



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'enseignement Supérieur  
Et de la Recherche scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued  
Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude  
En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Technologie**

**Filière : Télécommunications**

**Spécialité : Systèmes de télécommunications**

## **Thème**

**Etude Et Simulation D'un Système  
De Transmission Optique Cohérent**

**Présenté par : AYACHI MAMMAR ,SAYAH Abderraouf et TAMER Youcef**

**Devant les jurys:**

MEDJOURI Abdelkader	MCA	Encadreur
LAKHDER Nacer Eddine	MCA	Président
MEHALOU Said	MCA	Examineur

**2019-2020**





# *Remercîment*

*Nous rendons nos profondes gratitudes à dieu qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.*

*A la suite Nous tenons à remercier vivement Mr. **MEDJOURI Abdelkader**, promoteur qui a proposé et dirigé ce travail.*

*Nous tenons également à remercier les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.*

*Enfin, nous tenons remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, participé à l'élaboration de ce modeste mémoire.*

# **TABLE DES MATIERES**

# Table des matières

Remercîment .....	I
Table Des Matieres .....	II
Liste Des Figures.....	VII
Liste Des Tableaux.....	X
Liste Des Acronyms .....	XII
Résumé.....	XV
Introduction générale .....	1

## CHAPITRE I

### GENERALITE SUR LA FIBRE OPTIQUE

I-1 Introduction.....	6
I-2 Structure de la fibre optique.....	6
I-3 La Propagation dans la fibre optique .....	7
I-4 Caractéristique de la fibre optique .....	7
I-4-1 L'indice de Réfraction .....	7
I-4-2 L'angle d'acceptante .....	7
I-4-3 Ouverture Numérique (ON).....	8
I-4-4 Longueur d'onde de coupure [3].....	8
I-4-5 La fréquence normalisée .....	8
I-4-6 Modes de propagation.....	9
I-4-7 Bande passante.....	9
I-5 Différents types de fibre optique.....	9
I-5-1 Fibre optique Multi Mode .....	10
I-5-2 Fibre optique Monomode .....	11
I-6 Les effets linéaires .....	11
I-6-1 Atténuation du signal optique dans les fibres optiques .....	11
I-6-2 La dispersion .....	12

# Table des matières

I-7 Les effets non linéaires .....	15
I-7-1 Définition .....	15
I-7-2 L'effet Kerr : .....	15
I-7-2-1 Auto-modulation de phase (SPM: self-phase modulation): .....	15
I-7-2-2 Modulation de phase croisée (XPM : cross-phase modulation).....	15
I-7-2-3 Mélange à quatre ondes (FWM : four-wavemixing).....	16
I-7-3 Les effets de la diffusion stimulée.....	16
I-7-3-1 La diffusion Raman stimulée (SRS ).....	16
I-7-3-2 La diffusion Brillouin stimulée (SBS) .....	16
I-8 Les avantages et inconvénients de la fibre optique .....	16
I-8-1 Avantages .....	16
I-8-2 Inconvénients : .....	17
I-9 Conclusion .....	17

## CHAPITRE II

### ARCHITECTURE DE SYSTEME DE COMMUNICATION OPTIQUE

II-1 Introduction .....	19
II-2 Structure générale d'un système de communication optique.....	19
II-3 Système de communication optique à modulation d'intensité /détection directe ( IM/DD) 20	
II-3-1 Eléments de base des systèmes optiques IM/DD .....	20
II-3-1-1 Bloc d'émission.....	20
II-3-1-1-1 Sources optiques .....	20
II-3-1-1-2 Le modulateur.....	21
II-3-1-1-3 Le circuit de commande .....	23
II-3-1-1-4 Différents formats de modulation utilisés dans le système IM/DD.....	23
II-3-1-1-4-1 Modulation OOK (On-Off Keying).....	24
II-3-1-2 Bloc de réception .....	25
II-3-2-2-1 Le photodétecteur: .....	25

## Table des matières

---

II-3-2-2-2 la photodiode PIN .....	26
II-3-2-2-3 Le photo détecteur à avalanche (APD) [44] .....	26
II-3-2-2-4 Le préamplificateur.....	27
II-3-2-2-5 Amplificateur électrique .....	27
II-3-2-2-6 Circuit de filtrage.....	27
II-3-2-2-7 Le Circuit de décision.....	27
II-4 Système de communication optique a détection cohérente et utilisation de DSP .....	28
II-4-1 Eléments de base sur le système optique cohérent .....	28
II-4-1-1 Transmetteur cohérent .....	28
II-4-1-1-1 Bloc de traitement de signal (DSP) .....	29
II-4-1-1-2 Bloc de optique (Modulation optique).....	30
II-4-1-2 Les Modulateurs .....	30
II-4-1-2-1 Le Modulateur Mach-Zehnder (MZM) .....	30
II-4-1-2-2 Le modulateur optique IQ.....	31
II-4-1-2-3 Format de Modulation .....	32
II-4-1-3 Récepteur Cohérent .....	32
II-4-1-3-1 Partie optique.....	33
II-4-1-3-2 Bloc de traitement numérique de signal .....	35
II-4-1-3-2-1 Front-End Compensation (l'immbalance I Q ): .....	36
II-4-1-3-2-2 Récupération d'horloge .....	36
II-4-1-3-2-3 Compensation de la dispersion chromatique DC .....	37
II-4-1-3-2-4 Compensation de la PMD et le démultiplexage de polarisation.....	38
II-4-1-3-2-5 Estimation de décalage de fréquence et de récupération de phase .....	40
II-4-1-3-3 Blok de Détection de symboles et décodage FEC .....	41
II-4-2 Compensation de effets non-linéaire .....	42
II-5 Conclusion.....	44

# Table des matières

## CHAPITRE III

### **SIMULATION DE UNE CHAINE DE TRANSMISSION D'UN SIGNAL OPTIQUE A BASE DE RECEPTEUR COHERENT**

III-1 Introduction .....	46
III-2 système optique cohérent .....	46
III-3 Paramètres de la simulation.....	46
III-3-1 Influence de Bruit (RIN, bruit quantique, bruit de phase et PMD) .....	46
III-3-1-1 En absence de bruit :.....	46
III-3-1-2 En présence de bruits .....	48
III-3-2 Influence de la puissance émise.....	48
III-3-2-1 Résultats de simulation .....	49
III-3-2-2 BER en fonction de ONSR et la puissance de lancement .....	50
III-3-3 Comparaison entre le système avec QAM et DPSK .....	51
III-3-3-1 QAM-4.....	51
III-3-3-2 Résultats de simulation .....	51
III-3-3-3 DPSK .....	53
III-4 Conclusion .....	54
Conclusion Générale .....	55
Reference Et Bibliographie .....	57
Annex .....	65

# **LISTE DES FIGURES**

## Liste des figures

N°	Figure	Page
<b>I-1</b>	structure d'une fibre optique	6
<b>I-2</b>	loi de propagation de signal dans la fibre optique	7
<b>I-3</b>	Angle d'acceptante	8
<b>I-4</b>	Ouverture numérique d'une fibre optique	8
<b>I-5</b>	propagation de lumière dans la fibre optique	10
<b>I-6</b>	fibre optique Multi-mode a sauté d'indice	10
<b>I-7</b>	fibre optique Multi-mode a gradient d'indice	11
<b>I-8</b>	fibre optique Monomode	11
<b>I-9</b>	Atténuation spectrale d'une fibre optique	12
<b>I-10</b>	Effet de l'atténuation	12
<b>I-11</b>	Les effets de la dispersion chromatique sur une impulsion optique	13
<b>I-12</b>	Schéma de principe décrivant la dispersion de mode de polarisation	14
<b>I-13</b>	Principe de PMD due à la biréfringence de la fibre optique	14
<b>II-1</b>	schéma synoptique d'une liaison optique	19
<b>II-2</b>	Schéma d'un système classique de transmission optique sur fibre	20
<b>II-3</b>	Bloc-diagramme de l'émetteur optique	23
<b>II-4</b>	Principe d'une transmission sur fibre optique par modulation d'intensité et détection directe	24
<b>II-5</b>	Représentation de l'intensité d'un signal optique NRZ (haut) et RZ (bas) en fonction du temps	
<b>II-6</b>	schéma d'un récepteur optique a détection directe	25
<b>II-7</b>	Structure de base d'une photodiode PIN	27
<b>II-8</b>	Principe de la décision basé sur le diagramme de l'œil	28
<b>II-9</b>	Block diagramme de transmetteur optique cohérent	29
<b>II-10</b>	Transmetteur optique cohérent avec le bloc DSP	31
<b>II-11</b>	Structure de modulateur d'intensite de Mach-Zehnder	32
<b>II-12</b>	Architecture du transmetteur cohérent avec un modulateur optique a base de deux modulateurs MZM	32
<b>II-13</b>	Constellations et mappage bit à symbole pour différents formats QAM.	33
<b>II-14</b>	Schéma de principe du récepteur cohérent appliqué à chaque composante en polarisation	34
<b>II-15</b>	Un mixeur hybride à 90° "cohérent Optical front-end"	35
<b>II-16</b>	Schéma d'un récepteur cohérent qui contient les deux blocs " Optical front-end" et le bloc de "DSP".	36
<b>II-17</b>	Bloc de traitement numérique du signal	37
<b>II-18</b>	Méthode de récupération d'horloge de Gardner avec mise à jour des erreurs	38
<b>II-19</b>	La compensation de CD dans le domaine fréquentiel base sur la FFT et IFFT	38
<b>II-20</b>	Schéma d'un filtre a réponse impulsionnelle FIR	39
<b>II-21</b>	Comparaison de signal a la réception et après la compensation de CD	39
<b>II-22</b>	Fonctionnalité de l'étage de filtrage numérique	39
<b>II-23</b>	L'égalisateur adaptatif "papillon" base sur l'algorithme CMA	39

## Liste des figures

<b>II-24</b>	Représentation graphique de l'une des composantes de polarisation du signal après égalisation	41
<b>II-25</b>	Les deux composantes de polarisations X et Y avant et après l'étape de la démultiplexage de polarisation	
<b>II-26</b>	Représentation de l'une des composantes de polarisation du signal après la récupération de phase de porteuse	42
<b>II-27</b>	Schéma de différents étapes traitement de signal applique au récepteur cohérent	43
<b>II-28</b>	La constellation de différents signaux après transmission de 1000 km avec DSP	43
<b>II-29</b>	Le principe de la compensation non linéaire de la fibre basée sur la méthode DBP	44
<b>II-30</b>	compensateur non linear	45
<b>III-1</b>	Schéma de système de communication cohérent avec digital signal processing	47
<b>III-2</b>	Constellation avec modulation QAM (M=4) sans bruit et PMD	48
<b>III-3</b>	Diagramme d'œil en absence de bruits	48
<b>III-4</b>	Constellation avec modulation QAM (M=4) avec bruits	49
<b>III-5</b>	Constellation de signal avec modulation 4- QAM après l'égaliseur et après la CPR	50
<b>III-6</b>	Courbe de BER en fonction de puissance reçu(dBm)	51
<b>III-7</b>	Courbe de BER en fonction d'ONSR	51
<b>III-8</b>	Constellation de signal au fonction de modulation 4- QAM	52
<b>III-9</b>	Courbe de BER en fonction d'ONSR cas de modulation 4-QAM	53
<b>III-10</b>	Courbe de BER en fonction de puissance reçu(dBm) cas de modulation 4-QAM	53
<b>III-11</b>	Courbe de BER en fonction de puissance reçu(dBm) cas de modulation DPSK	54
<b>III-12</b>	Courbe de BER en fonction d'ONSR cas de modulation DPSK	54

# **LISTE DES TABLEAUX**

## Liste des Tableaux

---

N°	Tableaux	Page
<b>1</b>	Paramètres de la simulation d'effet de bruit	47
<b>2</b>	Paramètres de la simulation d'effet de puissance de lancement	49
<b>3</b>	Paramètres de la simulation d'effet de Nombre de Modulation (M=4)	52

# **LISTE DES ACRONYMS**

## Liste des Tableaux

---

- **ADC** : analog to Digital Converter
- **AM** : Amplitude Modulation
- **ASK** : Amplitude Shift Keying
- **BER** : Bit Error Rate
- **CD** : Chromatic dispersion
- **CMA** : Constant modulus algorithm
- **DD** : Decision directed
- **DP** : Dual polarization
- **DAC** : Digital to Analog Converter
- **DCF** : Dispersion Compensation fiber
- **DFB** : Distributed Feed Back
- **DQPSK** : Differential quadrature phase shift keying
- **DSP** : Digital signal processing
- **DSB** : Double Side Band
- **DD-MZM** : Dual-Drive Mach-Zehnder
- **EAM** : Electro-Absorption Modulator
- **EDFA** : Erbium doped fibre amplifier
- **FEC** : Forward Error Correction
- **FFT** : Fast Fourier Transform
- **FIR** : Finite impulse response
- **IM/DD** Intensity Modulation and Directed Detection
- **I/Q** : In Phase / Quadrature
- **IIR** : Infinite Impulse Response
- **iFFT** : inverse Fast Fourier Transform
- **ISI** : Inter-Symbol Interference
- **LMS** : Least mean squares
- **LO** : Local oscillator
- **ML** : Maximum likelihood
- **MSE** : Mean square error
- **MZM** : Mach-Zehnder modulator
- **MZI** : Mach-Zehnder interferometer
- **MLSE**: Maximum Likelihood Sequence Estimator
- **MZM** : Mach-Zehnder Modulator
- **NRZ**: Non-Return to Zero
- **NRZ-OOK**: Non-Return to Zero On-Off Keying
- **OOK** : On-Off Keying
- **OSNR** : Optical signal to noise ratio
- **PBC** : Polarization beam combiner
- **PBS** : Polarization beam separateur
- **PDM** : Polarization division multiplexed
- **PMD** : Polarization Mode Dispersion
- **PSK** : Phase Shift Keying
- **RZ** : Return-to-zero

## Liste des Tableaux

---

- **SNR** : Signal-to-noise ratio
- **Rx** : Receiver
- **QAM**: Quadrature Amplitude Modulation
- **QPSK**: Quadrature Phase Shift Keying R RIN Relative Intensity
- **Tx** : Transmitter
- **WDM**: Wavelength division multiplexing

## Résumé

Le système de transmission optique d'informations a toujours pris le pas dans sa demande croissante car il s'agit de la ligne de transmission la plus avancée des années précédentes, mais la demande croissante de capacité, qui est un résultat inévitable grâce à la vulgarisation d'Internet et du multimédia, est venu le système de détection optique cohérent, qui s'intéresse à la fréquence et à la phase. Capacité combinée au lieu du système de détection directe, qui ne concerne que la capacité, afin d'augmenter la capacité de transmission et de réduire les coûts de perte d'énergie. Cette note est consacrée à l'étude et à la simulation du système scout cohérent en suivant l'évolution de ce système et son efficacité en créant plusieurs scénarios:

En présence et en l'absence de bruit ,L'effet de la puissance transmise sur le système, Comparaison des systèmes QAM et DPSK

La qualité et l'efficacité de ce système optique ont été contrôlées. Toute détérioration du système conduit à un taux d'erreur BER élevé au détriment de l'ONSR

**Mots clés :** Communications optiques, détection cohérente, fibre optique.

## Abstract

The optical information transmission system has always taken precedence in the increasing demand for it as the most advanced transmission line in previous years, but the increasing demand for capacity, which is an inevitable result thanks to the popularization of the Internet and multimedia, so came the coherent optical detection system that is concerned with frequency and phase Capacity together instead of the direct detection system, which is concerned with capacity only, in order to increase the transmission capacity and reduce the costs of energy loss.

This note is devoted to studying and simulating the coherent Scout system by monitoring the development of this system and its efficiency by creating several scenarios:

In the presence and absence of noise, The effect of the transmitted power on the system, Comparison of QAM and DPSK systems

The quality and efficiency of this optical system has been monitored. Any deterioration of the system leads to a high BER error rate at the expense of ONSR

**Keywords :** Optical communications, coherent detection, optical fiber.

## الملخص

لقد أخذ نظام إرسال المعلومات الضوئي الأسبقية دوماً في الطلب المتزايد عليه باعتبار خط النقل الأكثر تطوراً في السنوات السابقة، لكن الطلب المتزايد على السعة والذي يعتبر نتيجة حتمية بفضل تعميم الإنترنت والوسائط المتعددة، لذلك جاء نظام الكشف الضوئي المتناسك والذي يهتم بالتردد والطور والسعة معاً بدلاً من نظام الكشف المباشر الذي يهتم بالسعة فقط وهذا بهدف زيادة سعة النقل والحد من تكاليف ضياع الطاقة.

خصصت هذه المذكرة لدراسة ومحاكاة النظام الكشفي المتناسك وذلك بمراقبة تطور هذا النظام وكفاءته عبر خلق عدة سيناريوهات:

- في وجود وغياب الضوضاء - تأثير الاستطاعة المرسل على النظام - مقارنة بين نظامي QAM و DPSK

وقد تمت مراقبة جودة هذا النظام الضوئي وكفاءته فأياً تدهور للنظام يؤدي إلى ارتفاع نسبة الخطأ BER .

الكلمات المفتاحية: الاتصالات الضوئية، الكشف المتناسك، الألياف الضوئية.

# **INTRODUCTION GENERALE**

### INTRODUCTION GENERALE

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, les moyens de communication à distance se sont largement développés et évolués grâce aux câbles coaxiaux et aux liaisons hertziennes. Ces câbles coaxiaux remplissaient parfaitement le rôle de support de transmission capable de transmettre des données à un débit atteignant 270 Mbit/s. Cependant, l'apparition de la téléphonie mobile, d'internet, ou encore plus récemment de la visioconférence et de la télévision haute définition, ajoutée à la croissance démographique, résultent en une demande en termes de capacité que les anciens supports de transmission ne peuvent plus supporter.

Le domaine des communications optiques est apparu comme une branche des télécommunications qui étudie comment pour mettre en œuvre correctement un système de transmission basé sur des fibres optiques, il comprend donc comment générer et moduler efficacement des signaux optiques, comment transmettre et comment les recevoir correctement afin de récupérer les informations transmises.

Les systèmes de communication par fibre optique sont nés dans les années 1960 grâce aux inventions des lasers et les applications des fibres de verre, La transmission des données sur fibre optique a révolutionné le monde des télécommunications et a joué un rôle majeur dans l'avènement de l'ère de l'information en offrant des solutions permettant de soutenir l'explosion de la demande en bande passante induite par le développement de l'Internet et de satisfaire la demande croissante en termes de débits.

Les premiers systèmes de transmission commerciaux à fibre optique ont été déployés à la fin des années soixante-dix et ont connu une évolution exponentielle jusqu'à nos jours. Les raisons de l'énorme succès de la transmission par fibre optique sont liées aux éléments suivants : large bande passante, immunité aux interférences électromagnétiques, atténuation réduite, faible coût, dimensions réduites et fiabilité accrue.

Au début, les systèmes utilisent principalement la modulation d'intensité et la détection directe (IMDD). Ces systèmes peuvent être construits avec des composants optiques relativement simples, mais malgré l'important progrès réalisé dans ce système et la simplicité qui l'offre, le bruit reste une problématique majeure dans ces systèmes. Il limite la bande passante des signaux lumineux émis, ainsi que le niveau de détection des récepteurs.

La percée des communications par fibre optique a eu lieu en 1970, lorsque la fibre a été développée avec succès par Corning Glass Works, avec l'atténuation de 20 dB / km, Aujourd'hui, les fibres peuvent transmettre la lumière avec des pertes aussi petites que 0,2 dB/km.

Avec le développement croissant de nouvelles applications et technologies, l'apparition de nouveaux services liés au développement du multimédia et à l'essor de l'Internet, l'évolution des systèmes de télécommunications tend toujours vers une augmentation des capacités de transmission et le besoin d'un débit de transmission d'informations encore plus élevé est apparu.

L'intérêt c'est porté sur la détection cohérente en tant que technologie pour améliorer l'efficacité spectrale et atténuer la transmission par fibre déficiences, Puisque les quatre dimensions du champ optique (amplitude et phase en deux polarisations orthogonales) peuvent être détectées avec un récepteur cohérent.

La détection cohérente a été étudiée pour la première fois comme une méthode pour augmenter la sensibilité des récepteurs optiques.

A cause de sa complexité plus élevée, et le développement des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) les récepteurs cohérents ont été ignorés pendant la prétendue première ère des communications optiques, datée de 1977 à 1997. Retardé de près de 20 ans, jusqu'en 2005, les techniques de transmission cohérentes attiraient les intérêts de recherche à nouveau, puisque les formats de modulation efficaces tels que la modulation par déplacement de phase (PSK) et la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) étaient mis en œuvre en utilisant les récepteurs numériques cohérents. Pendant ce temps, un accès complet aux informations d'onde optique offre la possibilité de compensation électrique pour des dégradations de transmission aussi puissantes que les techniques de compensation optique traditionnelles.

Les systèmes de transmission basés sur la technologie cohérente constituent aujourd'hui les solutions privilégiées pour augmenter la capacité binaire des liaisons optiques. Ces systèmes sont souvent associés à un format de modulation à double polarisation et à modulation de phase en quadrature.

La technologie cohérente est accompagnée de l'utilisation de modules de traitement numérique du signal (DSP) capables de compenser à la fois les effets linéaires tels que la dispersion chromatique (CD), les effets de polarisation telle la dispersion modale de polarisation (PMD) ou encore les fluctuations rapides d'état de polarisation.

La détection cohérente associée au traitement numérique du signal (DSP) a été largement adoptée dans le transport moderne par fibre optique pour les applications longue distance et moyenne portée. Par rapport des systèmes de détection directe, des systèmes de communication cohérents peuvent considérablement améliorer la sensibilité du récepteur et augmenter la capacité de transmission. la demande toujours croissante car une plus grande capacité du réseau de transport nécessite une mise à niveau continue des futurs systèmes de transmission par fibre. Dans un tel contexte, de nouveaux schémas DSP avancés sont nécessaires pour satisfaire les exigences des systèmes de communication optique cohérents de nouvelle génération.

Le présent travail de mémoire, est organisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous débuterons par décrire la description de la fibre optique et les différents types des fibres, Nous aborderons aussi, les différents phénomènes de pertes exercent sur la lumière causée par une fibre optique. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous parlerons de l'application et des avantages de la fibre optique.

Dans le deuxième chapitre on abordera les différents éléments intervenant dans un système de transmission optique à modulation d'intensité et a détection directe IM/DD ainsi que la modulation utilisé pour ce type de système. Nous allons aussi exposer le system à détection cohérente, on va étudier ses blocs (bloc de transmission et réception) nous terminons par donner les différents blocs composant la chaine de DSP et les algorithmes utilisés pour la compensation des dégradations.

