusieurs mises en page de projets. L'avantage de permettre plusieurs mises en page dans un projet, c'est que de cette manière, par exemple, les différentes réalisations d'un système équivalentes peuvent être comparées.

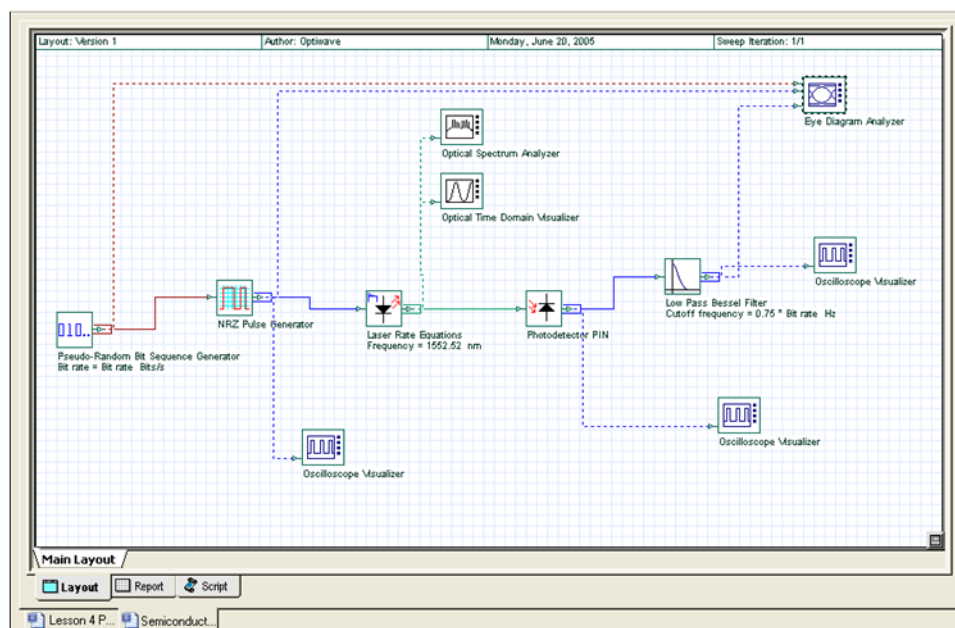


Figure 4.2 : La fenêtre de mise en projet d'OptiSystem.

Dans la figure 4.2, la fenêtre de présentation du projet est une conception d'un système de communication optique. Les composants sont reliés par des lignes de couleurs différentes. Ces couleurs indiquent le type de signal. Ces signaux peuvent être binaires, électriques, optiques...

Afin de construire un système, les composants de la bibliothèque peuvent être insérés dans la fenêtre de présentation du projet à l'aide de glisser-déposer.

4.2.2 Bibliothèque de composants

L'OptiSystem fournit un grand choix de composants couramment utilisés dans les systèmes de communications optiques. Ces composants peuvent être trouvés dans la bibliothèque de composants, qui est représentée dans la figure 4.3.

Dans l'affichage initial de la bibliothèque de composants, il y a quatre dossiers:

- ✓ **Default**: affiche les bibliothèques de composants par défaut et les autres composants.
- ✓ **Custom**: permet de créer et d'inclure des composants personnalisés et des bibliothèques définies par l'utilisateur.
- ✓ **Favorites**: utilisées pour inclure des composants les plus souvent utilisés pour un accès facile.
- ✓ **Recently Used** : affiche les dix composants les plus récemment utilisés.

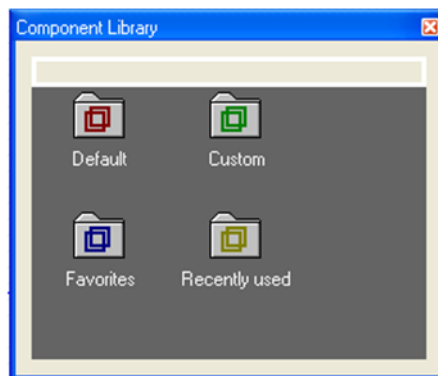


Figure 4.3 : La Bibliothèque de composants dans l'OptiSystem.

Les composants qui sont utilisés dans ce logiciel peuvent être trouvés dans le dossier par défaut (*Default*). Une liste de tous les composants disponibles dans le domaine de communication optique (les sources, les détecteurs, les fibres optiques, les composants de mesures et de visualisations...etc.). En plus de cela, les propriétés des composants sont répertoriées et une description mathématique est donnée. Dans le dossier par défaut, il y a des sous-dossiers pour chaque catégorie de composants, par exemple : transmetteurs, fibres et filtres (Figure 4.4).

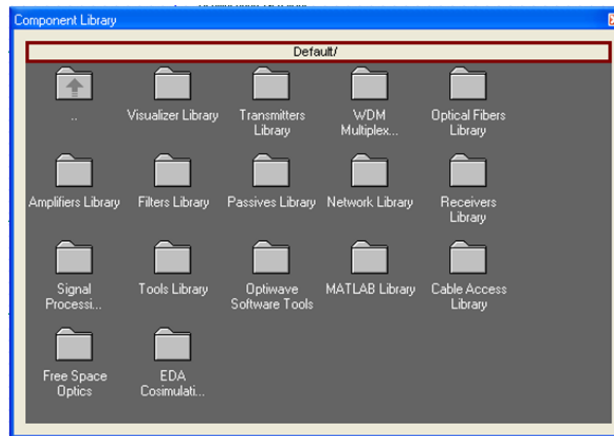


Figure 4.4 : Les composants disponibles dans le dossier *Default* de la bibliothèque d'OptiSystem.

4.2.3 Les paramètres de configurations

Les paramètres globaux sont des paramètres qui peuvent être accédés par toutes les composantes de la simulation comme le débit binaire ou la longueur de la séquence de bits transmis. En plus de ces paramètres, il existe d'autres paramètres globaux tels que les aspects de contrôle du signal, effets spatiaux, bruit et signal (figure 4.5).

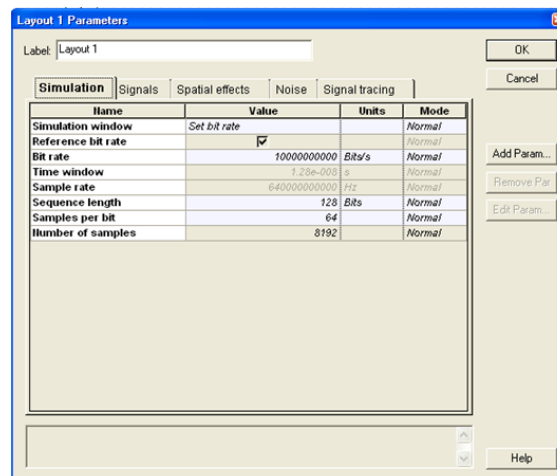
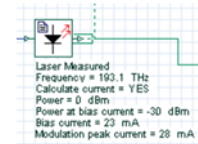
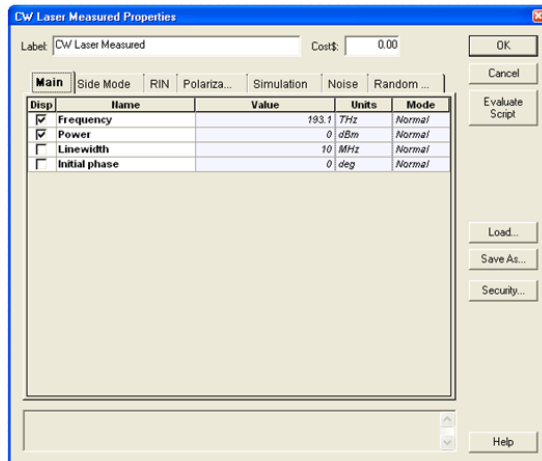


Figure 4.5 : La fenêtre des paramètres de configuration pour la mise en projet.

4.2.4 Propriétés des composants

Le but des propriétés de composants (*Component Properties Dialogue*) est de permettre au développeur de modifier les paramètres des composants utilisés dans la simulation. Il est représenté dans la figure 4.6 pour un composant de type de laser mesuré '*Laser Measured*'. On peut ouvrir le dialogue : Propriétés du composant par :

- ✓ Un clic-droit sur le composant dans la fenêtre 'Project Layout' et la sélection 'Component Properties'.
- ✓ Un clic-droit sur le composant dans 'Project Browser' et la sélection 'Component Properties'.



CW Laser Measured

Figure 4.6 : La fenêtre des propriétés de composants (par ex : CW Laser Measured).

4.2.5 Le calcul

Un autre dialogue très important est le dialogue calcul 'Calculate Dialogue', car il contrôle le calcul en cours d'exécution de la simulation. Vous pouvez accéder 'Calculate Dialogue' dans ces façons:

- ✓ Ouvrez la section *File* du menu principal et cliquez sur *Calculate*.
- ✓ Appuyez sur le bouton de calculer dans l'interface graphique OptiSystem (figure 4.7).

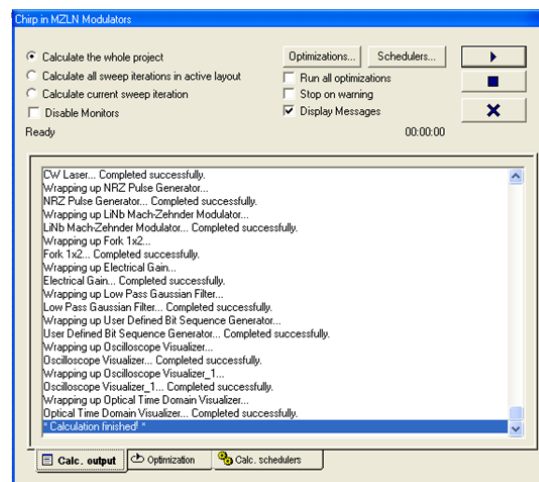


Figure 4.7 : La fenêtre des calculs de mise en projet.

Il ya plusieurs choix pour l'exécution des calculs. Vous pouvez calculer l'ensemble du projet, qui va calculer les résultats pour toutes les configurations et toutes les itérations de balayage dans le projet.

4.3 Les résultats de simulation

Une fois que le schéma est construit, OptiSystem a la possibilité de réaliser plusieurs types d'analyses. Tout dépend du système dont on veut évaluer les performances. Cela peut être juste l'analyse d'un composant, d'un opérateur fonctionnel, pour voir ses propres performances, ses caractéristiques ou alors l'évaluation des performances d'une liaison entière ou partielle, l'évaluation de la qualité de l'information transmise. C'est donc d'abord par une description de ces différentes simulations que va débiter ce paragraphe. Les résultats de simulations peuvent être ensuite visualisés sous différentes représentations, ces dernières seront alors énumérées dans le paragraphe suivant.

4.3.1 La visualisation et le traitement des résultats

Suite à toute simulation, OptiSystem offre des résultats, basés sur l'analyse des signaux simulés: affichage, caractéristiques, bilan de puissance, facteur Q, rapport signal sur bruit, mesure de taux d'erreur... L'affichage est effectué dans un écran de visualisation, encore appelé fenêtre graphique (Figure 4.8).

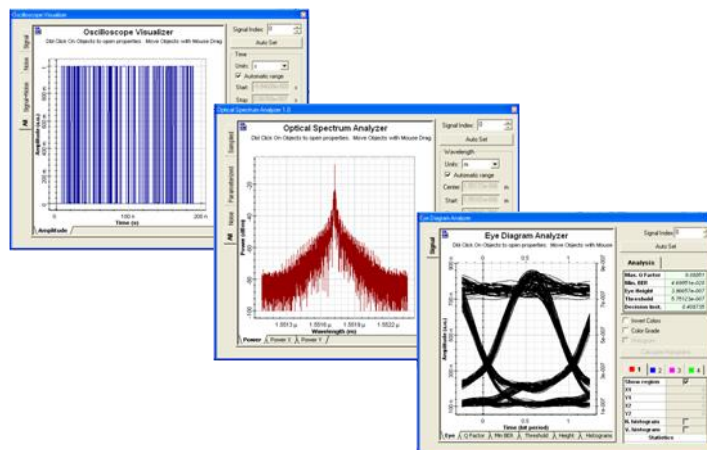


Figure 4.8 : Les fenêtres de la visualisation et le traitement des résultats.

Les simulations temporelles et spectrales sont l'analyse permettant le plus grand nombre de possibilités dans l'exploitation des résultats. Les autres analyses affichent directement le

résultat demandé dans la fenêtre graphique. C'est pourquoi dans la suite de ce paragraphe, les différentes possibilités d'interprétation et de traitement des résultats seront décrites pour une simulation temporelle, même si parfois, elles peuvent encore être valables dans les autres cas.

4.3.2 Critères de qualité

Dans le cas d'une information numérique (cas de cette étude), durant sa transmission le signal se détériore essentiellement à cause du caractère passe bas des composants optoélectroniques, du bruit parasite et des non-linéarités de la fibre optique créant un élargissement temporel des impulsions. Il en résulte un nombre de bits faux après l'opération de décision, qui induit des erreurs dans la transmission. Ainsi faut-il à partir de certaines caractéristiques pouvant qualifier une transmission par fibre optique.