Dans le dernier chapitre, nous allons commencer d'abord par la description du logiciel de simulation Matlab, ensuite on va faire l'étude d'une chaine de transmission à base d'un récepteur

cohérent, avec représentation des résultats de simulation qui permette de visualiser les performances atteintes.

Pour juger de la qualité de transmission, on se base sur les critères : taux d'erreur binaire, et diagramme de l'œil et la constellation.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉS SUR**  
**LA FIBRE OPTIQUE**

## I-1 Introduction

Depuis sa première application fructueuse au début des années 1950, la fibre optique a supplanté le câble coaxial dans la plupart des réseaux de télécommunications sur support, tout du moins pour les hauts débits, La fibre optique est vite apparue très intéressante pour le domaine des télécommunications et devenue rapidement incontournable dans les réseaux fixes.

L'objectif de ce premier chapitre est de donner une description générale de la fibre optique et de citer ses différentes caractéristiques ainsi que les différentes pertes qui apparaissent à l'intérieure de fibre pendant l'utilisation dans les liaisons de télécommunication optiques.

## I-2 Structure de la fibre optique

La fibre optique est un guide d'onde cylindrique de verre (en Silice ( $\text{SiO}_2$ )), La fibre est essentiellement constituée d'une partie centrale appelée cœur d'indice de réfraction cœur  $n_1$  entourée d'une autre partie appelée gaine d'indice de réfraction  $n_2$  gaine plus faible.

Le guidage de la lumière n'est possible que si l'indice de réfraction du cœur  $n_1$  est supérieur à l'indice de réfraction la gaine  $n_2$ .

### A- Le cœur

C'est la partie centrale de la fibre qui permet propagation des ondes lumineuses, d'indice de réfraction  $n_1$ .

### B- La gaine

C'est une couche qui entoure le cœur de la fibre avec un indice de réfraction  $n_2$ , généralement inférieur à celui du cœur ce qui permet, la réflexion totale et perpétuelle des modes a l'interface cœur-gaine.

### C- Le revêtement

Une couche de protection mécanique en matière plastique. En effet, la fibre de silice est protégée par un revêtement de quelques dizaines de micromètres, qui l'isole des agents corrosifs du milieu extérieur et lui confère sa très grande flexibilité. Les matériaux le plus souvent utilisés pour ce revêtement protecteur sont des polymères (polyuréthane...)

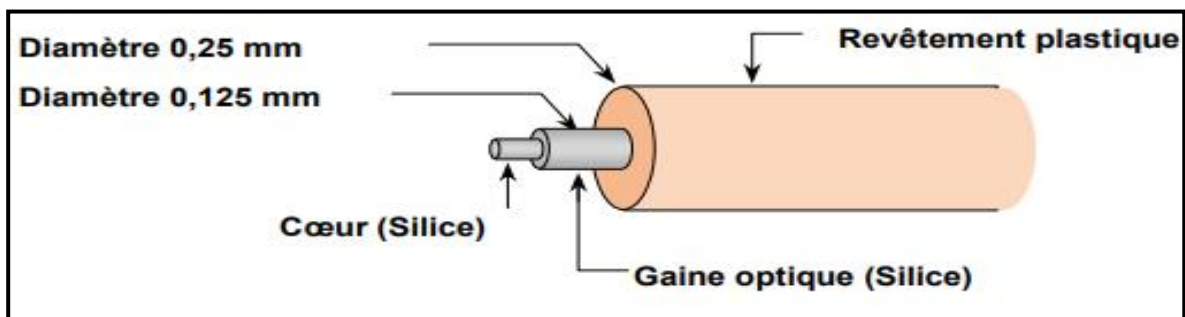


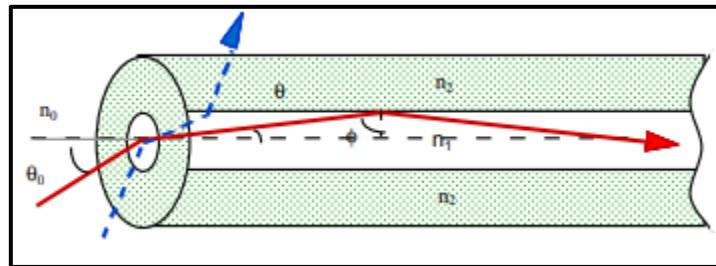
Fig I-1: Structure d'une fibre optique [1]

### I-3 La Propagation dans la fibre optique

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 (fig. I-2).

Cela n'est possible que pour deux conditions :

- La première condition : 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. Cette dernière représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptré cœur-gaine de la fibre.[1]



**Fig I-2: loi de propagation de signal dans la fibre optique[2]**

Tant que le diamètre de la fibre est grand devant la longueur d'onde de la lumière introduite, le principe de propagation obéit aux lois de l'optique géométrique, sans tenir compte de la nature ondulatoire de la lumière.

En revanche, dès que ce diamètre devient de l'ordre de  $\lambda$ , le mode de transmission ressemble à la manière dont se propagent les microondes le long des guides d'ondes. [2]

### I-4 Caractéristique de la fibre optique

#### I-4-1 L'indice de Réfraction

C'est une grandeur caractéristique des propriétés optiques d'un matériau, il est défini par la racine de produit de la permittivité relative avec la perméabilité relative du milieu constituant la fibre optique (cœur, gaine). Avec :

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

#### I-4-2 L'angle d'acceptante

C'est l'angle à l'entrée de la fibre qui détermine le cône d'acceptante dans laquelle les rayons injectés dans soient totalement réfléchis par l'interface cœur gaine. L'angle d'acceptante permet de définir ce qu'on appelle l'ouverture numérique

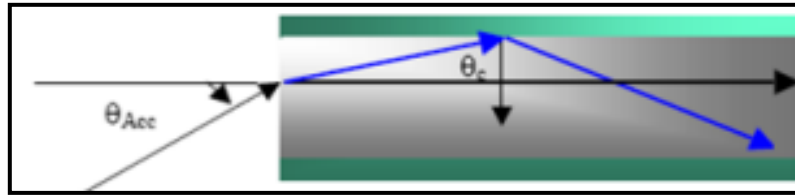


Fig I-3: Angle d'acceptante [2]

**I-4-3 Ouverture Numérique (ON)**

L'angle sur lequel la lumière peut pénétrer dans la fibre pour assurer la propagation. Plus ON est grande plus il est facile d'injecter la lumière dans la fibre, cette ouverture définit par la relation :

$$ON = \sin \theta_{Acc} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

$n_1$ : l'indice de réfraction de cœur

$n_2$ : l'indice de réfraction de la gain

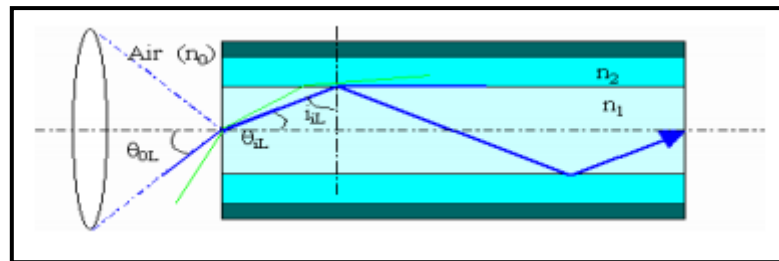


Fig I-4: Ouverture numérique d'une fibre optique [3]

**I-4-4 Longueur d'onde de coupure [3]**

La longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  est celle au-dessus de laquelle la fibre devient monomode. Si la longueur d'onde de propagation est inférieure à  $\lambda_c$  la fibre devient multi - modes.

Elle est définie comme suit dont  $a$  est le rayon du cœur :

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{2.404} a \cdot ON \quad (3)$$

Une fibre est monomode pour une fréquence normalisée  $V$  inférieure à 2,405.

En dessous de  $\lambda_c$  le mode fondamental perd de l'énergie au profit de modes d'ordre supérieur.

**I-4-5 La fréquence normalisée**

La fréquence spatiale normalisée est une quantité sans unité, noté  $v$  qui détermine le régime d'opération et, en particulier, la transition entre un fonctionnement monomodale et Multimodale. La fréquence normalisée est donnée par: [4]

$$V = \left(2\pi \frac{a}{\lambda}\right) [(n_1^2) - (n_2^2)] \quad (4)$$

- Si  $V < 2.405$  un seul mode peut de propager la fibre est monomodale.

- Si  $V > 2.405$  plusieurs modes peuvent de propager, La fibre est multimodale.

L'appellation « fréquence » est liée au fait que, la fréquence est proportionnelle à l'inverse de la longueur d'onde.

**I-4-6 Modes de propagation**

La lumière lorsqu'elle est guide dans la fibre exorbite certains modes, Ce Sont les variations de la lumière en intensité lumineuse, à la fois, à travers la section transversale de la fibre optique et le long de cette fibre.

Le nombre de modes dans une fibre optique dépend de dimensions de la fibre et des indices de réfraction du noyau et de la gaine

- Si  $V < 2.405$  la propagation s'effectuera selon un seul Mode.
- Si  $V > 2.405$  la propagation s'effectuera selon M Mode.

- Pour une fibre à gradient d'indice et profil parabolique :

$$M = \left(\frac{1}{4}\right) V^2 \quad (5)$$

- Pour une fibre à gradient d'indice et profil de paramètres quelconque :

$$M = \left(\frac{\alpha}{\alpha + 2}\right) \left(\frac{1}{2}\right) V^2 \quad (6)$$

**I-4-7 Bande passante**

La bande passante est une des caractéristiques d'un système de transmission, peut être définie comme la largeur de l'intervalle de fréquences utilisables sur un support.

Elle définit la capacité de d'informations que l'on peut transmettre sur une fibre optique.

La bande passante dans la fibre optique dépende de l'effet conjonctif des deux phénomènes de dispersion modale et chromatique et par conséquence elle varie avec la longueur de la fibre car la dispersion est proportionnelle à la longueur de la fibre.

La bande passante est définie par l'expression :

$$BP = \frac{1}{2\sigma_{tot}} \quad (7)$$

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_c^2 + \sigma_m^2 \quad (8)$$

Avec :  $\sigma_c$ ,  $\sigma_m$ : dispersion chromatique, et modale.

$\sigma_{tot}$ : Dispersion total.

**I-5 Différents types de fibre optique**

Les fibres sont classées suivant leurs les dimensions du cœur et les valeurs des indices de réfractions  $n_1$  et  $n_2$ , en deux catégories : [5]

- La fibre ne comporte qu'un mode de propagation, elle est appelée fibre monomode

- La fibre qui comporte plus qu'une mode propagation, elle est appelée fibre Multi-mode

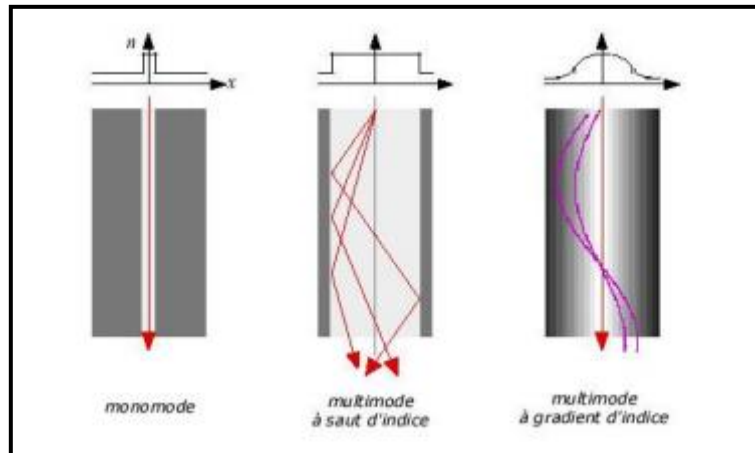


Fig I-5: propagation de lumière dans la fibre optique [4]

I-5-1 Fibre optique Multi Mode

✓ À saut d'indice

Le cœur est homogène et diamètre varie entre 100µm et 200µm, et la gaine varie entre 150µm à 225µm.

Pour ce type de fibre l'indice de réfraction  $n_1$  reste constant dans tout le cœur, puis il décroît dans la gaine effectuant un saut d'indice.

La gaine joue un rôle nécessaire dans la propagation et ne doit pas être confondue avec la protection qui est sur la fibre, ainsi que le rayon est guidé par la réflexion totale au niveau de l'interface cœur- gaine.

$$\text{Avec : } n(r) = \begin{cases} n_1 & \text{si } r < a(\text{cœur}) \\ n_2 & \text{si } r \geq a(\text{gaine}) \end{cases} \quad (9)$$

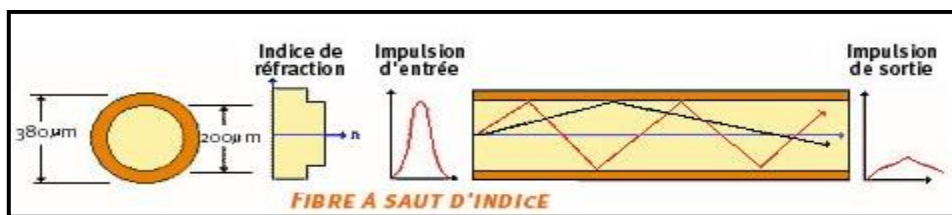


Fig I-6: fibre optique Multi-mode a saut d'indice [4]

✓ À gradient d'indice

Pour ce type de fibre, l'indice de réfraction  $n_1$  du cœur décroît graduellement du centre de la section du cœur jusqu'à la limite de la surface de séparation entre le cœur et la gaine. Le diamètre du cœur est de 50µm et de la gaine est 150µm.

$$\text{Avec : } n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} & \text{si } r < a(\text{cœur}) \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} & \text{si } r \geq a(\text{gaine}) \end{cases} \quad (10)$$

Les rayons suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale et la gaine n'intervient pas directement, mais élimine les rayons trop inclinés.

C'est la fibre la plus courante, utilisée en télécommunications car il offre un avenage de minimiser la dispersion du temps de propagation entre les rayons

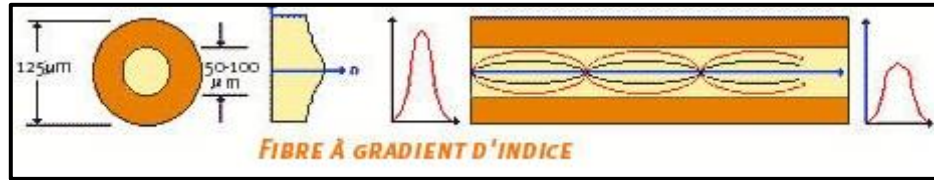


Fig I-7: fibre optique Multi-mode a gradient d'indice [5]

**I-5-2 Fibre optique Monomode**

Dans ce type de fibre, Le diamètre du cœur est inférieur à 10 µm (varie entre 6µm et 8µm), le diamètre de leurs gaines est 125µm.

Un seul mode se propage dans cette fibre (mode fondamental), elles sont largement utilisées pour la transmission de signaux à débit élevée et sur de longues distances grâce à la bande passante la plus large et le niveau de pertes le plus bas et l'absence de dispersion modale.

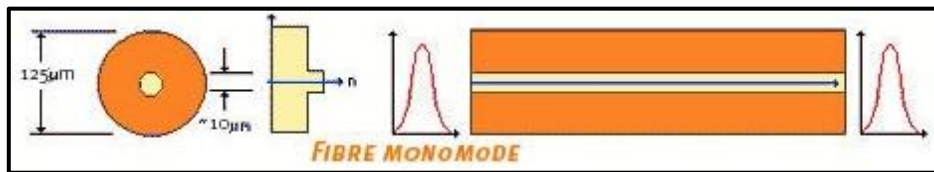


Fig I-8: fibre optique Monomode [5]

**I-6 Les effets linéaires**

Les télécommunications optiques sont toujours confrontées a deux contraintes majeures, qui sont l'atténuation et la dispersion des impulsions optiques

**I-6-1 Atténuation du signal optique dans les fibres optiques**

**A- Définition**

L'atténuation correspond à une diminution de la puissance du signal transmis lors de la propagation dans la fibre optique. Elle s'exprime en décibels (dB).

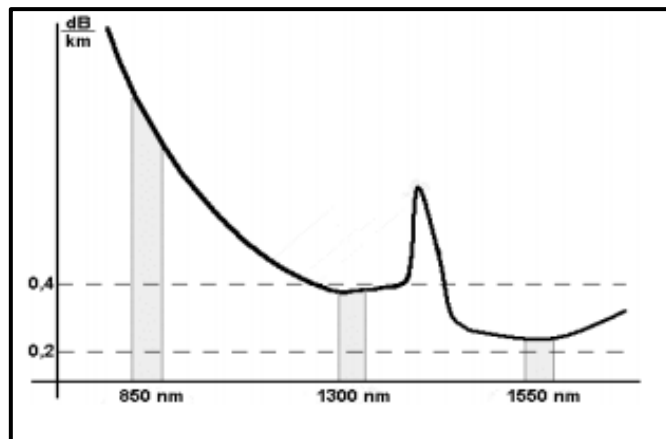
On définit un coefficient d'atténuation  $\alpha$  pour une ligne de transmission de longueur L qui s'exprime en dB/Km [6]

$$P_s = P_0 e^{(-\alpha L)} \text{ Alors } \alpha(\lambda)_{(dB/km)} = -\frac{10}{L} \log\left[\frac{P_s}{P_E}\right] \quad (11)$$

Le coefficient d'atténuation en  $dB \cdot km^{-1}$  est relié au coefficient d'atténuation linéaire par la relation suivante :

$$\alpha_{dB.km^{-1}} = -10 \log_{10} e^{(-\alpha)} = 4.343\alpha \text{ ou } \alpha \text{ est en } km^{-1} \quad (12)$$

L'atténuation de la fibre dépend en particulier de la longueur d'onde des impulsions lumineuses, La Figure I-9 montre l'atténuation spectrale d'une fibre standard en silice, pour les télécommunications.



**Fig I-9: Atténuation spectrale d'une fibre optique [7]**

L'atténuation est un facteur important qui définit la distance de transmission possible entre émetteur et récepteur sans amplificateur. [8]



**Fig I-10: Effet de l'atténuation [7]**

On peut classer les causes de la perte dans la fibre optique sous deux causes (intrinsèques et extrinsèques), qui sont provient principalement de deux phénomènes : l'absorption et la diffusion de la lumière. [9]

### I-6-2 La dispersion

#### A- Définition

La Dispersion au sens large est un étalement ou un élargissement des pulses lumineux lors de leur propagation le long d'une fibre.

La dispersion est un élargissement temporel des impulsions émises, Les impulsions à la sortie de la fibre sont élargies par rapport aux impulsions à l'entrée.

#### B- L'influence de la dispersion

La dispersion est donc un facteur majeur de limitation des performances des systèmes de transmission sur fibre à haut débit, leurs effets manifeste en augmentation de taux d'erreur (donc limitation de la Bande Passante) au niveau du récepteur (une diminution de la sensibilité du récepteur) , Si l'élargissement est trop important, il n'est plus possible de décoder correctement l'information à la sortie et une déformation des impulsions et de l'interférence entre symbole ( une impossibilité de distinguer les 0 des 1 ). [10]

C- Les types de la dispersion :

❖ **Dispersion chromatique (intra modale)** La dispersion chromatique provient d'une variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde l'onde se propageant dans la fibre optique [11], Les différentes composantes spectrales se propagent dans la fibre à des vitesses différentes en fonction de la longueur d'onde qui provoque un élargissement des impulsions optiques (les vitesses de groupe des différents modes ne sont pas égales les unes aux autres), Or les sources de rayonnement lumineux ne sont pas rigoureusement monochromatiques. La dispersion chromatique  $D$ , exprimée usuellement en ps/nm/km, avec:

$$D_{CGM} = \frac{\tau_t}{Ld\lambda} \quad (13)$$

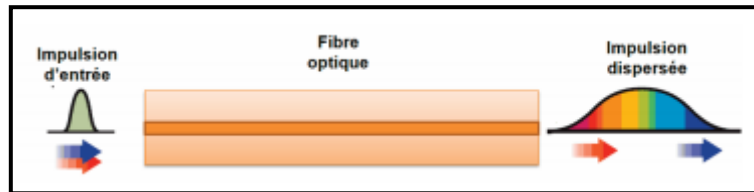


Fig I-11: Les effets de la dispersion chromatique sur une impulsion optique [12]

La dispersion chromatique  $D$  est la combinaison de deux types de dispersion: la dispersion du matériau  $D_m$  et la dispersion du guide d'onde

$$D_g: D = D_m + D_g \quad (14)$$

❖ **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  $\mu\text{m}$  à +25 ps/km/nm à 1,55  $\mu\text{m}$  ; elle s'annule à 1,27  $\mu\text{m}$

À la longueur d'onde d'environ 1300nm, cette la dispersion du matériau est très petite. Elle existe dans toute les types des fibres optiques qu'elle soit monomode ou multi mode.

$$D_{CM} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1(\lambda)}{d\lambda^2} \left( \frac{\text{ps}}{\text{nm}} \cdot \text{km} \right) \quad (15)$$

❖ **La dispersion du guide  $D_g$  :** Cette dispersion est dépendue de la géométrie du guide d'onde, c'est le résultat de la variation de la constante de propagation  $\beta$  avec la fréquence normalisée  $V$  (qui dépend elle-même de la longueur d'onde  $\lambda$ ).

Elle est particulièrement importante pour les fibres monomodes, et toujours négative et dépend des paramètres de la fibre. La dispersion du matériau  $D_m$  est donnée par:

$$D_{CG} = -\frac{n_1 \Delta}{c\lambda} V \frac{d^2 V b}{dV^2} \quad (16)$$

Avec :

$\Delta$ : Différence d'indice

$V$ : Fréquence normalisés

b : La constante de propagation normalisée .

La dispersion modale (dispersion intermodale) :

La Dispersion Modale manifeste dans les fibres Multi Modes, elle est résulté de la répartition de L'énergie lumineuse transmise dans la fibre optique entre les différents modes qui se propage dans le cœur.

- Pour une fibre a saut d'indice :

$$\Delta_{\tau} = L \left( \frac{n_1 \Delta}{c} - \frac{ON^2}{2cn_1} \right) \quad (17)$$

- Pour une fibre a gradient d'indice :

$$\Delta_{\tau} = L \frac{n_1 \Delta^2}{c 8} \quad (18)$$

❖ **Dispersion modale de polarisation (PMD):** Dans le cas d'une fibre optique idéale, il y a une parfaite symétrie pour la section transverse. Dans ce cas, le mode fondamental possède deux polarisations orthogonales (orientations du champ électrique) qui se propagent avec les mêmes caractéristiques : vitesse de phase, vitesse de groupe ...etc. par contre la non symétrie engendre le phénomène de la PMD.