4.3.2.1 Le diagramme de l'œil

Pour un temps bit, la superposition d'un train d'impulsions avec une périodicité donnée (multiple entier du temps bit) aboutit à un diagramme appelé diagramme de l'œil. Ceci permet d'observer en même temps toutes les transitions possibles. On peut alors estimer :

- ✓ La fiabilité du système en vérifiant qu'aucun point n'est à l'intérieur de l'œil, ce qui serait synonyme de séquences mal transmises.
- ✓ La raideur des fronts montants et descendants.
- ✓ Une gigue de phase, ou en anglais jitter, au niveau des passages par la valeur moyenne de l'amplitude, ce qui aura comme conséquence des imprécisions dans la récupération du signal "horloge bit".
- ✓ La stabilité en amplitude des impulsions sur l'épaisseur des états logiques.

Toutefois la qualification d'une transmission par fibre optique par un diagramme de l'œil dépend aussi des conditions de mesure : le temps de réponse de l'oscilloscope, la dérive de l'horloge, la bande passante de la tête d'échantillonnage, la longueur de la séquence, ... etc.

4.3.2 Le taux d'erreur binaire

De façon globale le facteur de qualité d'une transmission par fibre optique est le taux d'erreurs binaires ou TEB (en anglais BER : Bit Error Rate). Il s'agit du rapport entre le nombre de bits faux en sortie du récepteur, par rapport au nombre de bits reçus. Il est possible d'obtenir une estimation analytique du taux d'erreur binaire [14] et de le relier aux paramètres graphiques du diagramme de l'œil. Il faut pouvoir pour cela considérer :

- ✓ Les amplitudes des signaux aux niveaux des « 1 » et des « 0 » sont des variables gaussiennes d'écart type σ ; Elles sont centrées sur u pour le niveau « 1 » et sur 0 pour le niveau « 0 ».
- ✓ Une tension seuil U_s dont vont dépendre les passages entre les niveaux « 0 » et « 1 ».

Lorsque le taux d'erreur binaire TEB est :

$$TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (4.1)$$

Avec : Q le facteur de qualité défini comme :

$$Q = \frac{U_s}{\sigma} = \frac{u}{2\sigma} \quad (4.2)$$

U_s : La tension de seuil.

On estime que la transmission est de bonne qualité lorsque le TEB est inférieur à 10^{-9} ($Q \geq 6$).

4.4 La simulation

La limitation fondamentale pour les systèmes de communication à grande vitesse au cours de la transmission par fibre monomode à $1,55 \mu\text{m}$ est la dispersion chromatique linéaire. Pour ce là on utilise la modulation optique.

Donc l'objectif de cette simulation est d'étudier les performances d'un système utilisant le modulateur de type MZ, et cela pour la comparaison avec la modulation classique (directe).

4.4.1 Simulation d'un système optique utilisant la modulation directe à 10G

4.4.1.1 la Simulation

On réalise le système de transmission suivant:

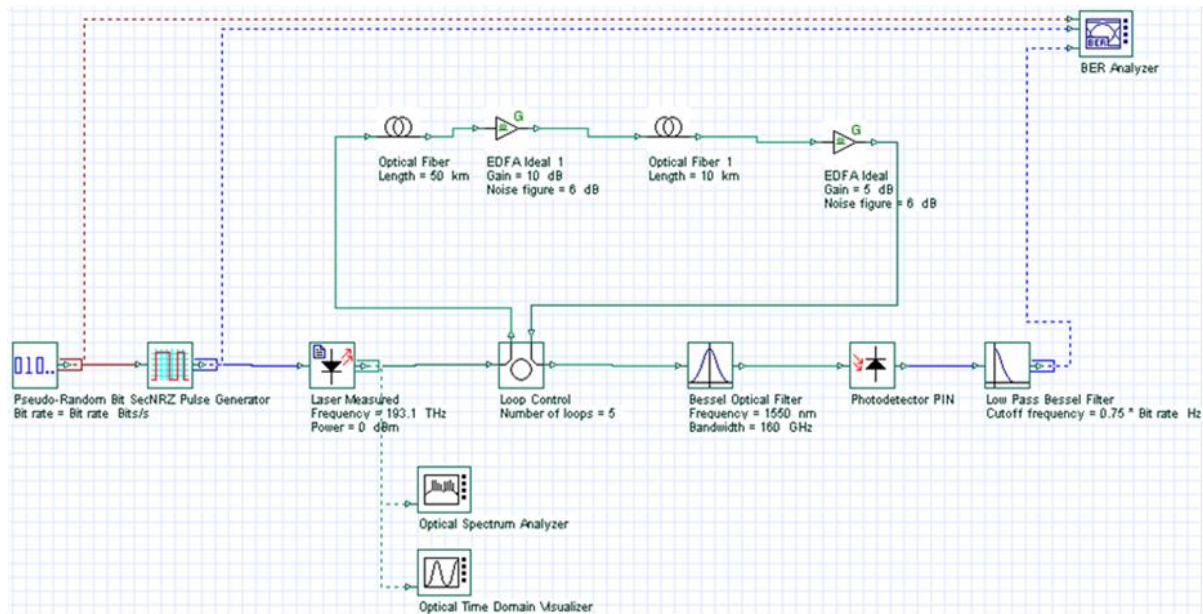


Figure 4.9 : Montage pour la simulation d'un système de transmission optique utilisant la modulation directe.

Ce système se compose des éléments suivants:

- 1- Générateur de signaux NRZ;
- 2- Photodiode PIN pour la détection;
- 3- Deux filtres de Bessel, le premier est un filtre optique passe bande d'ordre 1 de largeur spectral 100 GHz placé avant la photodiode pour minimiser le bruit, et l'autre est un filtre électrique passe bas d'ordre 4 pour minimiser le bruit qui découle de la photodiode et avec une fréquence de coupure est égal à $0.75 \times \text{débit Hz}$.
- 4- Deux amplificateur à fibre dopé Erbium EDFA, le premier avec un gain de 10dB et d'un bruit de 6dB, et l'autre avec un gain de 5dB et d'un bruit de 6dB.
- 5- Deux fibres optiques, la première est une fibre standard télécom (Single Mode Fiber, SMF) à haut dispersion et l'autre est une fibre ayant une dispersion chromatique de signe opposé pour la compensation s'appelant la fibre DCF (Dispersion Compensation Fiber).

Les deux fibres sont caractérisées par les paramètres suivants :

Paramètres système de la fibre ...	De transmission (SMF)	De compensation (DCF)
Longueur (km)	50	10
Atténuation (dB/km)	0.2	0.5
Dispersion chromatique (ps/nm/km)	16	-80
Effet Kerr	oui	oui
Effet Raman	non	non
Coefficient de non linéarité (m^2/W)	3 e^{-20}	3 e^{-20}
Aire effective de la section (μm^2)	93	23
Dispersion Modale de Polarisation	oui	oui

Tableau 4.1 : Caractéristiques des fibres optiques de type SMF et DCF.

6- Enfin on représente les paramètres qui caractérisent le composant essentiel de la modulation directe, c'est la diode laser DL.

- ✓ Longueur d'onde 1550 nm
- ✓ Courant de polarisation 25 mA
- ✓ Bruit RIN -127,799 dB/Hz
- ✓ Largeur de raie 923,396 MHz
- ✓ Courant de seuil 18 mA
- ✓ Bande à -3 dB 7,10837 GHz

4.4.1.2 Résultats et discussions

Afin de connaître à quel point on peut aller avec le débit de transfert d'informations de la modulation directe. On fait varier le débit et garder les valeurs du facteur Q et de TEB pour le cas suivant :

- ✓ Fibre optique SMF: 50 Km
- ✓ Gain EDFA_1: 10 dB
- ✓ Fibre optique DCF: 10 Km
- ✓ Gain EDFA_2: 05 dB

Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Le débit (G bits/s)	le facteur Q	TEB (dB)
2	71.8375	0
4	22.5344	9.06265 e^{-113}
6	14.7749	1.06296 e^{-49}
8	8.52701	6.63594 e^{-18}
10	6.80707	4.41417 e^{-12}
11	5.81162	2.75995 e^{-9}

Tableau 4.2 : Influence du facteur Q et du TEB sur le débit dans un système utilisant la modulation directe.

À partir du tableau ci-dessus, on peut dire qu'on a une détection correcte de l'information optique au débit allant jusqu'à 8 à 10 Gbits/s, mais après 10 Gbits/s l'information disparaît, car le facteur $Q < 6$.

Une deuxième étude pour voir l'influence de la longueur de la fibre dans le cas de la modulation directe, on fait varier la longueur et le gain d'EDFA en même temps pour garder l'équilibre de la compensation dans trois cas différents :

1^{ère} cas :

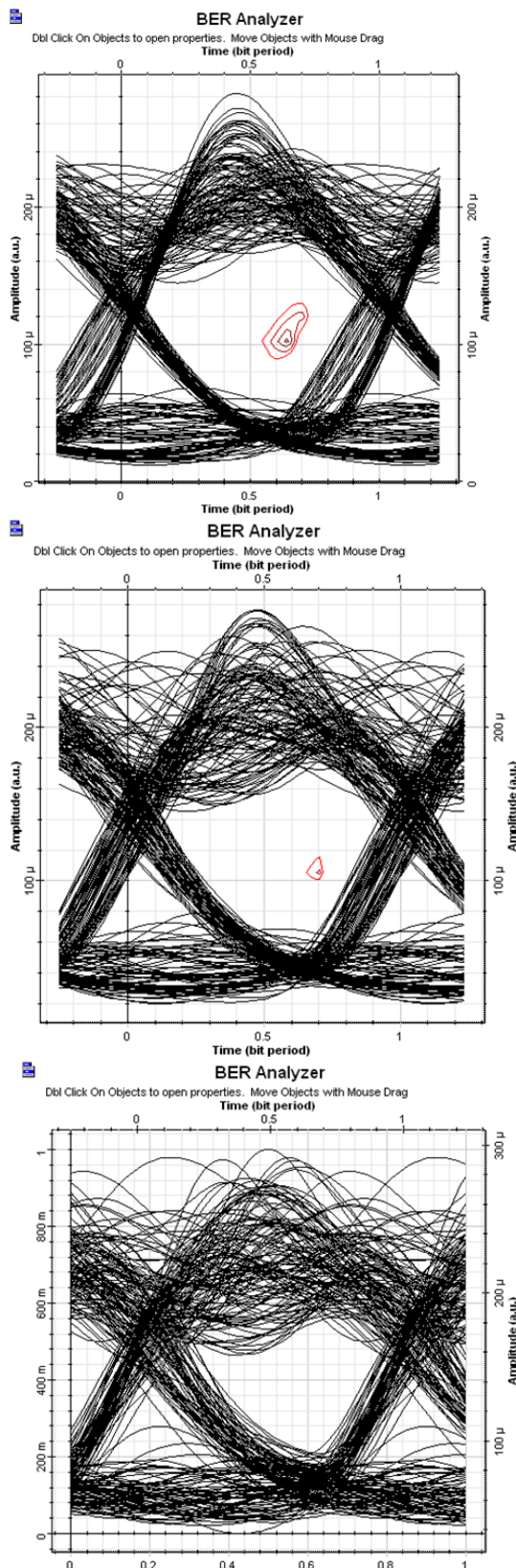
- ✓ Fibre optique SMF: 50 Km
- ✓ Gain EDFA_1: 10 dB
- ✓ Fibre optique DCF: 10 Km
- ✓ Gain EDFA_2: 05 dB

2^{ème} cas :

- ✓ Fibre optique SMF: 75 Km
- ✓ Gain EDFA_1: 15 dB
- ✓ Fibre optique DCF: 15 Km
- ✓ Gain EDFA_2: 07.5 dB

3^{ème} cas :

- ✓ Fibre optique SMF: 100 Km
- ✓ Gain EDFA_1: 20 dB
- ✓ Fibre optique DCF: 20 Km
- ✓ Gain EDFA_2: 10 dB

**a) - 1^{ère} cas**

Fibre optique SMF : 50 Km
Gain EDFA_1 : 10 dB
Fibre optique DC F : 10 Km
Gain EDFA_2 : 05 dB

b) - 2^{ème} cas

Fibre optique SMF : 75Km
Gain EDFA_1 : 15 dB
Fibre optique DCF : 15Km
Gain EDFA_2 : 7.5 dB

c) - 3^{ème} cas

Fibre optique SMF : 100 Km
Gain EDFA_1 : 20 dB
Fibre optique DCF : 20 Km
Gain EDFA_2 : 10 dB

Figure 4.10 : Diagramme d'œil avec les trois longueurs différentes dans le cas de la modulation directe.

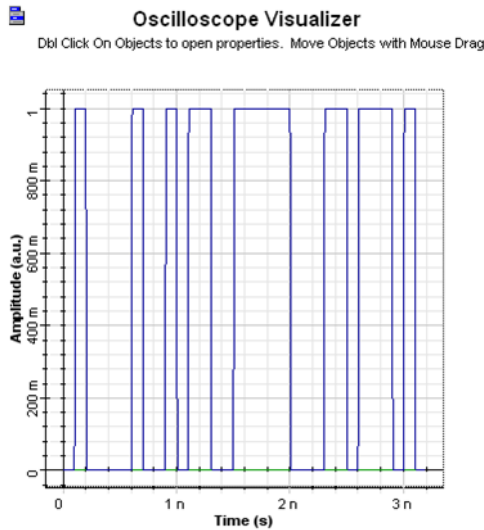
Les trois figures ci-dessus illustrent le diagramme d'œil avec les trois longueurs et les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Les différents cas		Le facteur Q	TEB (dB)
1 ^{ère} cas	(60 Km)	6.80707	4.41417 e^{-12}
2 ^{ème} cas	(90 Km)	6.11728	4.03252 e^{-10}
3 ^{ème} cas	(120 Km)	4.68791	1.25055 e^{-6}