La PMD peut être causée par certains défauts lors de fabrication et par des contraintes mécaniques qui peut subir la fibre lord de l'installation. Tous ces phénomènes induisent de la biréfringence dans la fibre optique. [13]

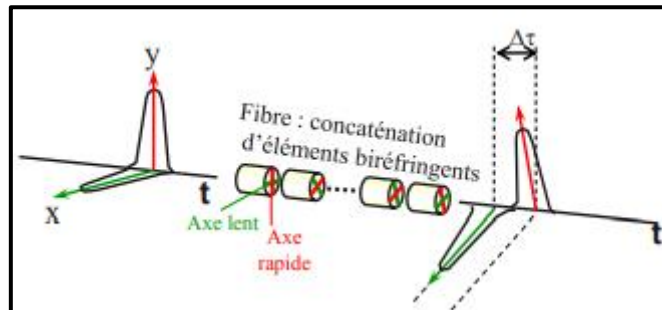


Fig I-12: Schéma de principe décrivant la dispersion de mode de polarisation [14]

La PMD est un phénomène statistique lentement variable dans le temps au gré des perturbations mécaniques et thermiques de l'environnement de la fibre. [15]

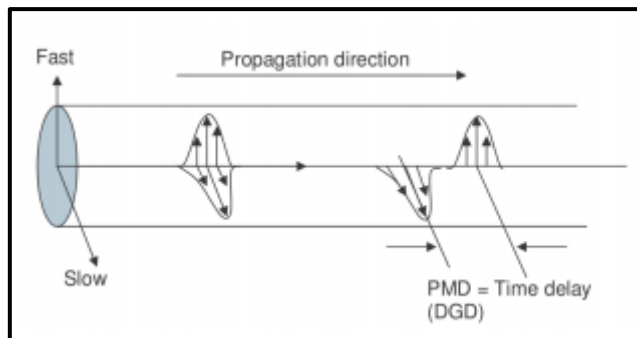


Fig I-13: Principe de PMD due à la biréfringence de la fibre optique [16]

## I-7 Les effets non linéaires

### I-7-1 Définition

La fibre optique est conçue dans l'hypothèse d'une transmission linéaire, mais aux puissances véhiculées élevées, des effets parasites qui dégradent les performances de la fibre apparaissent, c'est le cas des effets non-linéaires. [17]

Ils se manifestent par une distorsion du signal tout au long de la propagation. [18]

Les effets non-linéaires dans les fibres peuvent être divisés en deux catégories (deux mécanismes):

- Le premier, est l'effet Kerr.

Le deuxième mécanisme est l'effet Raman et Brillouin spontanés :

### I-7-2 L'effet Kerr :

L'effet Kerr en optique géométrique est une extension des lois de réfraction de la lumière lors de la propagation de cette lumière dans des milieux d'indices variables.

dû à la variation de l'indice de réfraction de la silice en fonction de, l'intensité optique de l'onde optique porteuse de l'information . [19].

Cet effet prend une importance considérable dans l'industrie des télécommunications [20]

#### I-7-2-1 Auto-modulation de phase (SPM: self-phase modulation):

La variation de l'indice de réfraction en fonction, de la puissance injectée dans la fibre, induit une modulation de phase parasite. En présence de la dispersion chromatique l'impulsion optique subit un élargissement temporel qui croît avec la distance de transmission et donc la création d'interférences entre symboles. [21]

Cette l'auto-modulation de phase se traduit par une modulation de fréquence parasite avec augmentation de la fréquence instantanée à l'avant de l'impulsion et une diminution à l'arrière de l'impulsion. [22]

#### I-7-2-2 Modulation de phase croisée (XPM : cross-phase modulation).

Dans un système WDM, lors de propagation de signal dans un canal, les impulsions transportées dans les canaux voisins subissent une modulation de phase et se retrouvent, après croisement, affectées d'un déphasage proportionnel à la puissance du signal interférant.

L'effet XPM intervient quand il y a au moins deux ondes de fréquences différentes qui se propagent simultanément dans la fibre (les signaux des canaux adjacents). Par définition, c'est la variation non linéaire de la phase du champ électrique d'une des ondes sous l'effet du champ électrique de l'autre, et non pas du fait de la présence du signal lui-même. Sous la présence de l'effet de la dispersion chromatique, la XPM provoque un élargissement spectral ainsi qu'un décalage de l'instant d'arrivée des impulsions en fonction des données du canal perturbateur.

Généralement l'effet de la XPM augmente avec la diminution de l'espacement entre les canaux du système WDM. [23]

**I-7-2-3 Mélange à quatre ondes (FWM : four-wavemixing)**

C'est une autre conséquence des effets Kerr se produisant entre différentes composantes d'un signal WDM.

La FWM se traduit par la création d'une nouvelle onde, cette onde due à une interaction non-linéaire entre trois ondes de fréquences centrales  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  et  $\omega_3$  se propagent dans une fibre,

$$\text{Avec } \omega_4 = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 \text{ or } \omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3. [24]$$

**I-7-3 Les effets de la diffusion stimulée**

Ils sont causés par l'interaction paramétrique entre la lumière et les matériaux. Il y a deux types de diffusion stimulée:

**I-7-3-1 La diffusion Raman stimulée (SRS )**

Ces phénomènes résultent de l'interaction d'un photon avec un phonon optique, c'est-à-dire d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau, lorsque les photons incidents traversent le matériau.

**I-7-3-2 La diffusion Brillouin stimulée (SBS)**

Il s'agit d'une agitation thermique qui subisse les molécules constituant le milieu, qui engendre un petit déplacement des molécules de leur position d'équilibre, et par conséquence modification de l'indice de réfraction du milieu, ce phénomène résulte la diffusion de l'onde qui se propageant dans toutes les directions,

**I-8 Les avantages et les inconvénients de la fibre optique****I-8-1 Les avantages**

- Transmission large bande(Bande passante très grande) :

Ce qui permet l'envoi de débits binaires élevés, allant jusqu'à 40 Gbps par canal de transmission (de fois peut transmettre des signaux digitaux à Tb/s sur des longues distances). (1 Tb/s =  $10^{12}$  bit/seconde). [25]

- Capacité élevée :

Le multiplexage en longueur d'onde (WDM), donne la possibilité d'utiliser des nombreux signaux et de nombreux utilisateurs.

- Affaiblissement minimisé :

Très faible pertes, En fonction du type de fibre, l'atténuation du signal peut atteindre environ 0,2 dB/km pour une longueur d'onde de 1,55 $\mu$ m et d'environ 0.35 dB/km à 1,3  $\mu$ m Le nombre de répéteurs très réduits et fortement espacés (60 km). [26]

- Immunité aux interférences externes et au bruits :

La fibre présente une faible sensibilité aux facteurs extérieurs (température, humidité, les interférences Electromagnétiques et radio fréquences, la diaphonie , perturbations électromagnétiques ...).

- Faible encombrement et faible poids:

Son poids très faible et dimensions réduites donnent un avantage lors de l'installation par rapport à un câble en cuivre.

- Isolation électrique :

La fibre fabriquée à partir de la silice, qui est un matériau diélectrique parfait, lui confère une grande isolation électrique, le contact accidentel entre deux fibres ne provoque pas de court-circuit et donc pas de dégâts à l'électronique associée (risque de d'étincelle). Les fibres optiques peuvent donc être installées sans risque dans les atmosphères inflammables. [27]

### **I-8-2 Les inconvénients :**

Comme elle a des avantages, la fibre présente aussi des inconvénients qui sont peut-être résumés comme suit:

- La fragilité de la fibre optique présente un facteur très gênant lors de l'installation (pose, le tirage, le soudage et le raccordement des câbles en fibres optiques).

### **I-9 Conclusion**

Dans ce chapitre on a vu les différentes caractéristiques de la fibre optique ainsi que ses différentes classes. On a décrit les événements qui régissent sur la propagation de la lumière et on a présenté les phénomènes qui influent sur la transmission de la lumière lors de la propagation dans la fibre optique tel que : la dispersion chromatique et la PMD et les effets non linéaires

**CHAPITRE II**  
**ARCHITECTURE DE SYSTEME**  
**DE COMMUNICATION**  
**OPTIQUE**

### II-1 Introduction

Le but des systèmes de communication à fibre optique est de rassembler et véhiculer les informations envoyées par un émetteur vers un récepteur au moyen d'une liaison de transmission optique avec une bonne qualité .

De nombreux systèmes de communication optique différents existent en fonction de leur extension géographique, la modulation utilisée et de type de détection utilisée, comme le système a modulation d'intensité/détection directe et le système a détection cohérente, qui sont les plus utilisés dans la communication par fibre optique .

Dans ce chapitre nous allons présenter l'architecture de deux systèmes. Nous débutons comme première partie par la description d'un système de transmission classique par fibre à base d'une modulation d'intensité et à détection directe (IM/DD) ainsi que les différentes techniques de modulation employées en systèmes IM/DD.

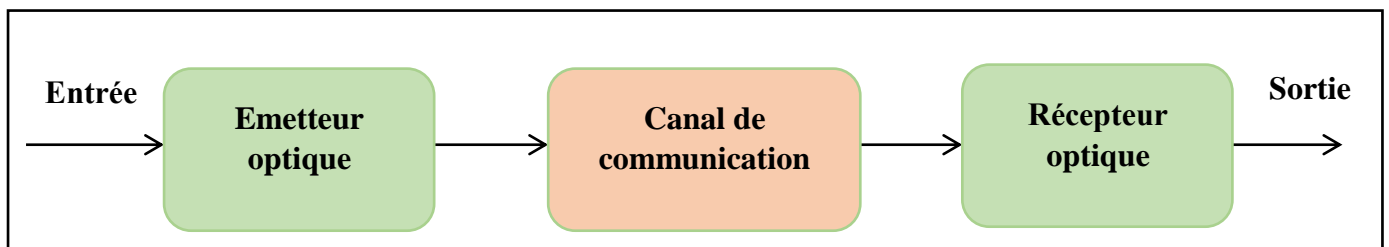
Dans la deuxième partie du chapitre, nous allons présenter le système de communication optique a détection cohérente, ainsi l'utilisation de la DSP a la réception.

### II-2 Structure generale d'un système de communication optique

Une liaison optique a pour objectif de véhiculer un trafic de données (séquence de bits binaires) sous forme d'un signal optique d'un point source (émetteur optique) à un point destination (récepteur optique), séparés d'une distance (fibre optique) de l'ordre de centaine de kilomètres.

Une liaison à fibre optique se décompose en trois parties :

- 1- Une source optique (laser) pour générer le signal optique qui va être utiliser comme porteuse de signaux numériques à transmettre.
- 2- Une fibre optique qui sert comme moyen de transmission équipée des amplificateurs optiques situés sur la ligne de transmission pour régénérer le signal.
- 3- Un récepteur optique pour récupérer les données optiques et les convertis en signaux électriques. [28]



**Fig II-1: Schéma synoptique d'une liaison optique [28]**

Les systèmes de communication par fibres optiques peuvent être classés en deux catégories long-courriers (long-haul) et court-courriers (short-haul), et par conséquent, On distingue trois grandes catégories :

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

- Les réseaux métropolitains (Métropolitain Area Network = MAN)
- Les réseaux locaux (Local Area Network = LAN)

### II-3 Système de communication optique a modulation d'intensité /détection direct ( IM/DD)

Comme dans tous les systèmes des communications, la chaine de communication est constituée d'un émetteur, un récepteur et un canal.

Le premier système de transmission commerciale à fibre optique ont été déployés à la fin des années soixante-dix et ils ont connu une évolution exponentielle jusqu'à la présent. Les raisons de l'énorme succès de la transmission par fibre optique à voir avec les éléments suivants : large bande passante, immunité aux électromagnétiques interférence, atténuation réduite, faible coût, réduit dimensions et une plus grande fiabilité. [28]

En systèmes optiques IM/DD, l'information est transmise en faisant varier l'intensité du courant alimentant par la source optique. Après être envoyé dans la fibre, le signal est directement détecté par un récepteur optique qui le convertit en courant électrique à travers un processus de détection quadratique.

Ce pourquoi la modulation IM/DD est la méthode la plus naturelle et simple pour transmettre de l'information électrique sur un support optique.

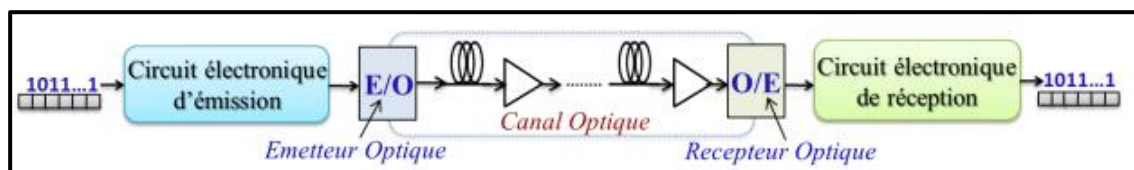


Fig II- 2: Schéma d'un système classique de transmission optique sur fibre [28]

#### II-3-1 Eléments de base des systèmes optiques IM/DD

Le système a modulation directe /détection directe est constitué de:

##### II-3-1-1 Bloc d'émission

Pour une liaison optique, la parité émission a pour rôle de délivrer à la fibre optique un signal sur lequel, les données sont inscrites.

Elle comprend de divers éléments : laser (source lumineuse) et un système de modulation.

Les données à transmettre sont converties d'un signal électrique en signal optique grâce à un émetteur.

##### II-3-1-1-1 Sources optiques

Les sources optiques les plus utilisés dans la télécommunication optique sont les sources à semi-conducteurs à cause de leurs avantages tel que : [29]

- spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique
- leurs petites dimensions par rapport à celles du cœur des fibres optiques
- facilité à moduler directement la lumière aux fréquences élevées.

Deux types de sources lumineuses sont couramment utilisées : les diodes électroluminescentes (LED) et les diodes lasers.

### ✓ **Diode LED (Light Emission Diode) [30]**

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

Pour la communication de données à bas débit (jusqu'à 200 Mb/s), les LED (diodes électroluminescentes) trouvent aussi une application en tant que sources optiques.

### ✓ **Laser**

#### **A- Définition :**

Le mot laser signifie: (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), c.à.d. amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement. Il a été pressenti en 1917 par Einstein et inventé en 1960 par Maiman.

#### **B- Principe de fonctionnement de laser :**

En systèmes IM/DD, deux sources optiques sont principalement utilisées :

Il s'agit des lasers DFB (Distributed Feed Back laser) et VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting laser).

La différence entre ces deux lasers se situe notamment au niveau de leurs zones linéaires de fonctionnement.

### **II-3-1-1-2 Le modulateur**

La modulation du signal au sein de système optique permet de générer l'information binaire à partir d'un signal physique et de traduire l'information binaire en niveau de puissance du signal lumineux, à fin de garantir une qualité de transmission respectant les normes et les performances en terme de distance, de puissance et de débit. [31]

Deux techniques de modulations sont généralement utilisées dans les systèmes de communication optique simples:

#### **A- Modulation directe : (modulation d'amplitude)**

La modulation directe est une technique simple et très peu coûteuse et offre une simplicité de mise en œuvre. Elle Consiste à moduler directement l'intensité de la lumière émise par la diode laser en fonction de la variation du courant d'alimentation du laser contenant de l'information (direct modulated lasers (DML)).

Dans ce cas, le laser se comporte comme un interrupteur, s'allumant pour transmettre un bit « 1 » et s'éteignant pour transmettre un bit « 0 ».

Cela fournit une méthode simple et efficace de transférer des données dans le domaine optique et simplifie la structure de l'émetteur.

L'inconvénient de cette modulation est que la modulation d'amplitude obtenue par une modulation du courant d'alimentation s'accompagne d'une modulation parasite de fréquence due au chirp.

Le chirp Combiné à la dispersion chromatique de fibre peut entraîner un élargissement temporel des impulsions et par conséquent une dégradation de performances de système de télécommunication (limitation de débit maximal des données à transmettre).

Cette technique est très inefficace au-dessus de 2.5Gb/s, C'est ainsi que, dans les systèmes de communication à débit supérieur à 2.5 Gb/s, on a recours à la modulation externe. [32]

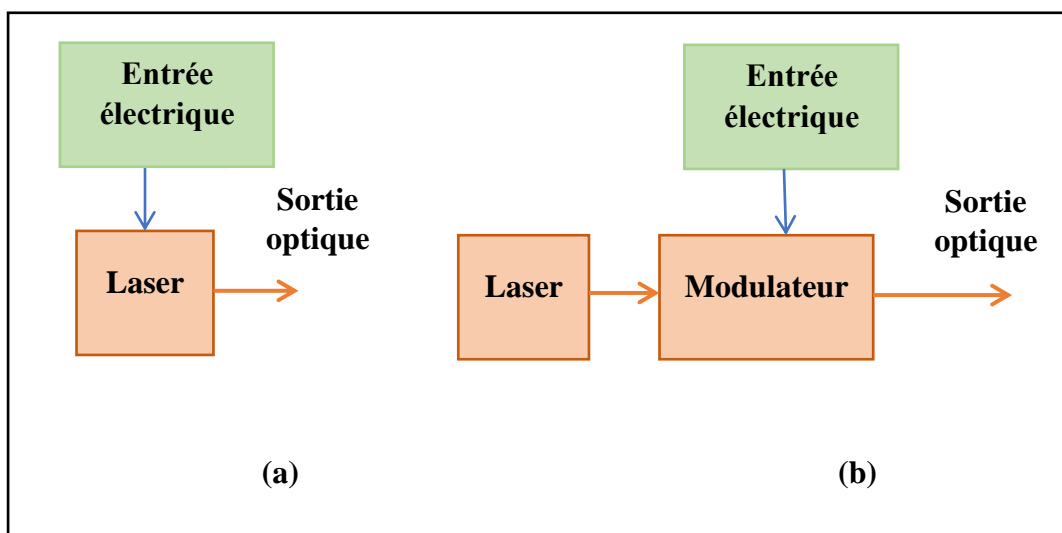
### B- Modulation externe

Pour La modulation externe les données sont imprimées sur le signal optique continu issu du laser.

Cette modulation est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux a la sortie du laser à l'aide d'un dispositif externe (modulateur MEA ou MZM). Le courant d'injection du laser n'est plus modulé.

L'avantage d'utiliser un modulateur externe est d'augmenter la distance de liaison maximale, car l'effet de chirp du laser est éliminé. [33]

Dans le cas de la modulation externe, divers types de modulation sont possibles : modulation d'amplitude, de phase et de polarisation, d'impulsion. De plus, la bande passante des modulateurs externes est beaucoup plus élevée (80 GHz) que celle d'une modulation directe (15 GHz) qui est limitée par la fréquence de relaxation des diodes laser. [34]



**Fig II- 3: Schéma de l'émetteur optique avec (a) une modulation directe et (b) une modulation externe [34]**

La modulation externe peut être réalisée par deux types de modulateurs : les modulateurs à électro-absorption ou les modulateurs électro-optiques (Mach-Zehnder).

### C- Le modulateur électro absorbant (MEA)

Le modulateur EAM est un guide d'ondes planaire à base de semi-conducteurs. Il est composé d'une superposition d'une couche dopée p et d'une couche dopée n, formant une jonction p-n.

Le principe de fonctionnement de modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur soumis à un champ électrique. Cet effet est connu sous le nom d'effet Franz-Keldysh dans un matériau massif et d'effet Stark confiné dans un matériau quantique.

Une augmentation du champ électrique translate le bord d'absorption vers les grandes longueurs d'onde et de ce fait, augmente l'absorption de la lumière traversant le semi-conducteur.

Une caractéristique particulièrement intéressante des modulateurs à électro-absorption est qu'ils peuvent être facilement intégrés avec les diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation, [35] mais contrairement au modulateur de Mach-Zehnder, les modulateurs à électro-absorption génèrent de plus grandes pertes d'insertion.

A noter qu'il y a un autre type de modulateur externe qui est le modulateur "Mach-Zehnder", qui va être étudié ultérieurement dans le système cohérent.

#### II-3-1-1-3 Le circuit de commande

Tout comme pour le laser, les niveaux des données électriques émises nécessitent une adaptation pour les rendre compatibles avec ceux acceptables par le modulateur employé. Il est donc nécessaire d'utiliser un driver de modulateur.

Le modulateur électro-absorbant est transparent lorsqu'il reçoit une tension nulle et absorbant pour une tension négative.

Le circuit de commande du modulateur va alors forcer le niveau haut des données à 0 Volt et le niveau bas à une valeur choisie selon l'extinction souhaitée. [36]

#### II-3-1-1-4 Différents formats de modulation utilisés dans le système IM/DD

Dans les systèmes de communications optiques classiques à longue distance, les formats de modulation les plus utilisés sont les formats à modulation d'amplitude du signal. Ces formats de modulation ont été conçus pour limiter les effets de diaphonie (multiplexage de longueur d'onde) et pour incrémenter la capacité de transmission. Celui-ci consiste en une modulation d'intensité en « tout-ou-rien » de la porteuse optique à l'émission dit "OOK" (On-Off Keying), c'est-à-dire ce codage se fait par absence/présence d'intensité lumineuse, associée à une détection d'enveloppe par une photodiode à la réception.

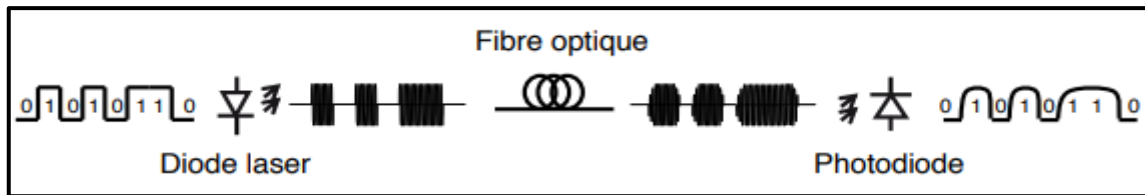


Fig II- 4: Principe d'une transmission sur fibre optique par modulation d'intensité et détection directe. [37]

### II-3-1-1-4-1 Modulation OOK (On-Off Keying)

La modulation OOK est la modulation la plus simple parmi les différentes techniques de modulation pour les communications optiques. Les données binaires sont représentées par la présence ou l'absence d'une impulsion lumineuse dans chaque intervalle de temps de durée  $T_s$  secondes.

Selon la règle, si le bit d'information est " 1 ", une impulsion lumineuse laser sera transmise, et sinon aucune information ne sera transmise.

On distingue deux principaux formats (techniques) de modulation OOK les plus utilisés dans le domaine optique, suivant la forme d'impulsion utilise, les formats sont: formats de type RZ et NRZ, connus par l'acronyme OOK=On-off keying.

#### A- Modulation OOK-NRZ (OOK Non Return to Zero)

Le signal optique modulé en NRZ possède généralement deux états: l'état (haut-1) qui se traduit par le maximum d'intensité du signal optique, et l'état (bas-0) qui se traduit par le minimum d'intensité du signal.

#### B- Modulation OOK-RZ (OOK Return to Zero)

La durée de cette impulsion est une fraction du temps bit. C'est à dire une impulsion qui correspond à un maximum d'intensité s'étend sur une durée inférieure au temps bit. Elle revient donc au niveau bas entre deux bits successifs.