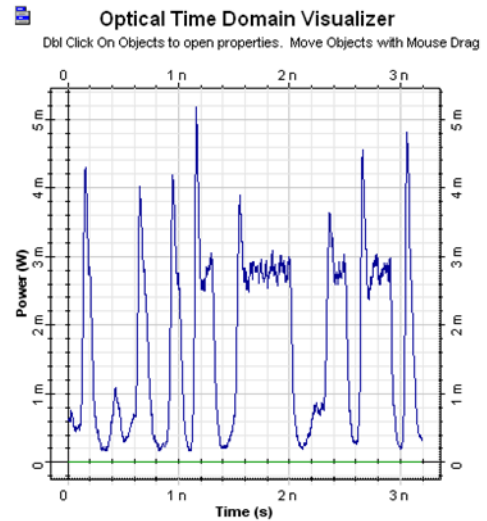
Tableau 4.3 : Influence de la longueur sur le facteur Q et le TEB pour un système utilisant la modulation directe.

On remarque à partir des diagrammes de l'œil précédents, que l'information disparaît après le deuxième cas, celui de : 90 Km.

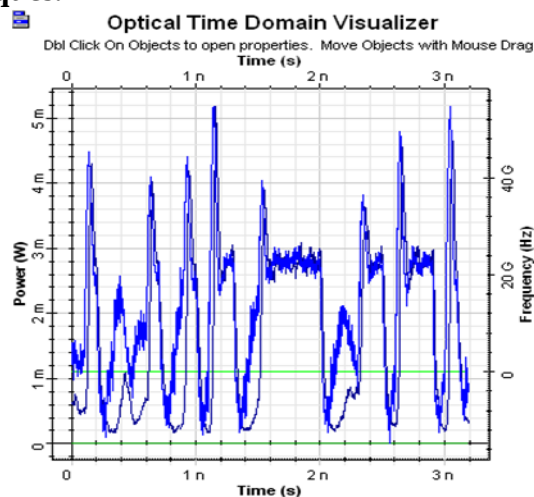
Cette limitation de débit dans la modulation directe est due aux problèmes d'oscillation de relaxation et le chirp de la diode laser comme indiqué précédemment (dans le 3^{ème} chapitre). Et pour voir ces phénomènes on étudie le signal optique à la sortie de la diode.



a) Données électriques.



b) Signal modulé.

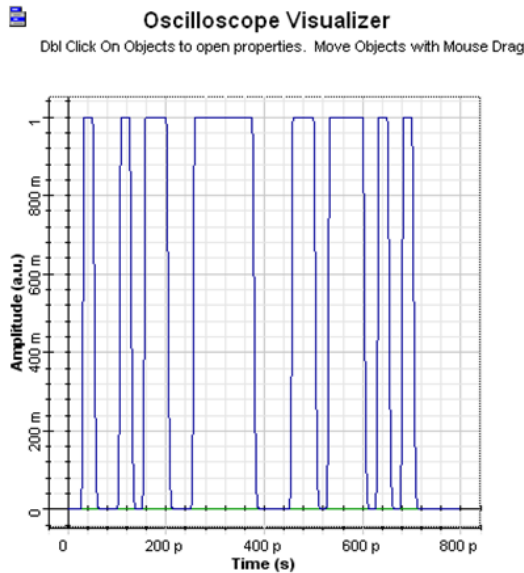


c) Signal modulé + le chirp.

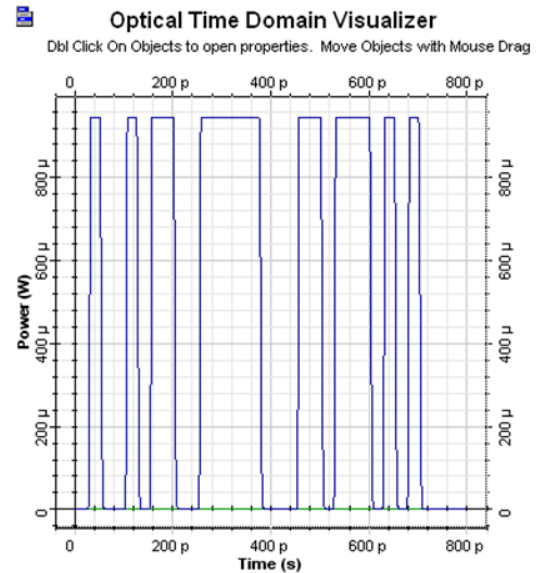
Figure 4.11 : Phénomènes d'oscillation de relaxation et le chirp de la modulation directe.

Dans les figure (4.12) ci-dessous (signal optique à la sortie du modulateur Mach-Zehnder), on n'observe aucun phénomène d'oscillation de relaxation qui apparaît ,par contre , le signal souffre du phénomène de chirp, mais sa valeur est faible.

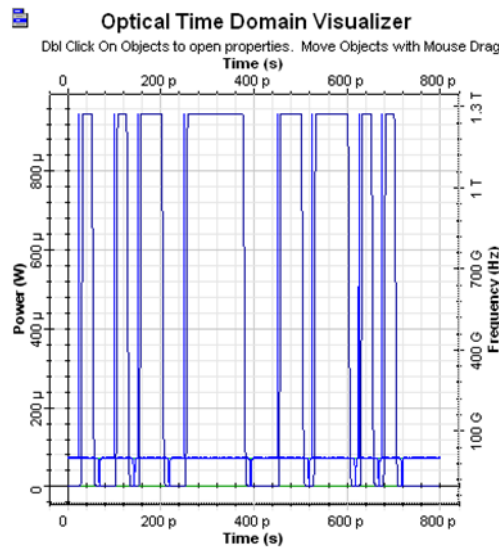
Dans la partie suivante on simulera le même système mais en utilisant la modulation externe avec le modulateur de MZ à dawl- drive.



a) Données électriques.



b) Signal modulé.



c) Signal modulant + le chirp.

Figure 4.12 : Phénomènes d'oscillation de relaxation et le chirp dans le cas de la modulation externe avec le modulateur de MZ à dawl-drive.

4.4.2 Simulation d'un système optique utilisant la modulation externe à 40G

4.4.2.1 la Simulation

On réalise le système de transmission précédent dans les cas d'une modulation directe mais en utilisant la modulation externe.

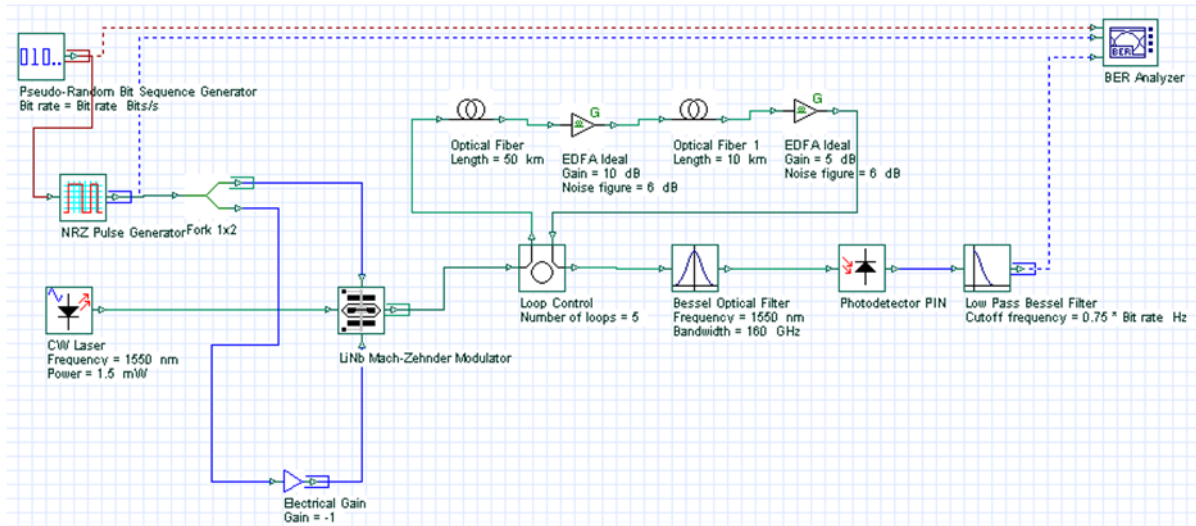


Figure 4.13 : Montage pour la simulation d'un système de transmission optique utilisant la modulation externe avec le modulateur de MZ dual-drive.

Le modulateur de Mach-Zehnder sur Niobate de lithium utilisé dans cette simulation possède une configuration de coup Z en dual-drive caractérisé par :

- 1 - Tension de polarisation de commutation DC = 4 V : C'est la tension continue nécessaire pour faire tourner le modulateur de l'état OFF à l'état ON, ou vice versa.
- 2 - Tension de commutation RF = 4V : Tension RF requise pour activer le modulateur de l'état OFF à l'état ON, ou vice versa.
- 3 - Tension de polarisation 1 = 0 V.
- 4 - Tension de polarisation 2 = 2 V.
- 5 - perte d'insertion = 2 dB.
- 6 - Tension de modulation 1 = 2 V.
- 7 - Tension de modulation 2 = 2 V.

Dans ce cas de simulation on à un amplificateur électrique avec un gain négative égal à -1 pour garder une tension négative au pôle 2.

Et pour l'alimentation optique, c'est une diode laser caractérisée par :

- ✓ Longueur d'onde 1550 nm
- ✓ puissance 1.5 mW

4.4.2.2 Résultats et discussions

Afin de connaître l'influence de la modulation externe sur le débit de transfert de l'information. On varie le débit en gardant les mêmes valeurs du facteur Q et de TEB pour le cas suivant :

- ✓ Fibre optique SMF : 100 Km
- ✓ Gain EDFA_1 : 20 dB
- ✓ Fibre optique DCF : 20 Km
- ✓ Gain EDFA_2 : 10 dB

Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Le débit (G bits/s)	Le facteur Q	TEB (dB)
25	8.10272	1.95821 e^{-16}
30	7.98192	5.32596 e^{-16}
35	6.99853	9.89115 e^{-13}
40	6.21658	1.78842 e^{-10}
45	5.19649	7.16846 e^{-8}

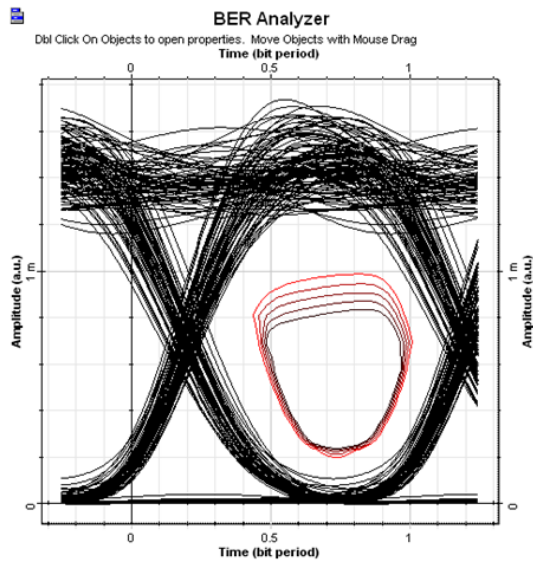
Tableau 4.4 : Variation du débit en fonction du facteur Q et du TEB pour le système utilisant la modulation externe de type MZ.

Pour voir l'influence de la modulation externe sur la longueur de la fibre on varie la longueur et le gain d'EFDA en même temps pour garder l'équilibre de la compensation avec trois cas différents comme on l'a fait dans le cas de la modulation directe mais avec un débit égal à 40Gbits/s:

Les résultats obtenus pour les trois longueurs sont donnés dans le tableau suivant et à la figure (4.14) :

les différents cas	le facteur Q	TEB (dB)
1 ^{ère} cas (60 Km)	11.7289	3.19394 e^{-32}
2 ^{ème} cas (90 Km)	8.60768	2.59915 e^{-18}
3 ^{ème} cas (120 Km)	6.7823	4.05338 e^{-12}

Tableau 4.5 : variation de la longueur de transmission en fonction du facteur Q et TEB pour un système utilisant la modulation externe de type MZ.