La figure II-6 montre la différence entre format de modulation RZ-OOK et NRZ-OOK, mettant en évidence la trace temporelle.

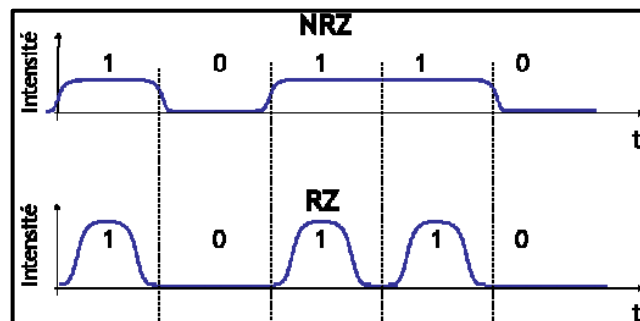


Fig II- 5: Représentation de l'intensité d'un signal optique NRZ (haut) et RZ (bas) en fonction du temps. [38]

La modulation IM/DD présente l'avantage d'être simple et peu coûteuse en comparaison avec les autres solutions comme par exemple, les transmissions cohérentes. Cet avantage de la modulation IM/DD est justifié par le fait que seule, l'amplitude du signal lumineux est détectée.

Cependant, la technique de modulation d'intensité et de détection directe a aussi des inconvénients. Il s'agit des limitations dues à la dispersion chromatique de la fibre associée au chirp des sources optiques, et donc dégradation de performance de transmission. Cette dégradation résulterait du mélange des deux bandes latérales avec la porteuse optique détectée en sortie par le récepteur optique. [39]

### II-3-1-2 Bloc de réception

Le bloc de réception a pour rôle de convertir au mieux le signal optique en signal électrique c.à.d. de récupérer la séquence binaire sous forme électrique. Ce bloc se compose généralement de trois parties :

1<sup>er</sup> étage : est composé de photo détecteur, accompagné d'un préamplificateur, pour but de rendre le photo courant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photo détecteur.

2<sup>ème</sup> étage: est composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre réducteur de bruit.

3<sup>ème</sup> étage : pour la récupération des données, se compose de circuit de décision et un circuit de récupération de rythme (circuit de synchronisation).

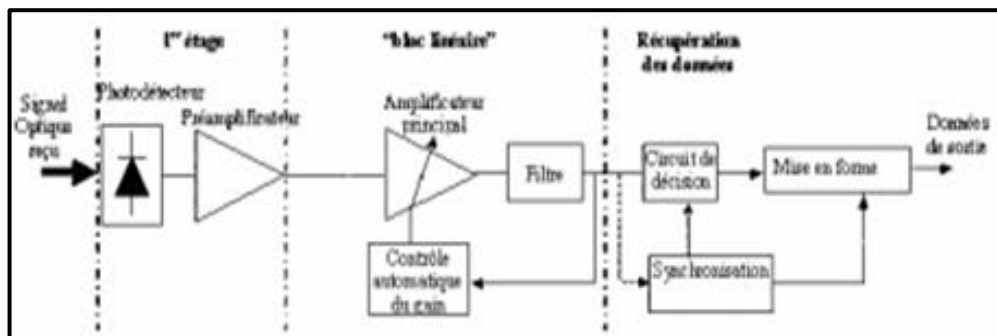


Fig II- 6: Schéma d'un récepteur optique a détection directe [40]

#### II-3-2-2-1 Le photo détecteur:

Le photo détecteur est l'élément le plus essentiel dans la chaîne de réception, il fait la convection de signal optique provient de la fibre en un courant électrique qui sera ensuite traiter afin de extraire les données binaires transmises.

Deux types des photodiodes le plus utilisées dans la chaîne de détection sont les photodiodes à semi-conducteurs PIN et APD car ils présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser et ils ont une bande passante électrique allant supérieure à 60 GHz et couvrent toutes les fenêtres de longueurs d'onde.

### A- Principe de fonctionnement de la photo-détection

La photodiode est un composant à base de matériaux semi-conducteurs. Dans son principe, les photons qu'elle reçoit, est absorbée en favorisant des transitions des électrons de la bande de valence du semi-conducteur vers sa bande de conduction. [41]

### B- Caractéristiques de photo détecteur

Un photo détecteur est caractérisé par:

- ✓ Le coefficient d'absorption  $\alpha$  : il détermine le rendement du photo détecteur, il dépend du matériau utilisé et de la longueur d'onde.
- ✓ Le rendement quantique  $\eta$ : qui est le rapport du nombre de paires de porteurs « photocréées et collectées » au nombre de photons incidents. Il ne peut être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante ;
- ✓ La sensibilité  $S$ : définissant le rapport du photo courant  $I_{ph}$  au flux énergétique (ou puissance optique  $P_{opt}$ ) reçu, exprimée en Ampère par Watt (A/W).

#### II-3-2-2-2 la photodiode PIN

Un photo détecteur PIN est composé de trois zones, où l'absorbant est une zone intrinsèque comprise en sandwich entre deux zones transparentes dopées respectivement N et P

La photodiode est utilisée dans un montage en polarisation inverse. L'absorption de photons dans cette zone génère des paires électron-trou qui sont séparées sous l'effet du champ électrique: les électrons transitent vers la zone dopée N et les trous vers la zone dopée P. [42]

La photodiode PIN est plus stable que l'APD en présence des fluctuations de température et de la tension appliquée.

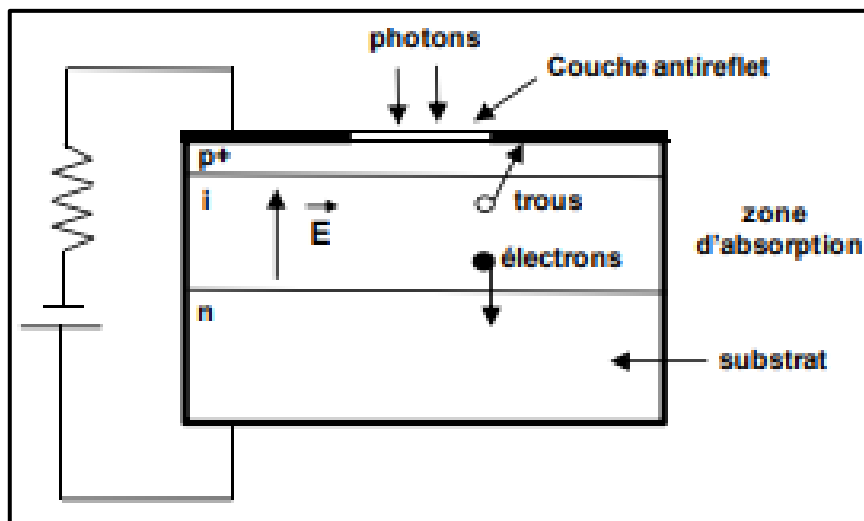


Fig II- 7: Structure de base d'une photodiode PIN. [43]

#### II-3-2-2-3 Le photo détecteur à avalanche (APD) [44]

Dans le cas de photo détecteur à avalanche, Une couche supplémentaire est ajoutée à la photodiode PIN qui fournit un gain grâce à la multiplication par effet d'avalanche des paires

électron-trou générées dans cette couche. Le gain APD est appelé gain d'avalanche, le gain de l'APD est supérieur à celui de la photodiode PIN.

### II-3-2-2-4 Le préamplificateur

Le préamplificateur est situé souvent après le photo-détecteur pour minimiser le bruit et les distorsions sur les signaux. Ces deux blocs sont souvent réunis dans un même boîtier. L'association d'une photodiode et d'un TIA permet d'obtenir simultanément une grande bande passante et un bruit faible.

Deux types de préamplificateurs:

- ✓ L'amplificateur à haute impédance d'entrée.
- ✓ L'amplificateur transimpédance (TIA).

### II-3-2-2-5 Amplificateur électrique

Les amplificateurs sont utilisés dans une ligne de transmission optique sous trois manières différentes:

- ✓ Booster: amplificateur de puissance à l'émission.
- ✓ Amplificateur en ligne.
- ✓ Préamplificateur de réception

Pour le cas de récepteur, malgré la présence d'un préamplificateur à la sortie de photodiode de réception le courant émis par la photodiode, reste souvent assez faible. Il est donc nécessaire d'utiliser un amplificateur à la sortie du photorécepteur. Le gain adéquat peut être assez élevé. En effet, du fait de la détection quadratique, il faut 2 dB électriques pour compenser 1 dB optique.[45].

### II-3-2-2-6 Circuit de filtrage

A la sortie de récepteur optique (photodiode et l'amplificateur électrique), le photocourant généré comprend non seulement le signal reçu, mais aussi le bruit généré par la photodiode (bruit de grenaille et bruit thermique), d'où vient la nécessité de filtrage électrique pour éliminer ce le bruit.

Il faut filtrer le signal numérique dans une bande  $0 - \Delta F$  qui soit le plus petit possible, tout en ne créant pas d'interférences inter symboles (IES), c.-à-d. la réponse du filtre à un symbole s'annule à tous les instants de décision sur les symboles voisins. [46]

### II-3-2-2-7 Le Circuit de décision

Le bloc de décision a pour but d'assurer la mise en forme du signal détecté, ce bloc est constitué d'un détecteur à seuil et d'un circuit de récupération de rythme (circuit de synchronisation).

Le signal reçu est comparé au seuil de décision S'il est supérieur, alors un niveau haut sera détecté et établi, sinon, ce sera un niveau bas.

L'horloge doit être synchronisée sur le signal incident. Cette récupération de rythme est effectuée grâce à une boucle à verrouillage de phase classique. [47]

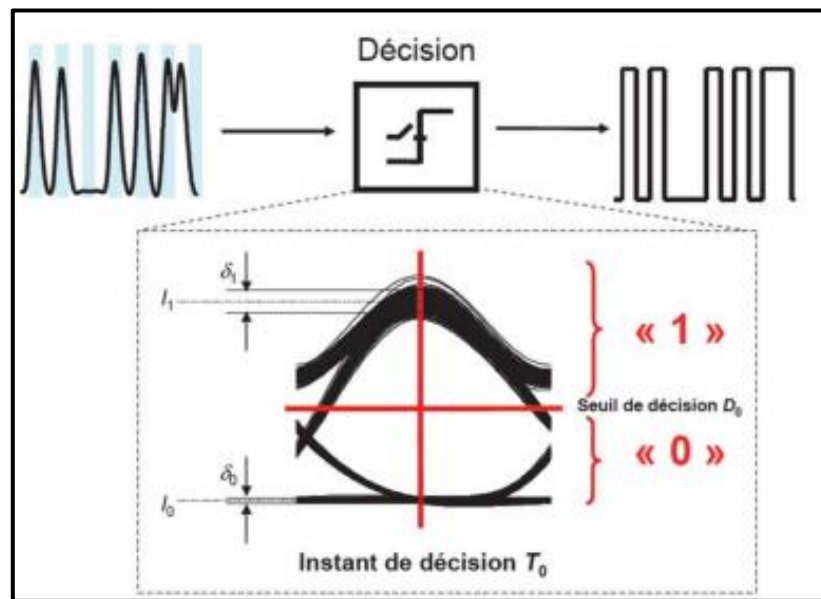


Fig II- 8: Principe de la décision basé sur le diagramme de l'œil [48]

### II-4 Système de communication optique a détection cohérente et utilisation de DSP

Pour satisfaire la demande d'augmentation des débits dans les systèmes de transmission sur fibre optique, d'autres systèmes de communications sophistiqué ont été conçus.

Les systèmes à détections cohérentes sont au cœur de la nouvelle génération de systèmes de transmission sur fibre. Ces systèmes utilisent des formats de modulation à grande efficacité spectrale et sont très robustes à la propagation sur le canal de transmission optique.

Ils offrent ainsi aux opérateurs de télécommunications les moyens de décupler la capacité de leurs réseaux de transport tout en conservant leurs infrastructures fibre existantes.

#### II-4-1 Eléments de base de système optique cohérent

Comme pour le system IM/DD, le système optique cohérent constitue d'un émetteur et un récepteur cohérent.

##### II-4-1-1 Transmetteur cohérent

Le transmetteur cohérent est responsable sur l'encodage de bits d'informations, l'exécution de mapping de bits vers des symboles de format de modulation donnée et de moduler la porteuse optique qui va être transmettre par la fibre optique.

L'émetteur module le flux binaire entrant en phase et en amplitude d'une onde porteuse optique selon un format de modulation donné.

Il est généralement constitué de blocs: Bloc de DSP (pré-traitement numérique de signal) et Bloc optique (bloc de modulation)

La figure montre le schéma général d'un émetteur optique DSP utilisant la diversité de polarisation.

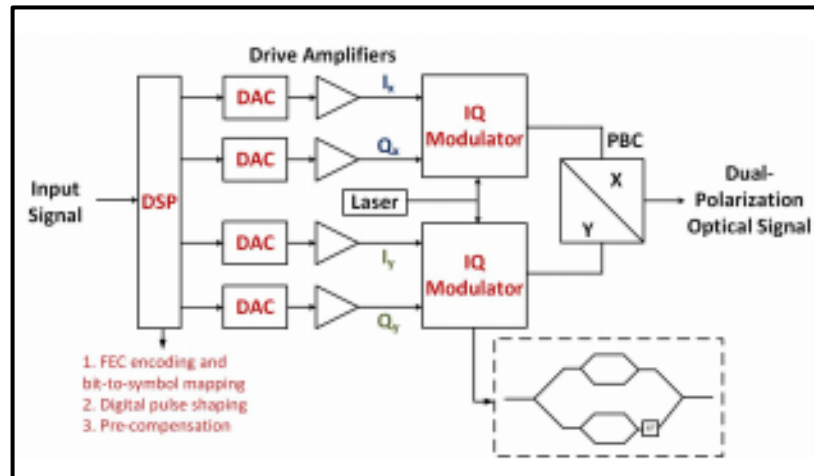


Fig II- 9: Block diagramme de transmetteur optique cohérent [49]

### II-4-1-1-1 Bloc de traitement de signal (DSP)

Le flux binaire entrant est transmis au module DSP où différentes routines peuvent être appliquées telles que le codage et Forward Error Correction (FEC), Mappage bit à symbole, la mise en forme d'impulsion de Nyquist et la pré-distorsion / pré-compensation du signal, ...etc.

Le codage FEC est appliqué au flux binaire de données entrant afin de protéger les bits d'information contre le bruit du canal. C'est-à-dire un sur débit (surcharge) de codage FEC aux données transmises afin de permettre la détection et la correction des erreurs de données. Le codage et le décodage FEC sont largement déployés dans des systèmes cohérents avancés pour améliorer les performances du système en réduisant le taux d'erreur sur les bits (BER) post-FEC à des niveaux acceptables. [50]

Le filtre de mise en forme d'impulsions (Pulse shaping) détermine donc le spectre de la transmission. Les filtres de mise en forme d'impulsions doivent satisfaire à certains critères afin que le filtre lui-même n'introduise pas d'ISI.

Une fois qu'un format de modulation a été sélectionné, il est nécessaire de décider comment mapper bits d'information sur l'espace du signal. En veillant à ce que la constellation adjacente

Les points dans l'espace du signal ont également une distance de Hamming binaire minimale.

La combinaison du codeur FEC et du mappageur bit à symbole fournit quatre flux parallèles de séquences de symboles réels tirées de l'espace de constellation complexe souhaité pour deux polarisations x et y.

Le code le plus connu pour cette application est le code Gray binaire. [51]

Pour la compensation des dégradations de propagation, Comme il est connu, la propagation de signal a travers la fibre optique subisse des différentes dégradations tel que la dispersion chromatique, PMD, les effets non linéaires.

Des algorithmes DSP qui compensent les dégradations de transmission attendues (pré-compensation) peuvent être mis en œuvre au niveau de l'émetteur, le récepteur (post-compensation) ou divisé entre les deux côtés.

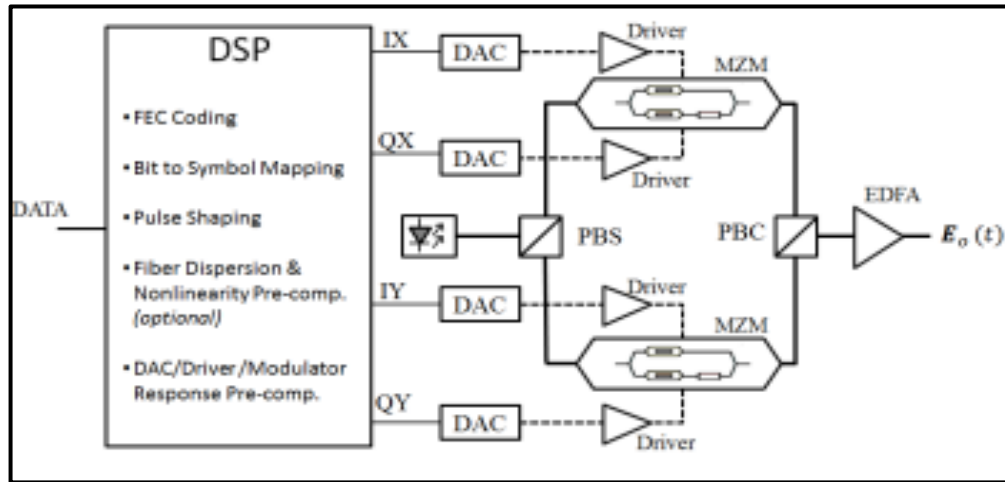


Fig II- 10: Transmetteur optique cohérent avec le bloc DSP [52]

### II-4-1-1-2 Bloc de optique (Modulation optique)

Les échantillons de valeur complexes suivant le bloc DSP sont séparés en quatre affluents afin d'être module en in phase et en quadrature de composant de la porteuse optique en x et y polarisation.

Les DAC recréent les signaux analogiques qui pilotent une paire de modulateurs Mach Zehnder (MZM) selon un format de modulation donné.

Ces signaux sont interfacés avec deux modulateurs IQ Mach-Zehnder (MZM). Chaque modulateur effectue la conversion électrique à optique pour les composantes en phase et en quadrature d'une polarisation.

Les champs modulés polarisés sont ensuite combinés au moyen d'un combineur de faisceaux de polarisation (PBC pour polarization beam combiner)

Le signal optique de sortie est souvent amplifié par un EDFA au niveau souhaité avant le lancement dans la fibre. [53]

Ces signaux sont utilisés dans une boucle de rétroaction pour garantir que la polarisation MZM est maintenue autour du point de fonctionnement souhaité. Habituellement, le point de polarisation souhaité pour une modulation cohérente est le point de puissance nul du MZM.

### II-4-1-2 Les Modulateurs

#### II-4-1-2-1 Le Modulateur Mach-Zehnder (MZM)

Les modulateurs de Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques que l'on place directement en sortie du laser. Ils sont fréquemment utilisés pour les applications de télécommunication large bande et à haut débit.

Les effets électro-optiques sont la base de ces types de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique variant selon la modulation des données

Dans la plupart des cas, le matériel utilisé est le Niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ). [54]

Le principe de cet interféromètre est basé sur la génération d'une interférence entre deux ondes lumineuses par la division de la lumière issue du laser en deux parties égales dans les deux bras de modulateur MZ grâce à un miroir semi réfléchissant. Les deux faisceaux (les amplitudes) se propagent dans des guides identiques et le déphasage entre les deux ondes est nul, mais sur l'un des bras d'interféromètre le modulateur de phase introduit une différence de marche entre les deux ondes. [55]

Cette interférence permet d'obtenir une modulation de l'intensité lumineuse du faisceau en sortie du système optique.

Il a quelques inconvénients tels qu'une forte perte optique, une consommation d'énergie élevée et une difficulté d'intégration avec un laser.

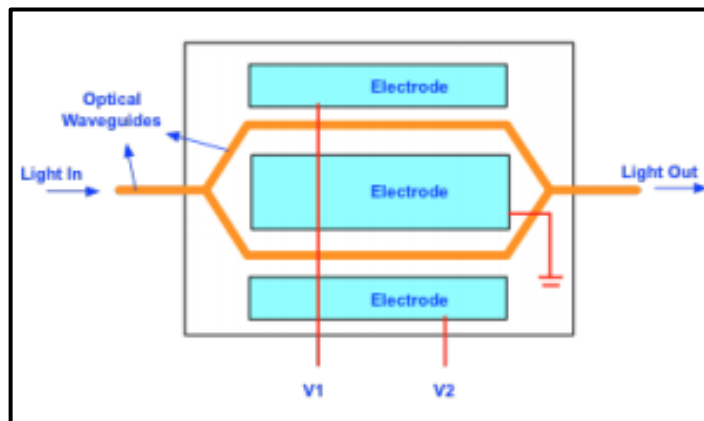


Fig II- 3: Structure de modulateur d'intensité de Mach-Zehnder [56]

### II-4-1-2-2 Le modulateur optique IQ

Le modulateur optique IQ (In-phase Quadrature-phase) permet d'appliquer des modulations vectorielles de type PSK ou QAM à une porteuse optique.

Le modulateur optique IQ comprend deux modulateurs MZM en parallèles avec un déphasage de  $90^\circ$  sur un bras pour assurer la quadrature avant recombinaison par un coupleur.

Chaque MZM est respectivement commandé par la partie réelle (I) et imaginaire (Q) du signal électrique.

La plupart des modulations numériques de signaux sont créées en utilisant un modulateur IQ.

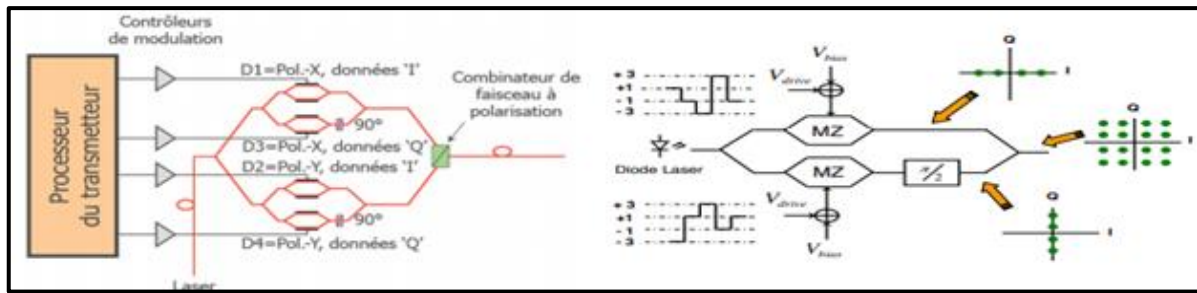


Fig II- 4: Architecture du transmetteur cohérent avec un modulateur optique a base de deux modulateurs MZM [57]

II-4-1-2-3 Format de Modulation

La flexibilité d'avoir accès au champ complet du signal permet de concevoir différents types de formats de modulation, des formats linéaires conventionnels, comme la modulation par décalage de phase (PSK) et la modulation d'amplitude en quadrature (QAM), aux plus complexes, comme fréquence orthogonale. Multiplexage par division (OFDM), et enfin aux formats basés sur NFT.

Étant donné que les systèmes cohérents permettent la modulation à la fois dans les composants I et Q, des formats de modulation bidimensionnels sont généralement utilisés. En particulier, les formats QAM sont largement adoptés pour leur simplicité, qui utilisent essentiellement la modulation par décalage d'amplitude (ASK) pour les composants I et Q indépendamment. [58]

Les formats QAM couramment utilisés dans les communications optiques comprennent: 4-QAM (également appelé QPSK), 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM et 64-QAM.

Les constellations de ces formats QAM sont comparées sur la figure 2.4. Pour les formats QAM carrés (c'est-à-dire QPSK, 16-QAM et 64-QAM).

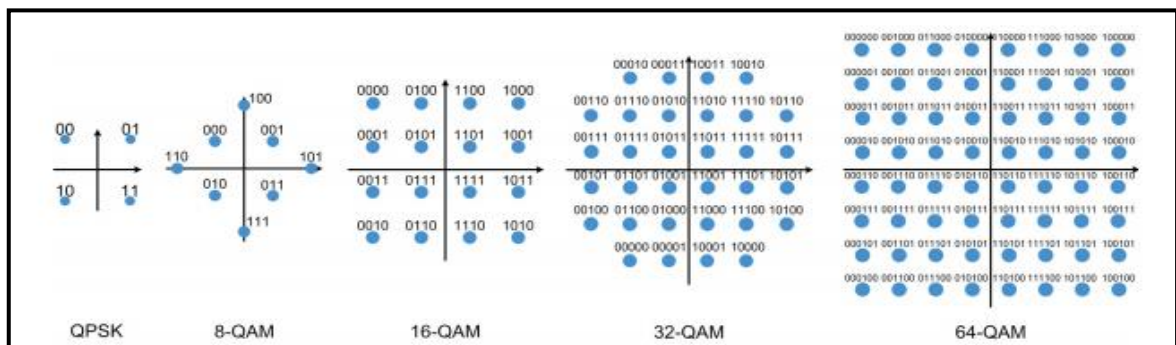


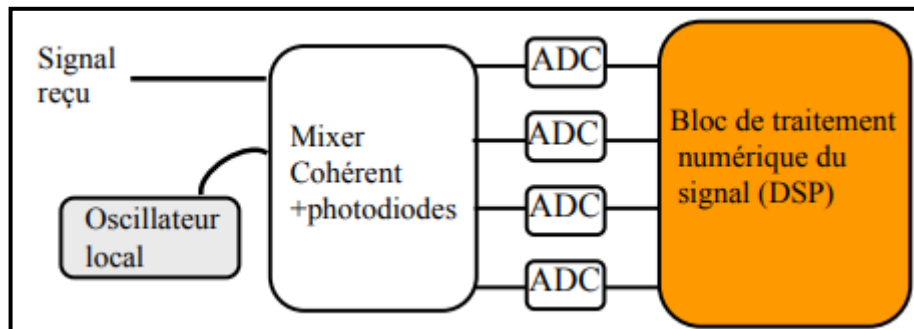
Fig II- 5: Constellations et mappage bit à symbole pour différents formats QAM. [59]

II-4-1-3 Récepteur Cohérent

Le récepteur cohérent comporte deux sous-ensembles :

Le premier est constitué de composants optiques et optoélectroniques jusqu'aux convertisseurs ADC analogiques-numériques (ADC pour Analog to Digital Converter) appelle aussi " Optical Front-End", où le signal reçu provenant de la fibre optique est combine avec le signal d'un oscillateur local.

Le second est un processeur (DSP pour Digital Signal Processing) qui contient une chaîne des opérations de traitement de signal appliquées sur le signal reçu après avoir le converti en forme analogique au forme numérique, en utilisant des algorithmes développés afin de compenser les dégradations que subisse le signal lors de la transmission.



**Fig II- 6: Schéma de principe du récepteur cohérent appliqué à chaque composante en polarisation [60]**

Suivant la différence de fréquence entre le signal reçu et le signal issu de l'oscillateur local, on distingue deux types de détection cohérente : la détection homodyne et hétérodyne.

La détection homodyne: Lorsque le signal et l'oscillateur local ont exactement la même fréquence, Celle-ci nécessite un contrôle de la phase instantanée de l'oscillateur local par des boucles à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop).

La détection hétérodyne: elle est associée à une différence de fréquence non nulle entre le signal et l'oscillateur local. La complexité du récepteur est réduite dans ce type de détection car celle-ci ne nécessite pas de PLL. Cependant, le SNR est amélioré de 3 dB dans la détection homodyne.

Lorsque la fréquence du signal reçu est très proche de celle de l'oscillateur local, on parle de détection intradyne. Dans ce type de détection, l'écart en fréquence entre l'oscillateur local et le signal optique reçu est généralement très petit devant la rapidité de modulation (ordre de grandeur 100MHz-1 GHz). Les systèmes modernes utilisent généralement ce type de détection. [61].

### II-4-1-3-1 Partie optique

Cette partie dit en anglais " coherent optical front-end" est essentiel a la réception pour conserver les informations de champ total du signal optique a double polarisation(TE,TM).

Elle est composé d'un mixeur cohérent appelé également "hybrid a 90°" ,il s'agit d'un dispositif passif (composant optique) a deux entrées et quatre sorties ,chacun des ports de sortie fournit un signal résultant de l'interférence des deux entrées avec les déphasages de 0, 90, 180 et 270 degrés, un oscillateur laser local (LO),un deviseur de polarisation PBS (polarisation beam spilter) , quatre photodiodes et des ADC (Analogue to Digital Converter). l'utilisation de laser local est pour augmenter la sensibilité de récepteur a la réception du signal optique.

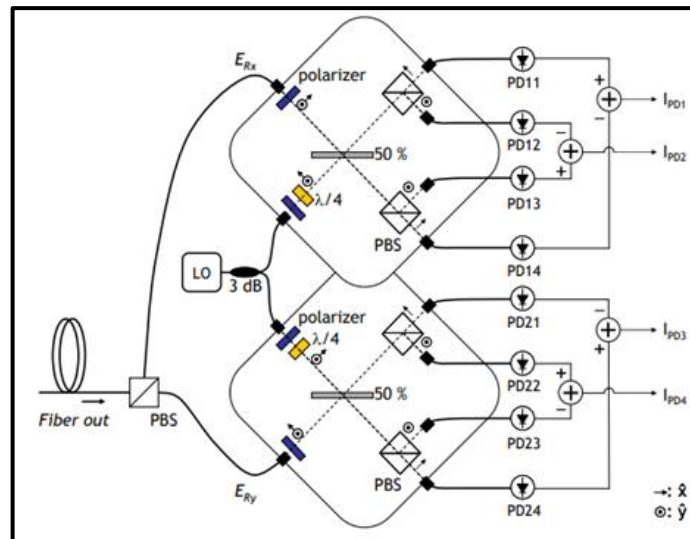


Fig II- 7: Un mixeur hybride à 90° "cohérent Optical front-end" [62]

Le signal optique (un champ optique) incident et le signal provient de l'oscillateur local sont combinés et sont passés par un séparateur de polarisation PBS (polarisation beam splitter) pour les séparés en deux champs orthogonaux de polarisations rectilignes ..

Au niveau de l'hybride 90° les deux composantes de champs sont combinées du signal optique reçu et de signal LO.

L'hybride 90° est responsable de la conversion de signal optique a un signal électrique avec les deux signaux I (in phase) et Q (quadratique) en polarisation X et Y.

Les quatres sorties du mixeur cohérent sont interfacées avec quatre pairs de photodiodes équilibrées et de haute vitesse.

Les courants électriques différentiels de chaque paire de PDs sont convertis en signaux électriques par quatre amplificateurs TIA. La conversion analogique numérique est faite par les ADCs (analogue to digital converter). [63]

Finalement, on obtient huit sorties a la fin de cette partie de récepteur cohérent, ces dernières vont passer par le bloc DSP (digital signal processing) pour la compensation de distorsions dues au milieu physique de transmission ainsi qu'aux imperfections des composants optiques et optoélectroniques, que le signal optique subit au court de sa propagation dans le canal de transmission.

A noter que lorsque l'amplification optique est utilisée, le signal accumule également du bruit.

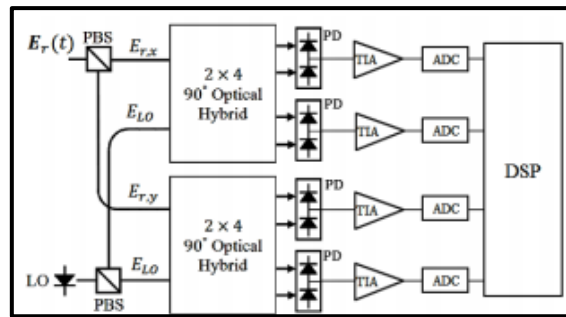


Fig II- 8: Schéma d'un récepteur cohérent qui contient les deux blocs " Optical front-end" et le bloc de "DSP". [64]

#### II-4-1-3-2 Bloc de traitement numérique de signal

A la sortie de photo diode, les signaux électriques sont échantillonnés et transformés en signaux discrets à l'aide de convertisseurs ADCs qui vont ensuite être (les signaux) traités par le bloc DSP.

La chaîne de DSP au récepteur cohérent est conçue pour récupérer les bits d'information transmis, aussi pour annuler le besoin de contrôle dynamique de polarisation par la compensation des dégradations et des distorsions linéaires de transmission [65], tel que : la compensation de dispersion chromatique, l'égalisation de PMD (dispersion de mode de polarisation) et la compensation de bruit de phase de la porteuse à l'aide des algorithmes correspondants à chaque opération.

Pour compenser tous ces effets, le signal reçu échantillonné est élaboré avec une série d'algorithmes pour minimiser le BER (bit error rate) qui représente le critère principal d'évaluation de qualité de système de communication.

L'avantage de l'utilisation de détection cohérente avec les algorithmes de traitement numérique de signal pour :

Premièrement, la possibilité de détection de formats de modulations avancés avec efficacité spectrale améliorée comme (PSK...), aussi ils offrent un potentiel pour une sensibilité supérieure du récepteur, en outre la détection cohérente avec les algorithmes DSP permet la compensation électrique hors ligne des dégradations résultant de la transmission par fibre. [66].

Le bloc de DSP peut contenir plusieurs sous-systèmes, où chaque de ces systèmes (block) est appliquée pour gérer une dégradation spécifique dans la liaison de transmission .

Il contient généralement les blocs suivants :

- La compensation de dispersion chromatique.
- La récupération de l'horloge (synchronisation).
- La compensation de PMD et le démultiplexage de polarisation.
- Egalisation de décalage de fréquence et la récupération de la phase de porteuse.

La dispersion chromatique génère des décalages temporels entre les différentes composantes spectrales du signal. La PMD induit, de façon comparable, un décalage temporel entre les composantes de polarisation du signal ainsi qu'une modification de la polarisation des

composantes spectrales. Ces deux types de distorsions peuvent être représentés par le passage à travers un filtre linéaire déphaseur. L'application du filtre inverse doit donc permettre de retrouver le signal initial. [67]

Le block de récupération d'horloge est appliqué pour corriger l'erreur d'échantillonnage numérique qui résulte de la conversion de ADC. Le block de récupération de décalage de phase et de fréquence est réalisé pour corriger aussi la différence entre le signal reçu et l'oscillateur local.

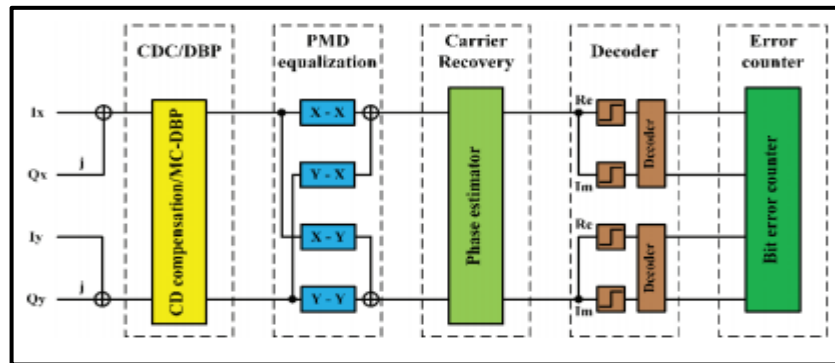


Fig II- 9: Bloc de traitement numérique du signal [68]

### II-4-1-3-2-1 Front-End Compensation (l'immbalance I Q):

Dans le cas idéal les signaux I et Q sont orthogonaux entre eux mais pratiquement ils ne sont pas orthogonaux à cause de déséquilibre entre les deux composantes

Cet déséquilibre peut être causé par les défauts de dispositifs de modulation et PD ou à la différence de puissance après les divers. Pour avoir une récupération correcte des signaux, il est nécessaire de compenser le déséquilibre entre I et Q de signaux numériques. cela peut être réalisé par l'algorithme de processus de orthogonalité de " Gram-Schmidt appelé "GSOP". [69]

L'algorithme GSOP est une méthode effective pour convertir les échantillons d'information non-orthogonal à l'état orthogonal.

### II-4-1-3-2-2 Récupération d'horloge

La récupération d'horloges une fonction critique dans les récepteurs cohérents. Généralement, tout erreur d'horloge d'échantillonnage, réduire de manière significative la performance de BER du système.

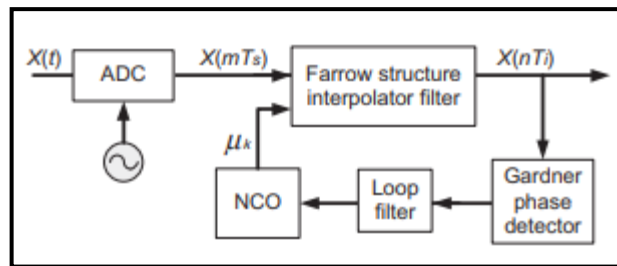
La récupération d'horloge consiste à corriger l'erreur d'échantillonnage numérique qui est produit par le convertisseur ADC et d'annuler la non synchronisation inter -symbole entre les deux composantes de polarisation.

Le but de la récupération d'horloge est d'acquérir la synchronisation des symboles et de corriger la position d'échantillonnage dans chaque intervalle de symbole.

Plusieurs algorithmes sont proposés pour remédier ce décalage:

La méthode de GARDNER est la plus utilisée dans les différents systèmes de communication., spécialement GARDNER fonctionne avec deux échantillons per symboles.

Une autre méthode a utilisée, c'est la récupération de synchronisation carrée the (square-timing recovery).



**Fig II- 18: Méthode de récupération d'horloge de Gardner avec mise à jour des erreurs.**  
[70]

**II-4-1-3-2-3 Compensation de la dispersion chromatique DC**

La dispersion chromatique cumulée dans un FO est déterministe et invariante dans le temps, elle dépend de la longueur totale de fibre parcourue, du type de fibre,

la réponse de canal avec DC peut être présenter comme une fonction linéaire. [71]

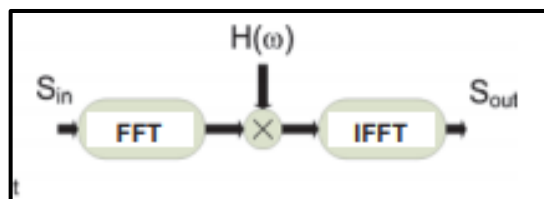
La compensation de la DC peut être traiter soit en domaine temporelle par application de filtre a repense impulsionnelle fini (FIR) ou soit en domaine fréquentiel basé sur la fonction de transfert.

**✚ Egalisation dans le domaine fréquentiel**

Dans le domaine fréquentiel, le filtrage de Stream de sortie est obtenu par une opération de multiplication. La réponse du canal est donnée par l'équation suivante:

$$H(\omega) = \exp\left(j \frac{D\lambda^2 z}{4\pi c} \omega^2\right)$$

Pour la compensation de CD, ceux qui ont besoins est de transférer les informations (DATA) en domaine fréquentiel par la FFT (Fast Fourier transforme). Après la multiplication de fonction de transfert, les DATA récupérer par la IFFT (Inverse Fast fourrier transforme).



**Fig II- 19: La compensation de CD dans le domaine fréquentiel base sur la FFT et IFFT**

**✚ Egalisation dans le domaine temporel**

Dans le domaine temporel, le filtrage correspond à une opération de convolution, qui est exécuté par le filtre a réponse impulsionnelle fini (FIR), où la formule utilise par le filtre est la suivante :

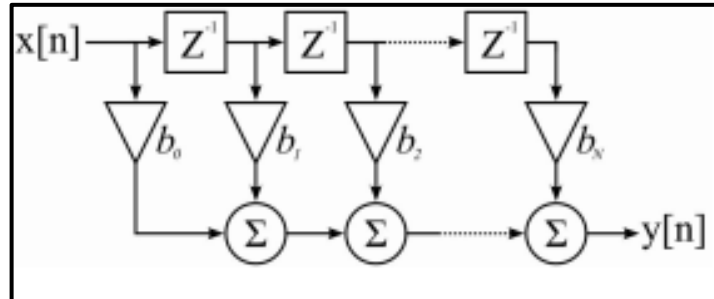
$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n - 1) + \dots + b_Nx(n - N)$$

Avec :

$x$  : le signal d'entre et  $y$ : la sortie

$b$  : le poids de filtre.

$N$  :la longueur de filtre.

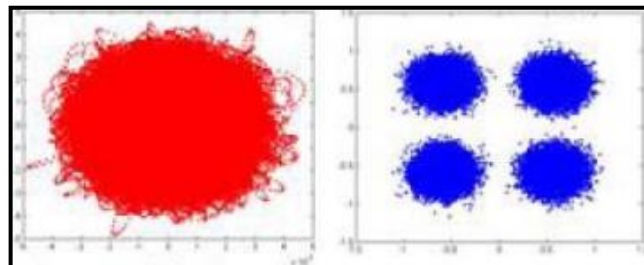


**Fig II- 10: Schéma d'un filtre a réponse impulsionnelle FIR.** [72]

Les coefficients demandés de filtre FIR est obtenues par la fonction de transfert de CD de fibre en utilisant la méthode de coupure de domine fréquentiel ou la méthode de coupure de domaine temporel.

Deux techniques sont utilisées dans le domaine temporel, pour compenser la DC :

- ✓ La méthode de "Savory" et l'égaliseur adaptatif aveugle comme "LMS" (least mean sequart).
- ✓ L'algorithme CMA (constant modules algorithme).



(A)Constellation de signal reçue, (B) constellation de signal après CD compensation

**Fig II- 11: Comparaison de signal a la réception et après la compensation de CD** [73]

### II-4-1-3-2-4 Compensation de la PMD et le démultiplexage de polarisation

Généralement dans la télécommunication par fibre, la polarisation n'est pas maintenue

Au niveau de la partie "front-end" du récepteur cohérent, le signal provient de canal avec une état de polarisation arbitraire est séparé en deux composantes linéaires de polarisation, nommées  $E_x$  et  $E_y$ .

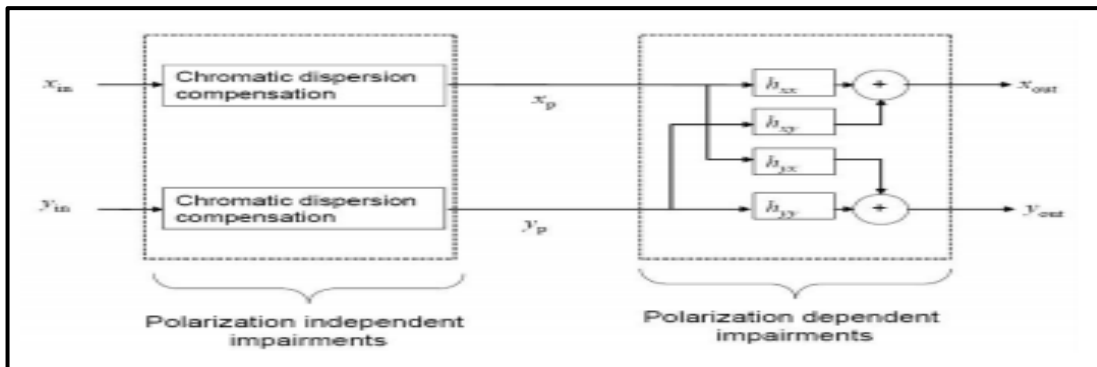


Fig II- 12: Fonctionnalité de l'étage de filtrage numérique [74]

Pour obtenir les données pour chaque polarisation, il faut faire un démultiplexage de polarisation et une compensation de dispersion de mode de polarisation (PMD).

La démultiplication est la partie essentiel de la chaîne de DSP dans la réception cohérente. pour récupérer les deux composantes de polarisation émise par le transmetteur.

Cela peut être traiter par l'utilisation de filtre adaptatif aveugle basé sur l'algorithme CMA qui est un égaliseur MIMO (Multiple Input Multiple Output) qui compense l'interférence entre symboles (ISI) et effectue la séparation des deux polarisations "[75]

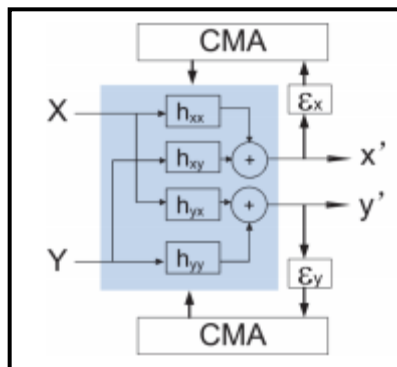


Fig II- 13: L'égalisateur adaptatif "papillon" base sur l'algorithme CMA [76]

Le s 04 filtres sont arranges avec une structure appelé "papillon", cette structure est composée par 4 CMA reliées entre eux par les formules suivantes :

$$h_{xx} = h_{xx} + \mu \cdot e_x + x_{out} \cdot x_p^*$$

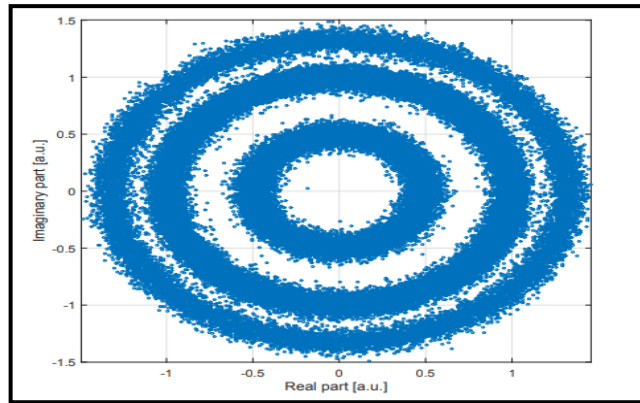
$$h_{xy} = h_{xy} + \mu \cdot e_x + x_{out} \cdot x_p^*$$

$$h_{yx} = h_{yx} + \mu \cdot e_y + y_{out} \cdot x_p^*$$

$$h_{yy} = h_{yy} + \mu \cdot e_y + y_{out} \cdot x_p^*$$

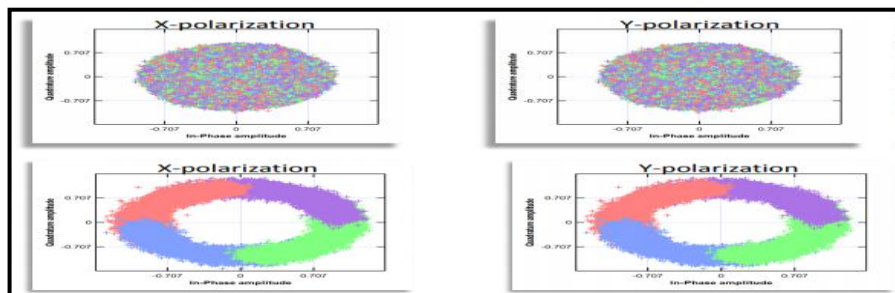
Ils sont mise à jour de façons contenue pour suivre les perturbations et les effets non stationnaires de canal comme : les fluctuations, PMD ..., Il permet également de corriger une dispersion chromatique résiduelle éventuelle.