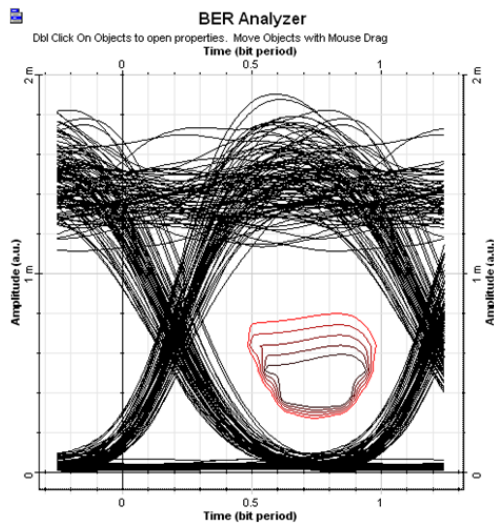
**a) - 1^{ère} cas**

Fibre optique SMF : 50 Km

Gain EDFA_1 : 10 dB

Fibre optique DCF : 10 Km

Gain EDFA_2 : 05 dB

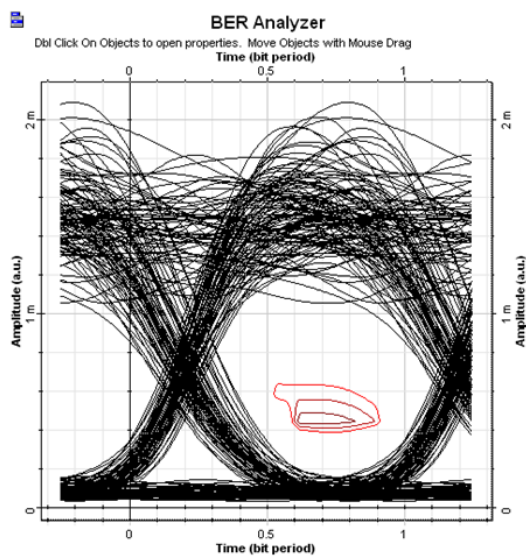
**b) - 2^{ème} cas**

Fibre optique SMF : 75Km

Gain EDFA_1 : 15 dB

Fibre optique DCF : 15Km

Gain EDFA_2 : 7.5 dB

**c) - 3^{ème} cas**

Fibre optique SMF : 100 Km

Gain EDFA_1 : 20 dB

Fibre optique DCF : 20 Km

Gain EDFA_2 : 10 dB

Figure 4.14 : Diagramme d'œil avec les trois longueurs différentes dans le cas de la modulation externe.

À partir du tableau ci-dessus et les figures de diagramme d'œil, on peut dire qu'on a une détection correcte de l'information optique dans le système présenté précédemment utilisant la modulation électro-optique avec un débit égal à 40 Gbits/s et aussi avec une longueur de 120 Km.

Les facteurs responsables de ces bons résultats du modulateur électro-optique à daul-drive c'est qu'il ne souffre pas du problème de l'oscillation de relaxation et la valeur de chirp est très faible par rapport à la modulation directe. La relation donnant le facteur de chirp α pour le modulateur de MZ à daul-drive est :

$$\alpha = \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2} \quad (4.3)$$

Où : V_1 et V_2 sont les tensions appliquées aux bras 1 et 2, respectivement.

Les résultats obtenus pour ces tensions sont montré dans la figure 4.12. La puissance du signal optique varie de 0 à 1.5 mW. La fréquence du chirp est d'environ 100 Hz (elle peut être considérée comme pratiquement nulle en raison de sa faible valeur).

Pour voir les variations de la valeur de chirp avec les changements de la tension appliquée, la valeur crête à crête des tensions sont fixés à $V_1 = 3$ v et $V_2 = 1$ v, pour donner $\alpha = 0.5$. Le chirp dans le signal est beaucoup plus grand que celui présenté dans la figure 4. 12. La fréquence du chirp est d'environ 3 GHz.

Conclusion

Dans ce chapitre on a utiliser le logiciel OptiSystem 7 pour simuler un système de transmission optique à grande vitesse à travers une fibre monomode à 1,55 μm et à dispersion chromatique linéaire. Avec deux cas de modulations différentes directe et externe utilisant respectivement la diode laser et un modulateur électro-optique de type Mach-Zehnder à Daul-drive dans le cas de simulation.

A la fin, et après cette simulation on peut conclure que la modulation externe électro-optique (MZ) donne un bon résultat par rapport à la modulation directe. Par exemple dans le troisième cas (120 Km), le débit dans le cas du modulateur électro-optique peut éteindre à 40 Gbits/s par contre dans le cas de la modulation directe l'information disparaît et reste valable jusqu'à la distance 90 Km. Même à cette distance le débit est limité à environ de 10 Gbit/s.

Conclusion générale

Les télécommunications optiques actuels offrent une vitesse plus élevée de transfert de données par rapport à la communication classique (électrique). Mais nous ne pouvons pas dire qu'elles ne souffrent pas de problèmes qui limitent leur action y compris les problèmes étudiés dans ce travail, à cause du support de transmission optique qui est la fibre optique. Cette dernière souffre des problèmes de linéarité lui ajoutant la dispersion chromatique.

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne une différence du temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques, qui sont dues à la source optique. Pour ce là, il faut qu'on génère des impulsions monochromatiques et sans déformation tant que possible.

L'injection directe des informations aux diodes LD ou LED s'appelle modulation directe comportant plusieurs problèmes qui limitent les performances du système. Pour cela, la modulation externe est apparue pour réduire au minimum ces problèmes.

Ce travail a examiné la modulation électro-optique et ses performances par rapport à la modulation directe. Mais tout d'abord il faut bien maîtriser tous les composants utilisés dans le système de communication optique et en particulier la support de transmission (la fibre optique).

Le principe des modulateurs électro-optiques repose sur la modification de l'indice de réfraction de certains matériaux sous l'application d'un champ électrique. Le niobate de lithium (LiNbO_3), l'un des matériaux inorganiques couramment utilisés pour les applications commerciales à cause de la valeur considérable de son tenseur électro-optique.

Pour voir les performances du modulateur électro-optique, dans le dernier chapitre on a présenté une simulation utilisant une fibre standard télécom (Single Mode Fiber, SMF) à haut dispersion et une autre fibre ayant une dispersion chromatique de signe opposé pour la compensation s'appelant la fibre DCF

(Dispersion Compensation Fiber) pour les deux types de modulations. Le modulateur MZ utilisé possède une configuration en Z à Daul-drive.

À partir des résultats de simulation, la modulation électro-optique à modulateur MZ possédant une configuration en Z à Daul-drive offre une possibilité de générer des impulsions presque monochromatiques par rapport à la modulation directe à diode laser. Elle offre aussi une bande passante considérable et un débit plus élevé (40 Gbits/s), et elle permet de réduire la dispersion chromatique dans la fibre optique et donc augmenter sa longueur.

Parmi les modulateurs électro-optiques qui sont basés sur l'interféromètre Mach Zehnder, il existe les modulateurs « single drive » et « dual drive » qu'on a utilisé dans la simulation. Mais il y a aussi une nouvelle configuration qui a vu le jour ces dernières années, c'est l'interféromètre de Mach Zehnder à « quadri-drive ». Ce modulateur assure une modulation à quatre phases (QPSK : Quadrature Phase Shift Keying) en particulier de coupe Z.

L'utilisation d'un modulateur Mach Zehnder à quatre électrodes RF en coupe Z, se justifie par sa meilleure efficacité électro-optique existante.