Enfin, il effectue le démultiplexage en polarisation en séparant le mélange des symboles transmis sur chacune des deux polarisations. [77]



**Fig II- 14: Représentation graphique de l'une des composantes de polarisation du signal après égalisation [78]**

On peut voir de la représentation graphique que les symboles reposent sur le cercle. Caractéristiques des modulations QAM. Maintenant tout le bruit induit par la polarisation les dégradations associées a disparu et le seul problème qui reste à compenser est le bruit de phase.



**Fig II- 15: Les deux composantes de polarisations X et Y avant et après l'étape de la démultiplexage de polarisation [79]**

#### II-4-1-3-2-5 Estimation de décalage de fréquence et de récupération de phase

La dernière opération est l'estimation de l'écart de fréquence et la récupération de phase de la porteuse. La fréquence de sortie de LO (récepteur) doit être égal à la fréquence de la porteuse optique (transmetteur), mais a cause de la non-idéalité et au conditions environnemental entre le transmetteur et le récepteur, on peut avoir un décalage de fréquence résiduelle. Le résultat de ce décalage de fréquence est une rotation progressive du revêtement de la phase des symboles reçus, qui se traduira par des glissements de cycle. [80]

Après la compensation de décalage de fréquence, le bruit de phase restant est dû principalement à la linewidth non-nul de transmetteur et de local laser. Ce dernier entraine une phase aléatoire variante dans le temps au côté de récepteur qui doit être estimer et retirer de flux de données reçu pour garder les symboles alignés avec la constellation. [81]

La récupération de porteuse est réalisé par deux étapes de DSP ,l'estimation de décalage de fréquence (FOE frequency-offset estimation ) et la récupération de phase. Car la plus part de méthodes de récupération de phase nécessite un décalage de fréquence nulle. La FOE est généralement traitée avant la récupération de phase.

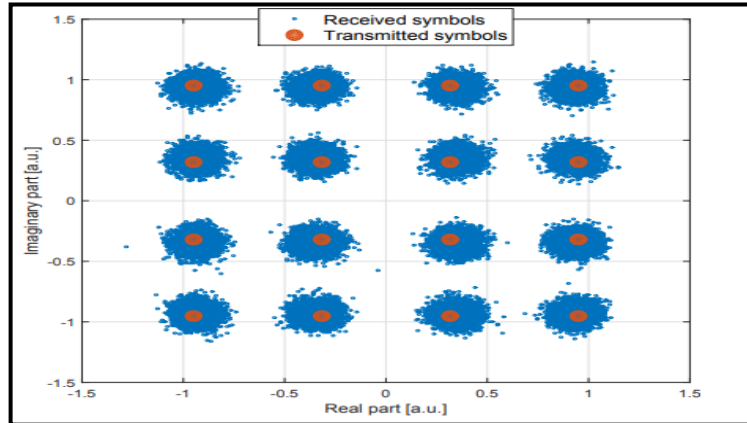
Pour la FOE il y a deux algorithmes essentiels, le premier est basé sur les méthodes différentielles basées sur la phase (the differential phase-based méthodes) [82]

Le deuxième est basé sur les méthodes spectrales utilisant l'analyse spectrale de FFT

Le premier est connu par l'algorithme de même puissance de Viterbi-Viterbi pour les signaux QPSK.

Le deuxième est une méthode universelle pour tous les formats de modulations.

Généralement, il y a deux régimes pour la récupération de phase, l'un appelé "feed forward" méthode, et l'autre appelé "direct décision feed back" méthode". [38]



**Fig II- 16: Représentation de l'une des composantes de polarisation du signal après la récupération de phase de porteuse [84]**

### II-4-1-3-3 Blok de Détection de symboles et décodage FEC

- Traditionnellement, les séquences d'échantillons après récupération de phase sont comparées à une carte des points de constellation transmis pour effectuer la détection de symboles et obtenir un flux binaire équivalent sur la base du mappage bit à symbole utilisé par l'émetteur.
- Le flux binaire généré peut être comparé au flux binaire transmis pour obtenir une estimation du taux d'erreur sur les bits (BER) pré-FEC des performances du système.
- Ce processus peut être effectué par un module de correction d'erreur (FEC) à soft-décision forward sur les symboles reçus. Alternativement, une estimation de symbole suivie d'une FEC à hard-décision peut être utilisée.

La performance de système est calculée en fonction de BER :

$$BER = \frac{\# \text{ bit errors}}{\# \text{ transmitted bit}}$$

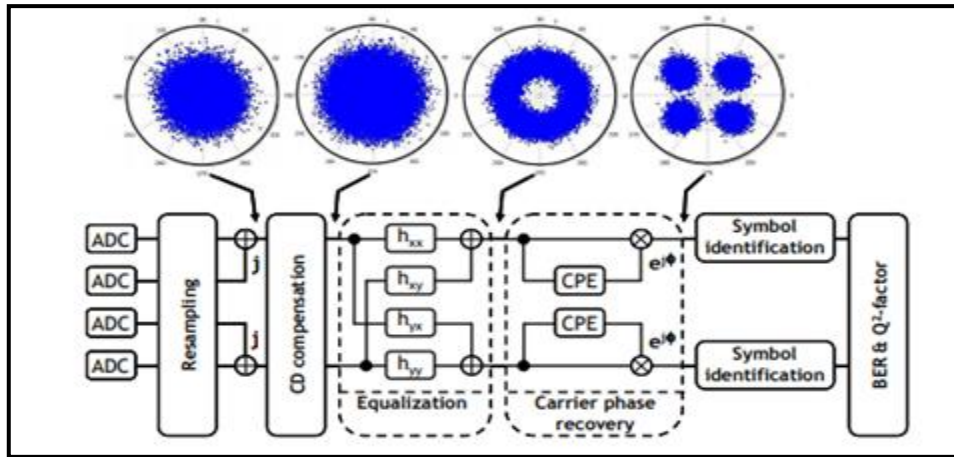


Fig II- 17: Schéma de différents étapes traitement de signal applique au récepteur cohérent [85]

Pour bien comprendre les différentes étapes de traitement de signal qui subit le signal a la réception ci-joint un schéma de constellation de différents signaux après 1000-km de transmission avec DSP.

Les résultats de simulation de Signaux de 32 Go (QPSK, 8QAM et 16QAM) après une transmission de 1000 km.

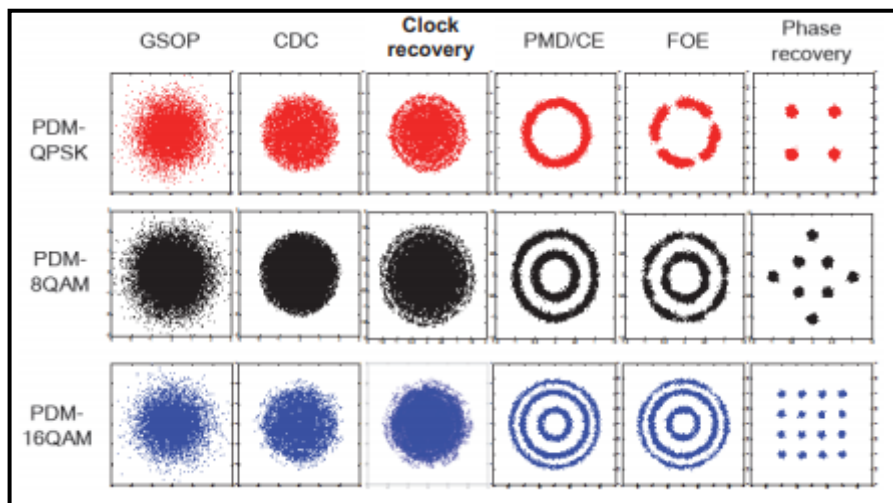


Fig II- 28 : La constellation de différents signaux après transmission de 1000 km avec DSP [86]

### II-4-2 Compensation de effets non-linéaire

Les récepteurs cohérents peuvent compenser des quantités presque arbitraires de dégradations comme CD, PMD et bruit de phase, mais ils sont toujours loin d'être parfaits à cause des effets non-linéaires.

Pour atténuer les effets non linéaires intra-canal, plusieurs algorithmes peuvent être utilisés. Ces algorithmes sont basés sur la nature déterministe des non-linéarités.

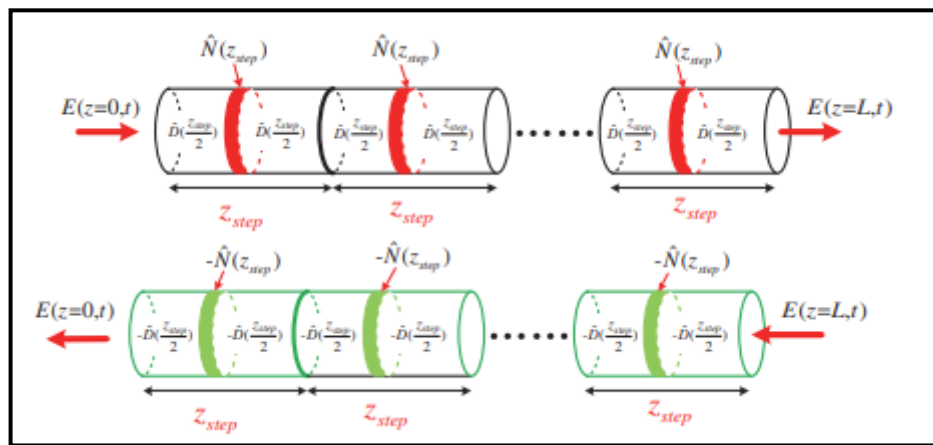
La méthode de la propagation numérique vers l'arrière (DBP pour digital backward propagation), basée sur la méthode de Fourier à étapes fractionnées (SSFM pour split-step

Fourier méthode) en résolvant à l'envers l'équation de Schrödinger non linéaire (NLSE pour non linéaire Schrödinger équation), a été prouvé comme un moyen efficace de compenser l'effet non linéaire, y compris l'auto- modulation de phase (SPM), modulation croisée de phases (XPM) et mixage à quatre ondes (FWM). [87]

$$\frac{\partial E_X}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}E_X + \frac{j\beta_2\partial^2}{2\partial t^2}E_X - j\gamma\left(|E_X|^2 + \frac{2}{3}|E_Y|^2\right)E_X - \frac{j\gamma}{3}E_X * E_Y^2 \quad (19)$$

$$\frac{\partial E_Y}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}E_Y + \frac{j\beta_2\partial^2}{2\partial t^2}E_Y - j\gamma\left(|E_Y|^2 + \frac{2}{3}|E_X|^2\right)E_Y - \frac{j\gamma}{3}E_Y * E_X^2 \quad (20)$$

Elle exploite la connaissance du comportement physique de la fibre optique en tant que canal non linéaire, par approximation de l'inverse canal non linéaire, le plus souvent décrit par l'équation de Schrödinger non linéaire (NLSE).



**Fig II- 29 : Le principe de la compensation non linéaire de la fibre basée sur la méthode DBP [88]**

La DBP peut compenser efficacement pour les non-linéarités intra-canal, mais la complexité importante de transformations multiples entre les domaines temporel et fréquentiel rendent cette méthode coûteuse pour la mise en œuvre du circuit. [89]

D'autres méthode sont présentés pour remédier au problème de non linéarité comme :

Compensateur non linéaire présenté par Tanimura où la méthode consiste à compenser le CD accumulé pendant la durée d'abord et ensuite à traiter les effets non linéaires en utilisant un filtre FIR pour la compensation CD suivi d'une structure NLC papillon appelé noyau NLC(NLC core).

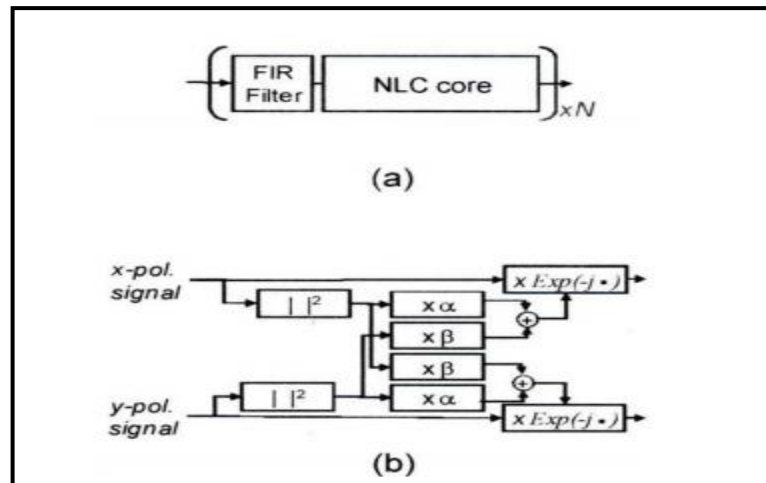


Fig II- 30: compensateur non linear [90]

Récemment, une approche de compensation de non-linéarité basée sur la perturbation avec compensation électronique symétrique de la dispersion (SEDC) s'est avérée fournir une opération en une seule étape à un échantillon par symbole et une complexité gérable, en particulier pour les liaisons longue distance

Pendant ce temps, une approche alternative, la fréquence domaine d'égalisation de non-linéarité basée sur Volterra (FD-VNLE) a également été développé.

## II-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'architecture de système de communication optique a détection directe IM/DD et les différents blocs qui les contient, ainsi que la modulation utilisée.

Dans la deuxième partie de chapitre, on a montré le système cohérente, ses différentes fonctions et les principales techniques de traitement numérique du signal utilisées pour compenser les distorsions et les perturbations linéaires du canal

En particulier, nous avons conclu que la détection cohérente combinée avec le traitement numérique de signal ( DSP) présentent une solution très prometteuse pour les systèmes de communications optiques long-courrier

Ils permettent de compenser les distorsions linéaires introduites par la propagation dans les fibres optiques, Ce qui permet par conséquent d'augmenter la densité spectrale d'information tout en conservant une distance de transmission importante.

# **CHAPITRE III**

**SIMULATION D'UNE CHAÎNE  
DE TRANSMISSION D'UN  
SIGNAL OPTIQUE A BASE DE  
RECEPTEUR COHERENT**

## CHAPITRE III SIMULATION D'UNE CHAÎNE DE TRANSMISSION D'UNE SIGNAL OPTIQUE A BASE DE RECEPTEUR COHERENT

### III-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons simuler une chaîne de transmission d'un signal optique à base de récepteur cohérent à l'aide de programmes en utilisant le logiciel «MATLAB®». Ces programmes permettent de simuler tout le système de l'émetteur au récepteur pour une transmission de l'ordre de centaine de kilomètres et d'évaluer la qualité de cette transmission.

Le simulateur est écrit en langage MATLAB qui est destiné notamment au traitement numérique des données. Il est particulièrement efficace lorsque celle-ci sont présentées sous la forme de vecteur ou de matrice. MATLAB intègre le calcul numérique, la visualisation des résultats et la programmation dans un environnement ouvert aux développements ultérieur.

### III-2 système optique cohérent

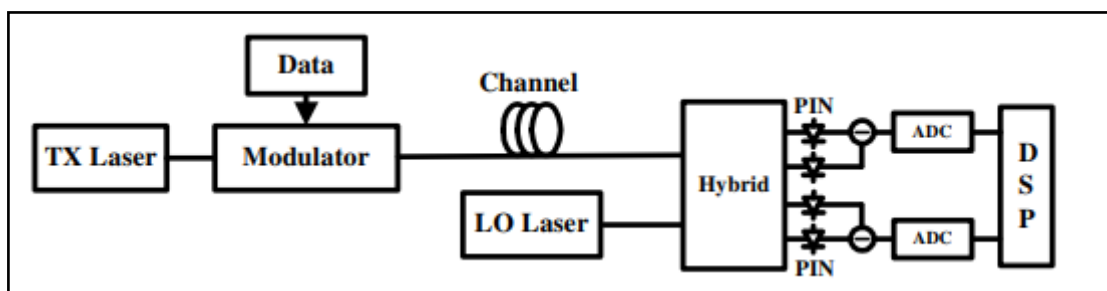


Figure III- 1 : Schéma de système de communication cohérent avec DSP [91]

### III-3 Paramètres de la simulation

#### III-3-1 Influence de Bruit (RIN, bruit quantique, bruit de phase et PMD)

Tableau III-1 : Paramètres de la simulation d'effet de bruit

Paramètre	valeur
Longueur de fibre	10 km
Puissance émise	<b>-10dBm</b>
Type de Modulation	QAM
Nombre de Modulation (M)	4
La forme d'impulsion	REC
Longueur d'onde	$1330.10^{-9}$

#### III-3-1-1 En absence de bruit :

- Optical amplifier: output power = 0.02 dBm | OSNR = 41.23 dB
- X pol constellation est tourner de  $0.04^\circ$
- Y pol constellation est tourner de  $-0.04^\circ$

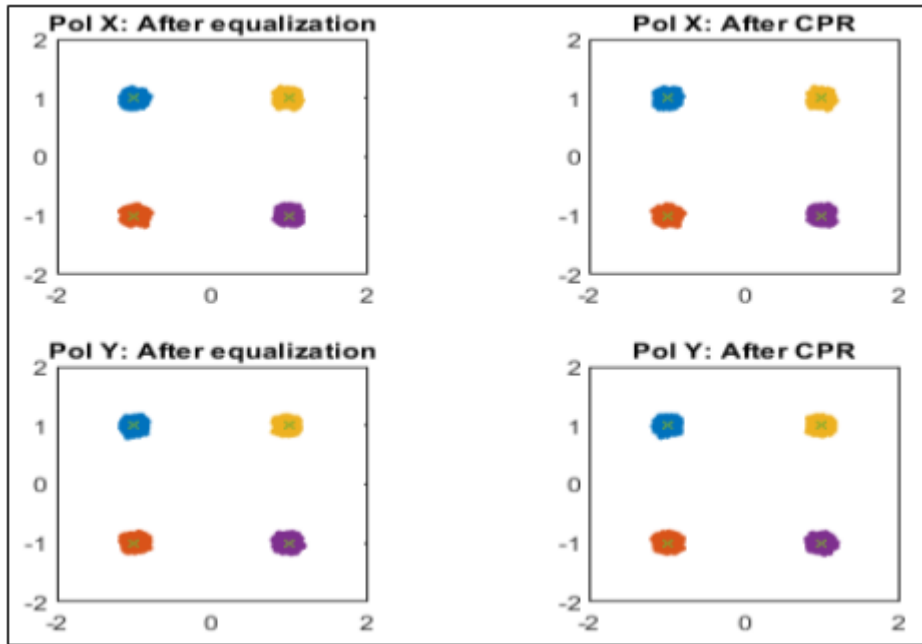


Figure III- 2 : Constellation avec modulation QAM (M=4) sans bruit et PMD

On remarque que la constellation reste la même avant et après l'égaliseur, ce qui donne que le signal reste presque stable le long de la fibre optique.

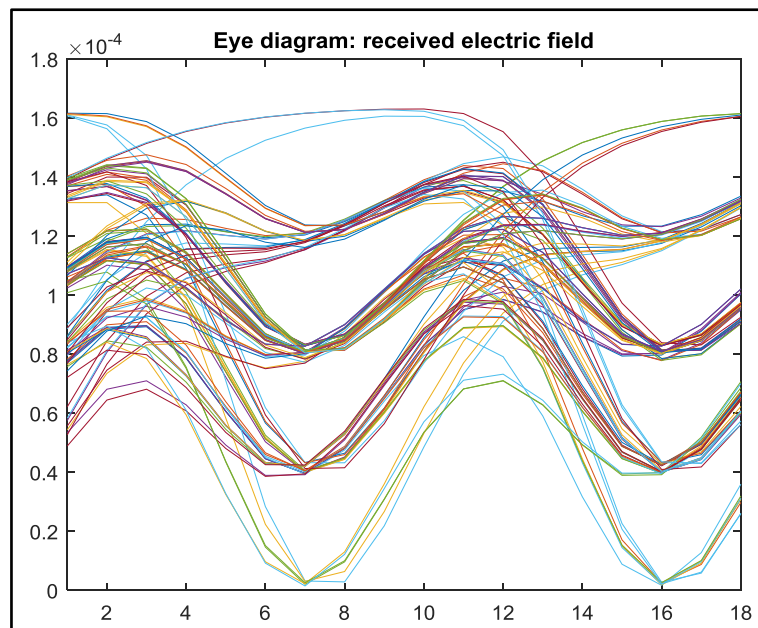


Figure III- 3 : Diagramme d'œil en absence de bruits

La figure III-3 représente le diagramme de l'œil pour une longueur de la fibre optique égale à 10 km, on voit clairement l'œil ouvert ça veut dire que le signal est reçu avec un minimum de distorsion ce qui confirme que l'influence de bruits et PMD dans la fibre optique est très faible.

## CHAPITRE III SIMULATION D'UNE CHAÎNE DE TRANSMISSION D'UNE SIGNAL OPTIQUE A BASE DE RECEPTEUR COHERENT

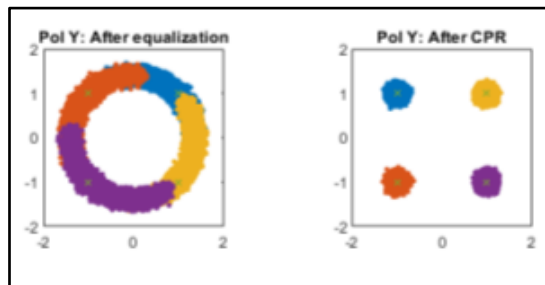
### III-3-1-2 En présence de bruits

OSNR = 41.23 dB (théorie)

OSNR = 41.67 dB (mesurée)

X pol constellation est tourner de  $90.08^\circ$

Y pol constellation est tourner d'avec  $89.91^\circ$



**Figure III- 4 : Constellation avec modulation QAM (M=4) avec bruits**

On voit clairement la rotation de composantes de polarisation x et y avec  $90.08^\circ$  et  $89.91^\circ$  respectivement, ce qui indique que la PMD et le bruit influent sur le signal transmit.

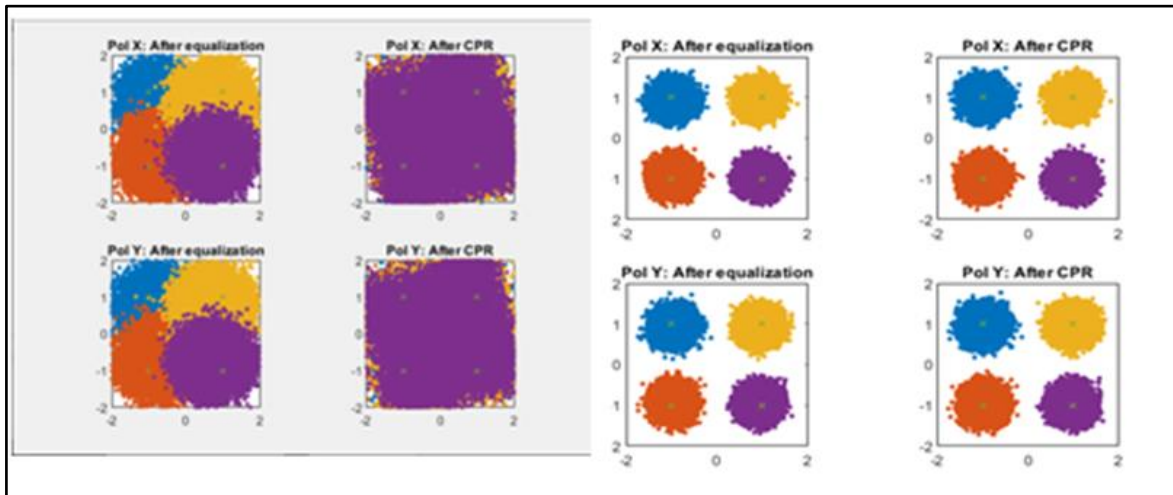
### III-3-2 Influence de la puissance émise

Tableau III-2 : Paramètres de la simulation d'effet de puissance de lancement

Paramètre	valeur
Longueur de fibre	5 km
Puissance émise	-40:1:-20 (dBm)
Type de Modulation	QAM
Nombre de Modulation (M)	4
La forme d'impulsion	REC
Longueur d'onde	$1330.10^{-9}$

**III-3-2-1 Résultats de simulation**

La constellation:



(a)

(b)

**Figure III- 5 : Constellation de signal avec modulation 4- QAM après l'égaliseur et après la CPR (a) au Début de simulation (b) à la fin de simulation**

- En puissance de lancement -40dB, on obtient les résultats suivants :
  - OSNR théorique = 10.77 dB
  - OSNR mesuré = 12.08 dB
  - X Pol La constellation de polarisation X est tournée avec  $128.20^\circ$
  - X Pol La constellation de polarisation Y est tournée avec  $128.72^\circ$
- Au dernier valeur puissance de lancement, on obtient les résultats suivants :
  - OSNR théorique = 19.77 dB
  - OSNR mesuré = 21.07 dB
  - X Pol La constellation de polarisation X est tournée avec  $-0.25^\circ$
  - X Pol La constellation de polarisation Y est tournée avec  $0.25^\circ$

D'après ces résultats, on voit que le signal transmit aux cours de fibre varie en fonction de puissance de lancement, comme il est traduit par une rotation de composante de polarisation de signal (x et y)

III-3-2-2 BER en fonction de ONSR et la puissance de lancement

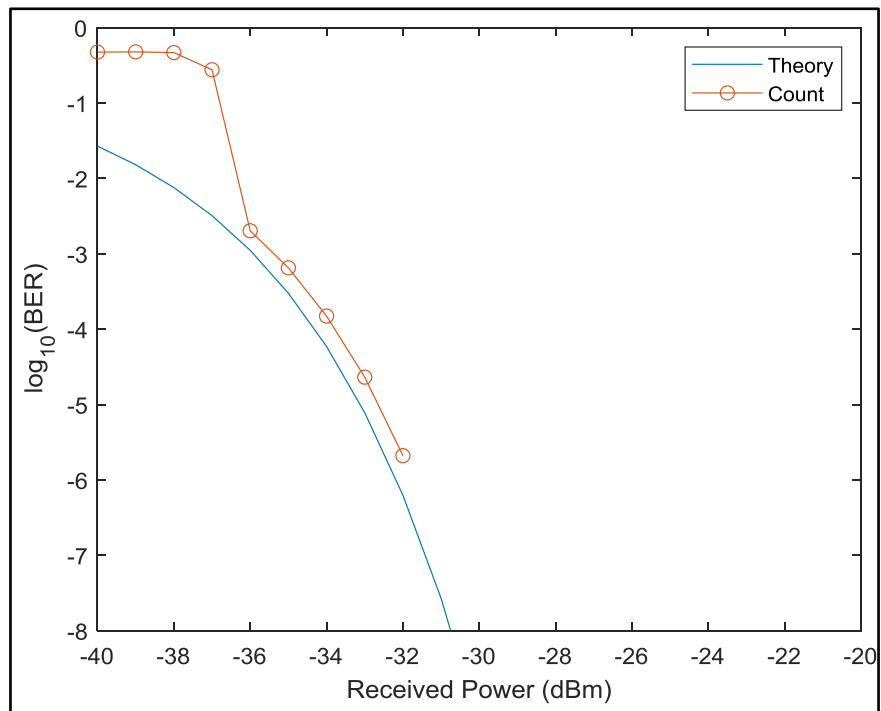


Figure III- 6 : Courbe de BER en fonction de puissance reçu(dBm).

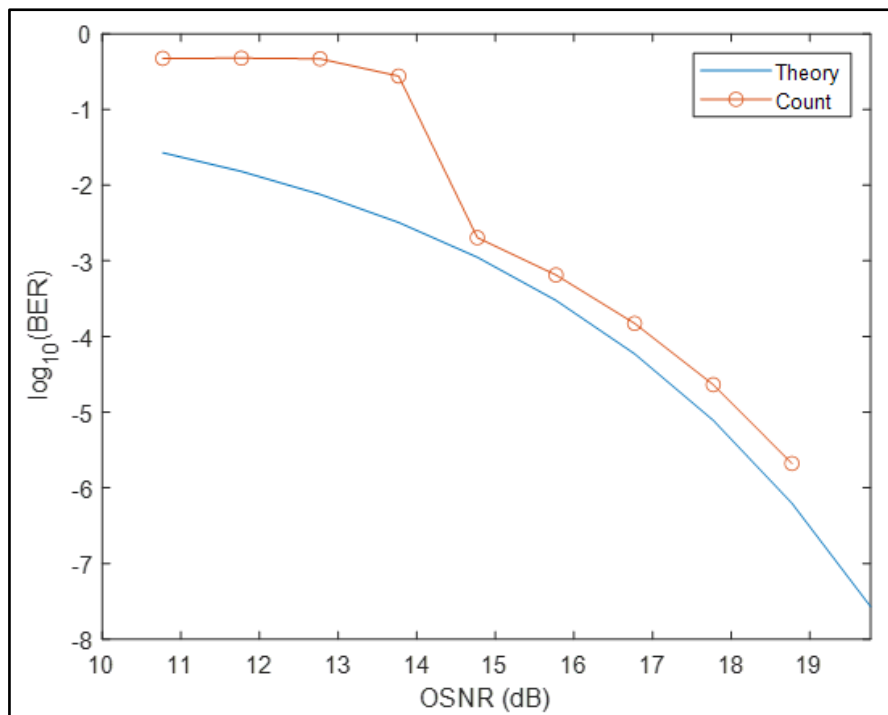


Figure III- 7 : Courbe de BER en fonction d'ONSR

On observe que l'BER est presque stable pour des valeur (11dB-14 dB), mais il diminue d'une façon proportionnelle au courbe théorique, même chose pour la puissance reçu (-40dB, -36dB).

## CHAPITRE III SIMULATION D'UNE CHAÎNE DE TRANSMISSION D'UNE SIGNAL OPTIQUE A BASE DE RECEPTEUR COHERENT

D'après ces résultats on note que les performances de système simule sont les mêmes que la théorie indique, ce qui signifie que le système est sensible et varie en fonction de la puissance de lancement à l'entrée de la fibre.

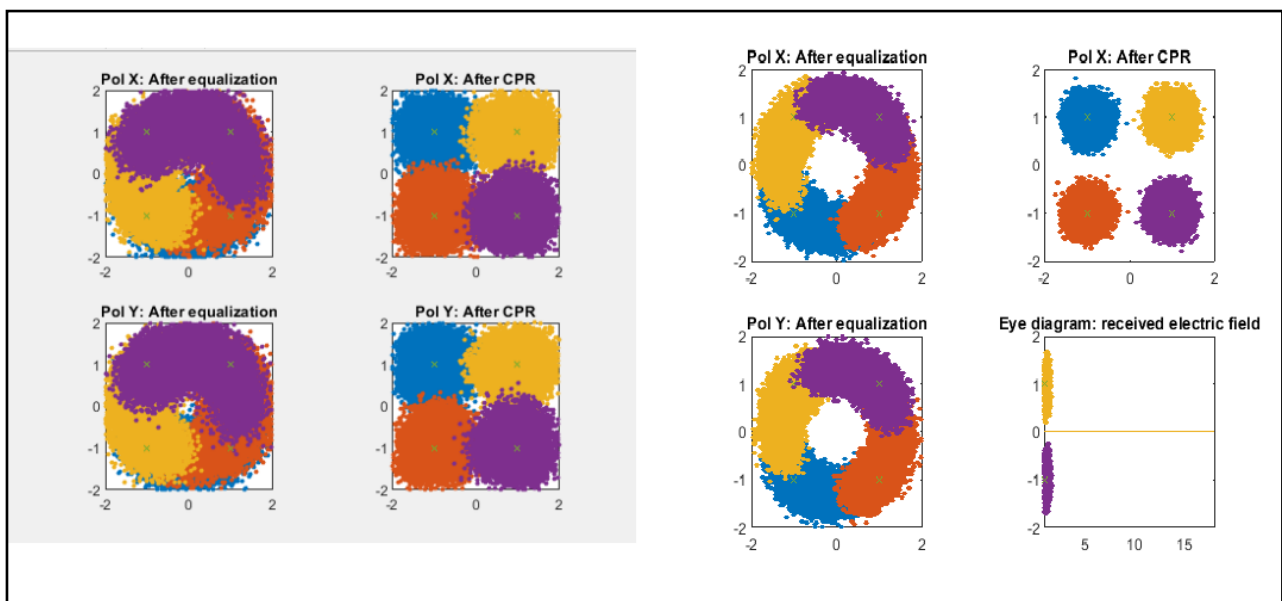
### III-3-3 Comparaison entre le système avec QAM et DPSK

#### III-3-3-1 QAM-4

Tableau III-3 : Paramètres de la simulation d'effet de Nombre de Modulation (M=4)

Paramètre	Valeur
Longueur de fibre	10 km
Puissance émise	-36:2:-10; (dBm)
Type de Modulation	QAM
Nombre de Modulation (M)	4
La forme d'impulsion	REC
Longueur d'onde	$1330.10^{-9}$

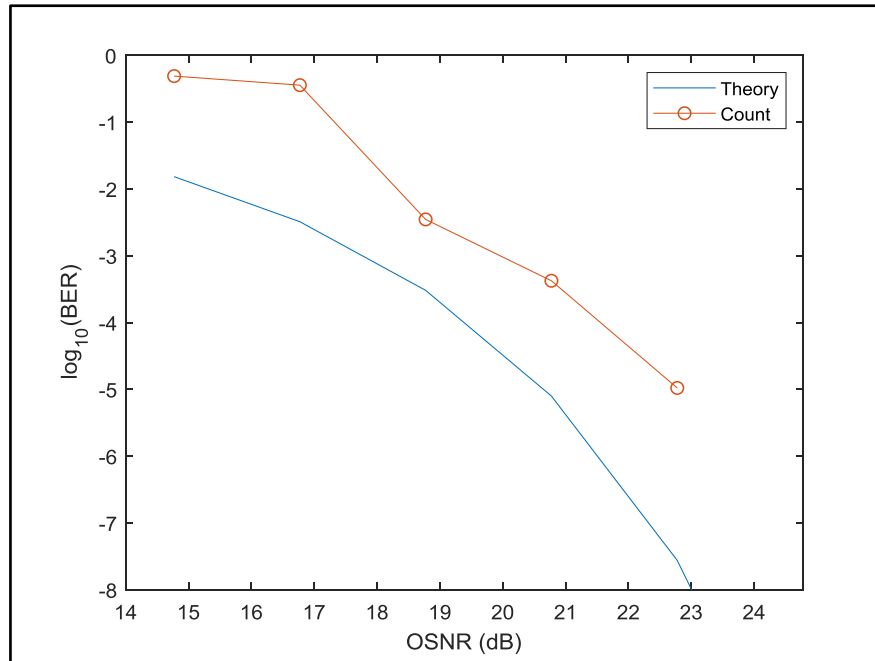
#### III-3-3-2 Résultats de simulation



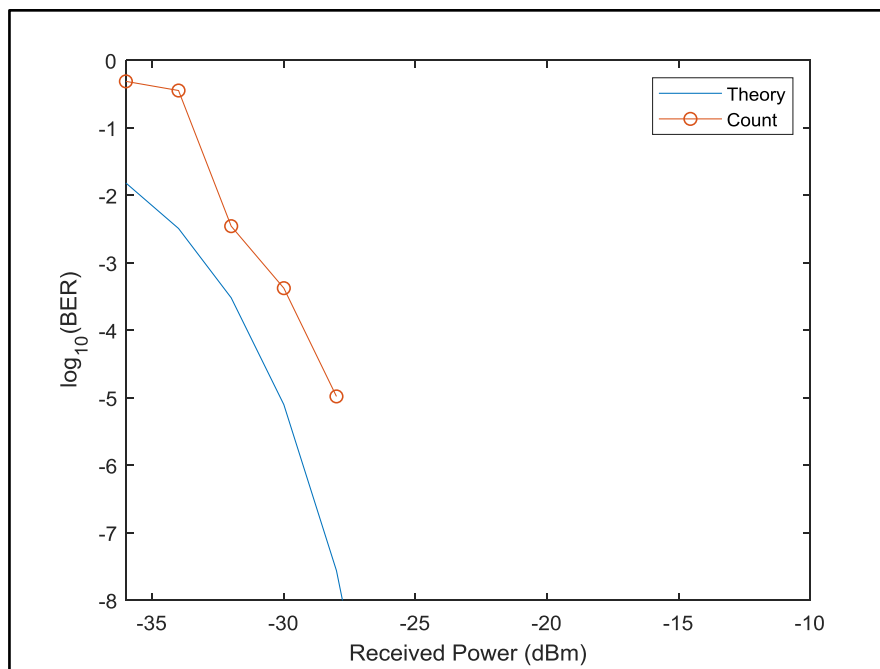
(a)

(b)

**Fig III-8: Constellation de signal aux fonctions de modulation 4- QAM (a) au Début de simulation (b) à la fin de simulation**



**Figure III- 9 : Courbe de BER en fonction d’OSNR cas de modulation 4-QAM**



**Fig III-10: Courbe de BER en fonction de puissance reçu(dBm) cas de modulation 4-QAM.**

On voit clairement, à partir des différentes courbes de cette simulation que le BER (mesuré) diminue d'une façon remarquable en fonction d'augmentation de OSNR, aussi pour les constellations des signaux.

On voit qu'il y a une rotation de composantes de signal (x,y) pour les deux valeurs de puissance (début et finale) de simulation, à la fin les composantes sont séparées entre eux, ce qui donne que le signal à la sortie du bloc de DSP est presque le même que celui transmis et que la modulation QAM est sensible aux distorsions du canal

III-3-3-3 DPSK

Nous allons répéter la même simulation avec la modulation DPSK

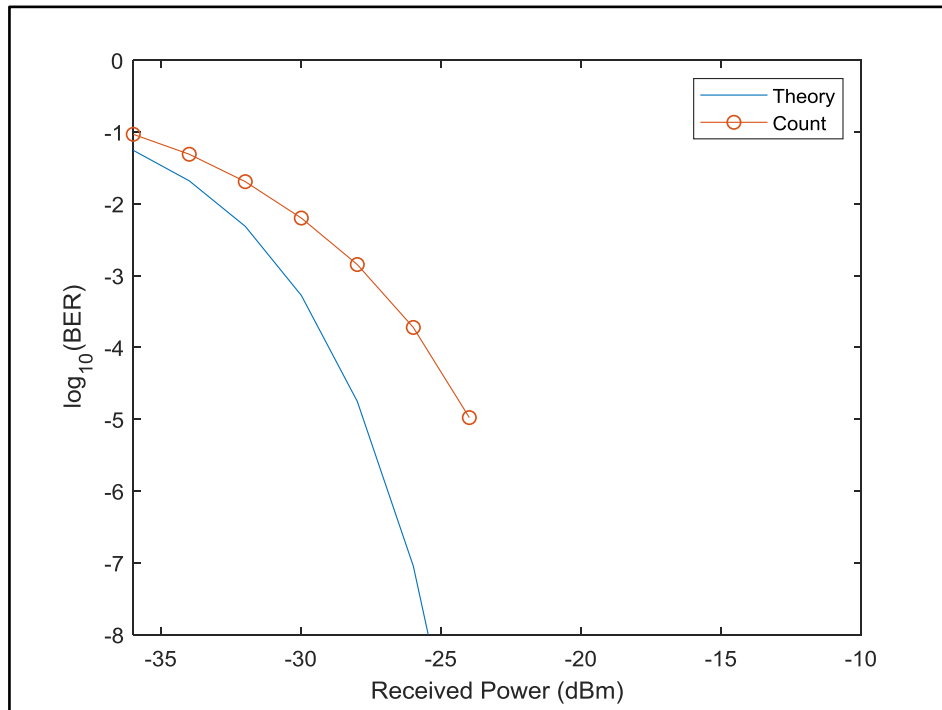


Fig III-11: Courbe de BER en fonction de puissance reçu(dBm) cas de modulation DPSK.

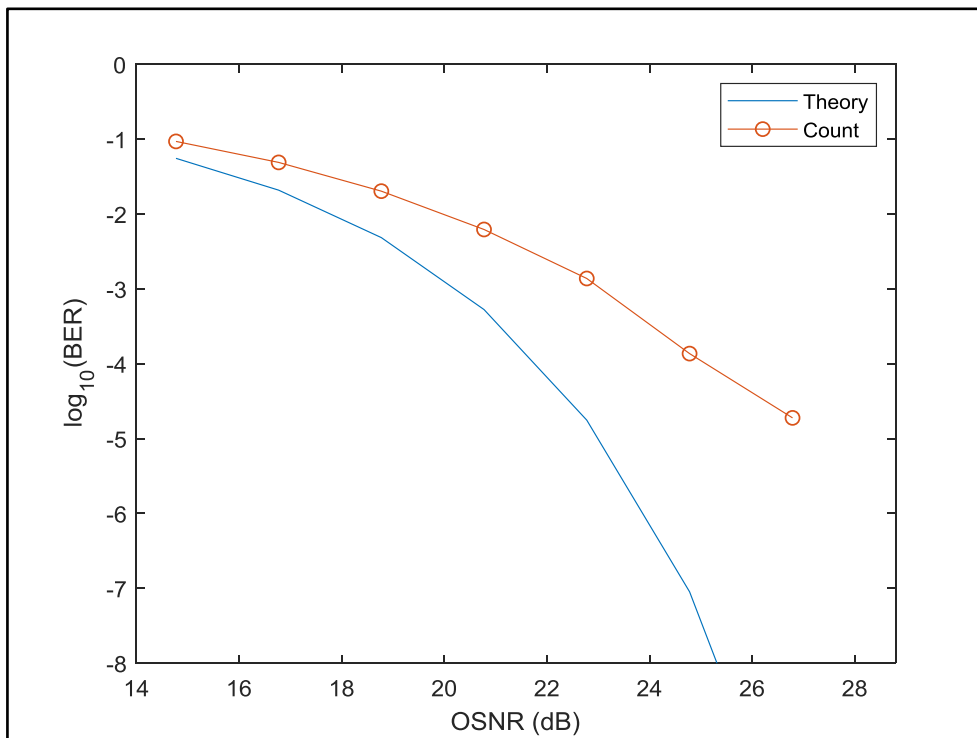


Figure III- 12 : Courbe de BER en fonction d'OSNR cas de modulation DPSK

Pour le cas de modulation DPSK, d'après les résultats de simulation, on remarque que la modulation DPSK est aussi favorable pour le système optique cohérent.

### **III-4 conclusion**

Ce dernier chapitre a été consacré à l'étude de système cohérent, dont le but était de visualiser le signal optique transmit aux divers points des chaînes. Notre action était portée sur la présentation de logiciel MATLAB suivi de la simulation d'une chaîne de communication à base d'un récepteur cohérent. Nous avons pu effectuer la simulation avec des changements de paramètres pour chaque manipulation et visualiser le performance de transmission.

On a remarqué que les changements de puissance de lancement influe sur le signal transmit ainsi que l'influence de modulations choisies, On a vu aussi la différence entre les deux types de détections cohérentes utilisées au niveau de récepteur cohérent.

**CONCLUSION**

**GENERALE**

### Conclusion générale

L'évolution des télécommunications optiques a mis en relief l'apparition de nouvelles technologies de transport de l'information telle que l'utilisation de récepteurs cohérents. Actuellement, l'augmentation de la demande de débit jusqu'aux utilisateurs implique une recherche particulière sur l'utilisation de nouvelles modulations et de nouvelles techniques de traitement de signal pour avoir de systèmes de transmission plus parfaite et plus robuste envers tous les facteurs perturbant la transmission.

Notre objectif dans ce travail est d'étudier et simuler un système de transmission optique basé sur un récepteur cohérent. C'est pourquoi il nous a paru important de commencer ce mémoire par une description approfondie de l'élément essentiel dans la télécommunication optique qui est la fibre optique. Cette description nous permet de maîtriser le concept théorique d'un tel système et simplifier sa conception, cela fait l'objectif de premier chapitre.