Références bibliographiques

- [1] *Harry J. R. DUTTON*, (1998) " Understanding Optical Communications", International Business Machines Corporation, United States.
- [2] *S. JOHN M*, (1985) " Optical Fiber Communications", Rrentice-Hall International, London.
- [3] *J. Crisp*, (2001) " Introduction to Fiber Optics", Newnes, Oxford.
- [4] *G.P. AGRAWAL, P. KELLEY, I. KAMINOW*, (2001) " Nonlinear Fiber Optics ", ACADEMIC PRESS, USA.
- [5] *S. PRASAD, H. SCHUMACHER, A. GOPINATH*, (2009) " High-Speed Electronics and Optoelectronics: Devices and Circuits", Cambridge University Press, UK.
- [6] *G. GHIONE*, (2009) " Semiconductor Devices for High-Speed Optoelectronics", Cambridge University Press, UK.
- [7] *N.ASSAD*, (2008) " Cours de télécommunication optique ", Institut de science appliqué et économique", Paris.
- [8] *J. LABARTHE*, (2008) " OPTIQUE ONDULATOIRE ", Université Paris-Sud Orsay ", Paris.
- [9] *A. ASPECT, C.FABRE, G.GRYNBERG* (2003) " Optique quantique ", Université Paris-Sud Orsay ", Paris.
- [10] *F. BRETENAKER, C. DRAG*, (2008) " Cours de Physique des Lasers ", Laboratoire Aimé Cotton, CNRS, Orsay.
- [11] *M. CASIMER, J CAROLYN*, (2006) " FIBER OPTIC ESSENTIALS", Elsevier Inc., UK.

- [12] M. BASS, Eric W. STRYLAND, (2002) " FIBER OPTICS HANDBOOK", McGraw-Hill Companies, United States.
- [13] G.P. AGRAWAL, (2002) " Fiber-Optic Communication Systems ", John Wiley & Sons, Inc, New York.
- [14] E. ROSENCHER, B. VINTER (2004) " Optoelectronics", Cambridge, UK.
- [15] J.VERNEUIL, "Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s", thèse de doctorat , université de LIMOGES. 2003.
- [16] N. BOUDRIOUA, "Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD", thèse de doctorat , Ecole Doctorale IAEM – Lorraine. 2007.
- [17] A.CHAIBATA, S.MARIETOU, "Transmission sur fibre optique haut débit", Mémoire d'Ingénieur, Institut de Télécommunications Abdelhafid Boussouf -Oran -. 2005
- [18] J.BARTON,C.GUILEMENT, (2005) " les verres science et technologie ", EDP Sciences France.
- [19] G.P. Agrawal, (2005) " Light wave technology Telecommunication Systems", John Wiley & Sons,, New Jersey.
- [20] C. DECUSATIS, (2002) " HANDBOOK OF FIBER OPTIC DATA COMMUNICATION", ACADEMIC PRESS, Florida.
- [21] T.FRANCIS, S. JUTAMULIA, S. YIN (2002) " Introduction to Information Optics", ACADEMIC PRESS, Florida.
- [22] G. KEISER (1991) " Optical fiber communication", McGraw-Hill Companies, United States.
- [23] R. CLAVEAU, "Contribution à l'étude des amplificateurs distribués et des circuits de polarisation active. applications aux circuits de commande de modulateurs

électro-optiques”, thèse de doctorat , L’institut national des sciences appliquées de RENNES. 2005.

[24] A. BOUDRIOUA, (2006) "Optique intégrée, théorie et application.", Lavoisier, Paris.

[25] J. COUTAZ, (2008) "Optoélectronique térahertz.", EDP Sciences, France.

[26] H. BRAHIMI, “Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence”, thèse de doctorat L’université de TOULOUSE. 2010.

[27] M. BASS, C. MACDONALD, G. LI, (2010) "HANDBOOK OF OPTICS.", McGraw-Hill Companies, Inc, United States.

[28] B.THANH, “Étude et réalisation d'un système instrumental de stabilisation d'un modulateur électro-optique. Application à l'amélioration du comportement d'un oscillateur optoélectronique”, thèse de doctorat, L’école normale supérieure de CACHAN. 2011.

[29] H.GOURAUD, “Filtrage opto-microonde par synthèse optique de réponse impulsionnelle”, thèse de doctorat, Université de LIMOGES. 2004.

[30] S. TACON, “Mise en œuvre et étude des techniques d’intégration de matériaux organiques en vue de la réalisation d’un modulateur électro-optique”, thèse de doctorat, Université de NANTES. 2007.

[31] R. VALOIS, “ Contribution de l'analyse électromagnétique et outils associés à la conception de modules de communications millimétriques et optoélectroniques ”, thèse de doctorat, Université de LIMOGES. 2005.

[32] S. Warm Berlin, “ Electronic Predistortion Strategies For Directly Modulated Laser Systems”, thèse de doctorat, Université de Berlin. 2009.

- [33] J. PRAT, (2008) "Next-Generation FTTH Passive Optical Networks.", Springer Science + Business Media B.V, USA.
- [34] J.PETIT FERRUFINO, “ « Dual Electroabsorption Modulated Laser » Etude et caractérisation d'une nouvelle source optique laser-modulateur intégrés pour les transmissions numériques à haut-débit et les applications Radio-sur-Fibre”, thèse de doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications Spécialité Electronique et Communications. 2010.
- [35] R. VALOIS, “ Contribution de l'analyse électromagnétique et outils associés à la conception de modules de communications millimétriques et optoélectroniques ”, thèse de doctorat, Université de LIMOGES. 2005.
- [36] B. FTAICH-FRIGUI, “ Aide à la conception et à la caractérisation expérimentale de composants optoélectroniques pour les interfaces RFOptique à très haut débit. Optimisation du packaging associé par une approche hybride électromagnétique-circuit”, thèse de doctorat, Université de LIMOGES. 2010.
- [37] I. KAMINOW, T. LI (2002) "Optical fiber telecommunications IVA components.", ACADEMIC PRESS, USA.
- [38] M. BOUVROT, “ Micro modulateurs de lumière à base de cristaux électro-optiques à coefficients géants”, thèse de doctorat, École Doctorale SPIM. 2010.
- [39] Y. Ben M'SALLEM, “ Génération d'impulsions optiques brèves à haut débit par mélange à quatre ondes”, Mémoire d'ingénieurs, École supérieure de communication de TUNIS. 2006.
- [40] OptiWave , “ Introduction to the OptiSystem Software”, Wireline Communications Group. 2008. Germany.

- [41] Reinhold Noé, 2010 "Essentials of Modern Optical Fiber Communication.", Springer, Germany.
- [42] K. IIZUKA, (20082) "ELEMENTS OF PHOTONICS Volume II For Fiber and Integrated Optics.", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [43] K.MERZOUK, "Etude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage temporel ," thèse de doctorat, institut nationale de Grenoble, 2008.
- [44] Jia-Ming Liu, 2005 "Photonic Devices.", University Press, New York.
- [45] Rachid RADOUANI, 2006 "Dérive dans les modulateurs électro-optiques Mach-Zehnder. Analyse physique et résolution" thèse de doctorat, l'Université Paul Verlaine - Metz.