Pour le second chapitre, nous avons décrit deux types des liaisons par fibre optique avec tous ses éléments, selon le type de détection utilisée, commençant par le système ID/DD, après le système à détection cohérente qui fait l'objectif de ce chapitre, la transmission optique cohérente fait référence aux systèmes de communication optique qui s'applique des formats de modulation d'ordre supérieur côté émetteur et détection cohérente utilisant laser oscillateur et traitement numérique du signal (DSP) côté récepteur.

Nous sommes intéressés en particulier à l'étude des différents blocs utilisés, tout en mettons en évidence le rôle de bloc de DSP, qui joue un rôle très important pour la compensation d'effets linéaires et non linéaires qui participent à la distorsion de signal transmit aux cours de la fibre optique et par conséquence dégradants les performances du système.

Pour le troisième chapitre, Nous avons réalisé une simulation sous « Matlab » d'une chaîne de transmission à base d'un récepteur cohérent. Le procédé employé consiste à modifier les paramètres des composants de la chaîne en fonction de la puissance de transmission et de longueur de fibre, et la modulation choisie (QAM, DPSK) en présence et en absence de différents facteurs perturbants tel que la PMD, la CD et le bruit avec l'utilisation de filtre de compensation de distorsion comme la CMA et LMS, tout en essayant de maintenir les performances globales de la liaison.

Les résultats de simulation mettent en évidence le rôle très important de bloc de DSP qui est utilisé pour la compensation de effets linéaires et non linéaires, ainsi que l'importance des choix de modulations avancées.

L'utilisation de ces modulations avancées est rendue possible grâce à la détection cohérente qui a suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années par la communauté des communications optiques.

L'association des formats de modulation multi-niveaux en amplitude et en phase (QAM : Quadrature Amplitude Modulation) ainsi que les modulations par déplacement de la phase avec la détection cohérente va aussi contribuer à l'augmentation de la densité spectrale d'information.

**REFERENCE ET  
BIBLIOGRAPHIE**

### Référence et Bibliographie

- [1] Jean-Louis VERNEUIL. « Simulation de systems de telecommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES, p 56; Le 21 November 2003, France.
- [2] <http://www.htrr.ups-tlse.fr/pedagogie/cours/fibre/welcome.htm>
- [3] Mr. Djellouli Mohamed- Mr. Hamouda Abdelmadjid. «L'amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux des télécommunications», Mémoire de Recherche Pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université Dr. Tahar Moulay-SAIDA; le: 02/06/2016.
- [4] Pr: Ammor Hassan. «Les fibres optiques», Cours de telecommunication, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs;2016,Maroc.
- [5] Nassima 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 ,p 22; le 25 octobre 2007.
- [6] Nassima 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 ,p 22; le 25 octobre 2007.
- [7] Jean-Louis VERNEUIL.« Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », these de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES, p61; Le 61 novembre 2003, France.
- [8] Sarah BENAMEUR. «La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable», thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILALI LIABES, SIDI BEL-ABBES-FACULTE DE TECHNOLOGIE, p47, le 30 Juin 2015.
- [9] Nassima 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,p23; le 25 octobre 2007.
- [10] Mr REDJDAL Kaci. «Étude d'une Chaîne de Télécommunication Optique», Mémoire de Fin de Cycle Mémoire de Fin de Cycle de Cycle En vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en télécommunication, Université Abderahmane Mira de Bejaia,p8; Année: 2012/2013.
- [11] Aida Seck. «Contribution à l'optimisation des systèmes de transmission optiques cohérents (Nx100 Gbit/s) utilisant le multiplexage en polarisation par des formats de modulation en phase et une conception de ligne limitant l'impact des effets non-linéaires», thèse de doctorat, CONJOINT TELECOM SUDPARIS et L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE;le 18/02/2014.
- [12] Hamid reza KHALEGHI. «Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteuses (CO-OFDM) », thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE; le 30 Novembre 2012.

- [13] Sarah BENAMEUR. «La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable», thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILALI LIABES, SIDI BEL-ABBES-FACULTE DE TECHNOLOGIE ,p51; le 30 Juin 2015.
- [14] Aida Seck. «Contribution à l'optimisation des systèmes de transmission optiques cohérents (Nx100 Gbit/s) utilisant le multiplexage en polarisation par des formats de modulation en phase et une conception de ligne limitant l'impact des effets non-linéaires», thèse de doctorat, CONJOINT TELECOM SUDPARIS et L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, p35; le 18/02/2014.
- [15] Omid Zia-Chahabi. «Techniques de traitement numérique du signal pour les systèmes de transmission optique ultra haut débit à détection cohérente», thèse doctorat, Université européenne de Bretagne avec l'Université de Bretagne-Sud, p15; 17 janvier 2013.
- [16] Sarah BENAMEUR. «La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable», thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILALI LIABES, SIDI BEL-ABBES-FACULTE DE TECHNOLOGIE, p51; le 30 Juin 2015.
- [17] Jean-Louis VERNEUIL. « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s»,thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES ,p20; Le 21 novembre 2003, France.
- [18] Sarah BENAMEUR. «La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable», thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILALI LIABES, SIDI BEL-ABBES-FACULTE DE TECHNOLOGIE, p51; le 30 Juin 2015.
- [19] EL AKRMI Soumaya. «Définition & Optimisation des Limitations Physiques d'un Système de Transmission Optique & Aspect Réseaux Connexes», thèse Doctorat 3ème Cycle, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA; Année : 2017, Algérie.
- [20] Jérôme LAURENT. «Communications optiques à très haut débit», EXAMEN PROBATOIRE, Conservatoire National des Arts Métiers de Paris, p9,3 décembre 2004, France.
- [21] Jérôme LAURENT. «Communications optiques à très haut débit», EXAMEN PROBATOIRE, Conservatoire National des Arts Métiers de Paris, p10 ,3 décembre 2004, France.
- [22] Sarah BENAMEUR. «La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable», thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILALI LIABES, SIDI BEL-ABBES-FACULTE DE TECHNOLOGIE, p53; le 30 Juin 2015.
- [23] Oluyemi Omololu Omomukuyo. «Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Access Networks», thèse de doctorat, University College London, April 2013.Uk.
- [24] Xu Zhang. «Digital Signal Processing for Optical Coherent Communication Systems »,these de doctorat, Technical University of Denmark,P 22; April 27th 2012,Danmark.
- [25] EL AKRMI Soumaya. «Définition & Optimisation des Limitations Physiques d'un Système de Transmission Optique & Aspect Réseaux Connexes», thèse Doctorat 3ème Cycle, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, p38; Année : 2017,Algerie.

- [26] Mr REDJDAL Kaci, «Étude d'une Chaîne de Télécommunication Optique», thèse Master en télécommunication, Université Abderahmane Mira de Bejaia ,p5; Année: 2012/2013, Algerie.
- [27] Mouloua Rafik. «Etude d'une liaison de télécommunication à base d'une fibre optique dopée en erbium», thèse Master en télécommunication Université Abderahmane Mira de Bejaia, p7, Juin 2013, Algérie.
- [28] Manuel Vítor Martingo. «Simulation of Digital Optical Receiver of Intensity Modulation and Direct Detection», thèse de doctorat, Coelho Instituto Superior Técnico Avenida Rovisco, Lisboa; Octobre 2009.
- [29] Govind P. Agrawal. «FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS », Fourth Edition, The Institute of Optics University of Rochester Rochester, New York.
- [30] Nassima BOUDRIOUA. «Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD », thèse de doctorat, Université Paul Verlaine – Metz; le 25 octobre 2007, P21, France.
- [31] Chahreddine Menouer Fouatih, Atrunlaye Tchenem, Abdellatif BOUYEDDA, Smail ABED\_FP, Djamel AZZAOUI «Les formats de modulation dans les communications par fibre optique», UE 342 : Mini-Projet, L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES, P56, Novembre 2015.
- [32] FOGNO OUAMBO, Baudelaire. «OPTIMISATION D'UN BANC DE TEST AMPLIFIÉ À 10 Gb/s POUR L'ÉTUDE DES TECHNOLOGIES AVANCÉES DE TRANSMISSION PAR FIBRE OPTIQUE », thèse de MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE, L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE MONTREAL, P14 , LE 15 JANVIER 2008, Canada.
- [33] Hamidreza KHALEGHI. «Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteuses (CO-OFDM) » thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE, P56, le 30 Novembre 2012, France.
- [34] Houda 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; Le 13 octobre 2010, France.
- [35] Houda 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, P12; Le 13 octobre 2010, France.
- [36] Jean-Louis VERNEUIL. «Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s», thèse de doctorat, L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES ,P32, 21 novembre 2003, France.
- [37] Omid Zia-Chahabi. «Techniques de traitement numérique du signal pour les systèmes de transmission optique ultra haut débit à détection cohérente», thèse doctorat, Université européenne de Bretagne avec l'Université de Bretagne-Sud, p4; 17 janvier 2013.
- [38] Gabriel Charlet. «Etude des formats de modulation et des méthodes de détection pour les transmissions multiplexées en longueur d'onde sur fibre optique au débit de 40Gb/s et 100Gb/s », thèse de doctorat, Université Paris Sud 11, P 31, le 2 février 2011, France.

- [39] Chahreddine Menouer Fouatih , Atrunlaye Tchenem , Abdellatif BOUYEDDA ,Smail ABED\_FP ,Djamel AZZAOUÏ «Les formats de modulation dans les communications par fibre optique», UE 342 : Mini-Projet, L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES P50 ;Novembre 2015
- [40] Jean-Louis VERNEUIL. «Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s», these de doctorat, L'UNIVERSITE DE LIMOGES, P90, 21 novembre 2003,France
- [41] Hamidreza KHALEGHI. «Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteuses (CO-OFDM) » thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE, P68, le 30 Novembre 2012,France.
- [42] Nassima BOUDRIOUA.«Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD », thèse de doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, P93, le 25 octobre 2007,France.
- [43] Jean-Louis VERNEUIL. «Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s»,these de doctorat, L'UNIVERSITE DE LIMOGES, P 97 ; 21 novembre 2003,France.
- [44] Aida Seck. «Contribution à l'optimisation des systèmes de transmission optiques cohérents (Nx100 Gbit/s) utilisant le multiplexage en polarisation par des formats de modulation en phase et une conception de ligne limitant l'impact des effets non-linéaires», thèse de doctorat, CONJOINT TELECOM SUDPARIS et L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, le 18/02/2014.
- [45] Hamidreza KHALEGHI. «Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteuses (CO-OFDM)», thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE; le 30 Novembre 2012.
- [46] Jean-Louis VERNEUIL. «Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s»,these de doctorat, L'UNIVERSITE DE LIMOGES, P99 ; 21 novembre 2003, France.
- [47] Jean-Louis VERNEUIL. «Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s», these de doctorat, L'UNIVERSITE DE LIMOGES, P100 ; 21 novembre 2003,France.
- [48] Melle Imane CHIALI. «Etude d' une transmission d' un signal modulé directement par une source optique laser à un débit de 10 Gbit/s», these master, Université Abou-Bekr Belkaid, p35, Tlemcen.
- [49] Ahmed I. Abd El-Rahman. «Advanced Digital Modulation Formats For Optical Coherent Transmission Systems», these de doctorat, Queen's University Kingston, Ontario, p 8, May 2019, Canada.
- [50] Ahmed I. Abd El-Rahman. «Advanced Digital Modulation Formats For Optical Coherent Transmission Systems», these de doctorat, Queen'sUniversity Kingston, Ontario; May 2019, Canada.
- [51] David Samuel Millar. «Digital Signal Processing for Coherent Optical Fibre Communications», these de doctorat, University College London, P 30, England.

- [52] Ali Bakhshali. «Nonlinearity Compensation for NextGeneration Coherent Optical Fiber Communication Systems », these de doctorat, Queen's University Kingston, Ontario, P 50, September 2017, Canada.
- [53] Ali Bakhshali. «Nonlinearity Compensation for NextGenerationCoherent Optical Fiber Communication Systems », these de doctorat, Queen'sUniversity Kingston, Ontario; September 2017, Canada.
- [54] Fogno Ouambo, baudelaire. «optimisation d'un banc de test amplifié à 10 gb/s pour l'étude des technologies avancées de transmission par fibre optique », thèse de maîtrise en génie électrique, l'école de technologie supérieure montreal, p81 ,15 janvier 2008, canada.
- [55] Jean-François LARCHANCHE. «Etudes pour la réalisation d'un modulateur électro-optique à ondes progressives sur polymères »,these de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, le 24 janvier 2001.
- [56] CableLabs. «P2P Coherent Optics Physical Layer 1.0 Specification», Cable Television Laboratories, Inc, P2PCO-SP-PHYv1.0-I02-190311, March 11, 2019.
- [57] Omid Zia-Chahabi. «Techniques de traitement numérique du signal pour les systèmes de transmission optique ultra haut débit à détection cohérente», thèse doctorat, Université européenne de Bretagne avec l'Université de Bretagne-Sud,p7; 17 janvier 2013.
- [58] Meng Qiu. «Advanced Digital Signal Processing for Next-Generation Coherent Optical Communication Systems», these de doctorat, McGill University Montreal,p13, February 2017.
- [59] Meng Qiu. «Advanced Digital Signal Processing for Next-Generation Coherent Optical Communication Systems»,these de doctorat, McGill University Montreal,p14, February 2017.
- [60] Aida Seck. «Contribution à l'optimisation des systèmes de transmission optiques cohérents (Nx100 Gbit/s) utilisant le multiplexage en polarisation par des formats de modulation en phase et une conception de ligne limitant l'impact des effets non-linéaires», thèse de doctorat, conjoint telecom sudparis et l'universite pierre et marie curie,p 47;le 18/02/2014.
- [61] Aida Seck. «Contribution à l'optimisation des systèmes de transmission optiques cohérents (Nx100 Gbit/s) utilisant le multiplexage en polarisation par des formats de modulation en phase et une conception de ligne limitant l'impact des effets non-linéaires»,these de doctorat, Institut National des Télécommunications, 6 Mar 2015,France.
- [62] Oriol Bertran Pardo. «Utilisation de la détection cohérente pour les systèmes de transmission optique à 40 GB/s ET 100 GB/s », these de doctorat, Télécom ParisTech,P 95; 5 Mar 2012,France.
- [63] Ali Bakhshali. «Nonlinearity Compensation for NextGenerationCoherent Optical Fiber Communication Systems », these de doctorat, Queen'sUniversity Kingston, Ontario, P51, September 2017, Canada.
- [64] Ali Bakhshali. «Nonlinearity Compensation for NextGenerationCoherent Optical Fiber Communication Systems », these de doctorat, Queen'sUniversity Kingston, Ontario ,P 50; September 2017, Canada.

- [65] Marco Mussolin. «Digital Signal Processing Algorithms for High-Speed Coherent Transmission in Optical Fibers», these de doctorat, Università degli studi di Padova, P1, Anne 2009/2010, Italie.
- [66] Xu Zhang. «Digital Signal Processing for Optical Coherent Communication Systems », these de doctorat, Technical University of Denmark, P 25; April 27th 2012, Danmark.
- [67] Gabriel Charlet. «Etude des formats de modulation et des méthodes de détection pour les transmissions multiplexées en longueur d'onde sur fibre optique au débit de 40Gb/s et 100Gb/s », these de doctorat, Université paris sud 11, P 2; le 2 février 2011, France.
- [68] Tianhua Xu. «Digital Signal Processing for Optical Communications and Networks», project GRIFFON, No. 324391, University College London, Chapter 15, p299, 2017 United Kingdom.
- [69] Jian jun, Yu Xinying Li «Digital Signal Processing for High-Speed Optical Communication», p3, April 2018 , [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com)
- [70] Jianjun Yu Xinying Li «Digital Signal Processing for High-Speed Optical Communication», p5, April 2018 , [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com)
- [71] <https://www.worldscientific.com> .
- [72] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre\\_a\\_reponse\\_impulsionnelle\\_finie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_a_reponse_impulsionnelle_finie) .
- [73] Xu Zhang. «Digital Signal Processing for Optical Coherent Communication Systems », these de doctorat, Technical University of Denmark, P 25, April 27th 2012, Danmark.
- [74] Marco Mussolin. «Digital Signal Processing Algorithms for High-Speed Coherent Transmission in Optical Fibers», these de doctorat, Università degli studi di Padova , P 26; Anne 2009/2010, Italie.
- [75] Oriol Bertran Pardo. «Utilisation de la détection cohérente pour les systèmes de transmission optique à 40 GB/s ET 100 GB/s », these de doctorat, Télécom Paris Tech, P 101; 5 Mar 2012, France.
- [76] Jianjun Yu Xinying Li «Digital Signal Processing for High-Speed Optical Communication», p6, April 2018 , [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com) .
- [77] Omid Zia-Chahabi. «Digital Signal Processing for Optical Coherent Communication Systems », these de doctorat, Ecole Doctorale – SICMA, P 23; 17 janvier 2013, France.
- [78] Leonardo Marcon. «Optimization of digital signal processing routines for high speed coherent transmissions», Cours de maîtrise en génie des telecommunications, p19; anne 2015/2016, Italie.
- [79] Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών. «Coherent Optical Systems » PCRL photonics communications research laboratory, p42
- [80] Jones, Rasmus Thomas. «Machine Learning Methods in Coherent Optical Communication systems», Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, P24, 2019, Danmark.
- [81] Leonardo Marcon. «Optimization of digital signal processing routines for high speed coherent transmissions», Cours de maîtrise en génie des telecommunications, P2, anne 2015/2016 , Italie.
- [82] Jian jun, Yu Xinying Li «Digital Signal Processing for High-Speed Optical Communication», p6, April 2018 , [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com) .
- [83] Jian jun, Yu Xinying Li «Digital Signal Processing for High-Speed Optical Communication», p7, April 2018 , [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com) .

- [84] Leonardo Marcon. «Optimization of digital signal processing routines for high speed coherent transmissions», Cours de maîtrise en génie des telecommunications, P 23, anne 2015/2016, Italie.
- [85] MehrezSelmi. «Outils avancés de traitement de signal pour les systèmes de communications optiques utilisant les formats de modulation d’amplitude en quadrature (QAM)», these de doctorat,TélécomParisTech, 26 Octobre 2011,France.
- [86] JianjunYuXinying Li «Digital Signal Processing for High-Speed Optical Communication», p7, April 2018, [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com)
- [87] Mehrez Selmi. «Outils avancés de traitement de signal pour les systèmes de communications optiques utilisant les formats de modulation d’amplitude en quadrature (QAM)», these de doctorat,TélécomParisTech, 26 Octobre 2011,France.
- [88] JianjunYuXinying Li «Digital Signal Processing for High-Speed Optical Communication», p18, April 2018, [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com)
- [89] Ali Bakhshali. «Nonlinearity Compensation for NextGenerationCoherent Optical Fiber Communication Systems », these de doctorat, Queen’sUniversity Kingston, Ontario, P57, September 2017, Canada.
- [90] Marco Mussolin. «Digital Signal Processing Algorithms for High-Speed Coherent Transmission in Optical Fibers»,these de doctorat, Universita de glistudi di Padova ,P 32, Anne 2009/2010, Italie.
- [91] Tianhua Xu. «DSP based Chromatic Dispersion Equalization and Carrier Phase Estimation in High Speed Coherent Optical Transmission Systems », these de doctorat, Royal Institute of Technology (KTH)Stockholm, 2012, Sweden.

**ANNEX**

### 1- Taux d'erreur binaire (BER) :

Le taux d'erreur binaire constitue le paramètre primaire décrivant la qualité de la transmission numérique. Il se définit comme le rapport entre les bits erronés et le nombre total de bits reçus. Ce taux détermine le nombre d'erreurs apparues avant la modulation et juste après la démodulation, il augmente à cause des perturbations : équipement ou réseau défectueux, pointage incorrect d'une antenne, longueur de canal, etc.

### 2- Rapport signal sur bruit (SNR)

Ce terme fait référence au signal démodulé perçu après le processus de démodulation. Le bruit total est celui extrait du réseau de transmission plus le bruit intégré au signal de modulation sous la forme de bruit d'amplitude, de bruit phase et d'interférence inter symboles ainsi que d'autres dégradations de la modulation. On le calcule à l'aide de l'une ou l'autre des formules représentées ci-dessous :

$$SN_{dB} = 10 \log \frac{P_s}{P_N} \quad (21)$$

$$SN = \frac{P_s}{P_N} \quad (22)$$

Avec :

$P_s$  : Puissance du signal en W.

$P_N$  : Puissance de bruit en W.

### 3- Le Bruit

Plusieurs types de bruits apparaissent dans les systèmes de communication optiques tel que :

Un laser à semiconducteur présente un bruit en  $1/f$  à la fois sur sa fréquence et sur son amplitude (RIN), et ces deux composantes sont susceptibles de se retrouver converties autour de la fréquence RF transmise.

**Le bruit en  $1/f$  des composants actifs** : est converti près de la porteuse et contribue à dégrader la pureté spectrale du signal transmis.

**Le bruit d'amplitude du laser (RIN)** : est naturellement converti en fluctuations d'amplitude électrique par la photodiode ; il peut être également converti en bruit de phase RF par un élément non-linéaire (photodiode, amplificateur).

**Le bruit de fréquence** : n'est pas détecté dans une liaison courte, mais peut être converti dans une liaison de plusieurs kilomètres de par la dispersion fréquentielle de la fibre optique, ou encore à cause de phénomènes interférométriques parasites.

**Le bruit de la photodiode** : Comme tout composant actif parcouru par un courant, la photodiode génère un bruit basse fréquence en excès, ce bruit est plus controversé.

Certains auteurs ont parfois attribué à ce composant l'essentiel du bruit de phase de la liaison, alors qu'il est très difficile de séparer l'influence du laser de celle de la photodiode sur une mesure de liaison complète.

#### 4- Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est une méthode pour représenter et analyser un signal numérique haut débit qui permet de visualiser et de déterminer rapidement les principaux facteurs de qualité électrique du signal. Il est construit à partir d'une forme d'onde numérique en superposant les courbes correspondant à chaque bit sur un même graphe avec l'amplitude du signal en Y (axe vertical) et le temps en X (axe horizontal). En répétant l'opération sur un grand nombre d'échantillons de signal, le graphe obtenu fournit les statistiques moyennes du signal et présente l'aspect d'un œil. L'ouverture de l'œil correspond à une période de 1 bit et constitue la largeur UI (Unit Interval, ou intervalle unitaire) du diagramme œil

#### 5- Facteur de qualité

Le signal mesuré à l'entrée du canal de l'oscilloscope contient une contribution due au signal utile ainsi qu'un apport en bruit dû à l'ensemble des éléments de la chaîne de transmission. Dans le diagramme de l'œil qui retrace le signal mesuré, le signal utile est représenté par les niveaux moyens  $\mu_1$  et  $\mu_0$ . Le bruit représente les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens, il est quantifié en combinant les écarts-types  $\mu_1$  et  $\mu_0$ . On définit donc le facteur Q à partir de relevé du diagramme de l'œil par:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\delta_1 - \delta_2} \quad (23)$$