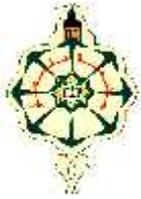




République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS



## Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de  
**MASTER en Télécommunication**



Option : Réseaux et Systèmes de Télécommunications (RST)

**Présenté par**

Melle BENGHALEM Fatima Zahra

Melle BENHAMED Fatima Zahra

**THEME**

*Etude d'un système WDM DPSK-NRZ*

**Soutenu en Mai 2015 devant un jury composé de**

Mr O.SEDDIKI

Président

Pr à l'université de Tlemcen

Mr B. BENADDA

Examinateur

M. C. à l'université de Tlemcen

Mr. A. R. BORSALI

Encadreur

M. C. à l'université de Tlemcen

*Année Universitaire : 2014/2015*

# Dédicaces

*À ma mère en témoignage de son dévouement, sa patience, son soutien, sa protection et son encouragement depuis ma naissance. Vous étiez toujours présente quand j'avais besoin de vous, je n'aurais pu achever ce travail sans votre générosité et votre affection. Recevez à travers ce travail, toute ma gratitude et mes profonds sentiments et merci.*

*À la mémoire de mon défunt père que je porte toujours dans mon cœur*

*Mes chères sœurs*

*Mes chers frères*

*Toute ma famille*

*Tous mes amis*

*Et à mon binôme BENGHALEM Fatima Zahra*

BENGHALEM Fatima Zahra

*Je dédie cet humble mémoire à mes parents pour leurs encouragements, leur grande compréhension et pour leur inconditionnel soutien très souvent indispensable tout le long de mes études.*

*À mon cher frère, ma chère sœur.*

*À toute ma famille, à tous mes amis en particulier ceux qui se reconnaîtront pour m'avoir encouragée. Enfin à mon binôme BENGHALEM Fatima Zahra. Qu'il leur fasse sentir l'expression de ma profonde gratitude.*

BENHAMED Fatima Zahra

# *Remerciement*

*Ce travail a été effectué à la faculté de technologie, Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen.*

*Avant tout, on remercie Allah de nous avoir aidées à accomplir ce travail.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadreur, **Mr AHMED RIAD BORSALI**, maitre de conférences à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui nous ont permis de mener à terme la réalisation de ce modeste travail. Qu'il trouve ici une petite marque de notre profonde reconnaissance et gratitude.*

*On désire remercier vivement le professeur **O.SEDDIKI**, professeur à la faculté de technologie de Tlemcen, qui nous a fait honneur de présider le jury.*

*Nous remercions également Monsieur **B.BENADDA**, Maitre de conférences à la faculté de technologie de Tlemcen, pour nous avoir honorés de sa présence en acceptant d'examiner ce travail.*

*Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.*

# SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre1 : Etude d'une chaine de transmission par fibre optique</b>	
1.1. Introduction.....	3
1.2. Système de transmission par fibre optique.....	3
1.3. La partie émission.....	3
1.3.1. Les diodes DEL.....	4
1.3.1.1. Emission spontanée.....	4
1.3.2. Les Diodes Laser.....	4
1.3.2.1. Emission stimulé.....	5
1.4. Le canal de transmission.....	6
1.4.1. Fibre optique.....	6
1.4.2. Principe de fonctionnement de la fibre optique.....	6
1.4.3. Classification des fibres optiques.....	7
a. Fibre monomode.....	7
b. Fibre multimode.....	7
b.1. Fibre multimode a saut d'indice.....	7
b.2. Fibre a gradient d'indice.....	8
1.4.4. L'atténuations.....	8
1.4.5. La dispersion.....	9
1.4.5.1. Dispersion intermodale .....	9
1.4.5.2. Dispersion chromatique.....	10
1.5. La partie réception.....	10
1.5.1. La photodiode PIN.....	10
1.5.2. Photodiode à avalanche PDA.....	12
1.6. Multiplexage/ démultiplexage.....	12
1.6.1. Comparaison des multiplexages TDM et WDM.....	13
1.7. Principes du multiplexage en longueur d'onde.....	14
1.7.1. Fonctionnement générale.....	15
1.7.2. Les composants spécifiques d'un réseau WDM.....	16
1.7.2.1. Brasseur des conteneurs.....	16

1.7.2.1.1. Les différents types d'OXC suivant les niveaux de conteneurs.....	16
a. Brassage des fibres.....	16
b. Brassage des bandes.....	16
c. Brassage des longueurs d'onde.....	17
1.7.2.1.2. Les fonctionnalités des brasseurs.....	17
1.7.2.2. Les multiplexeurs à insertion/extraction optique.....	17
1.8. Les différentes technologies WDM.....	18
1.8.1. Les caractéristique du D-WDM et de l'U-DWDM.....	19
1.8.1.1 Les éléments constituent une liaison optique DWDM.....	19
1.8.1.2 Les effets non linéaires les plus néfastes.....	20
1.8.2. Les caractéristique du C-WDM.....	20
1.8.3. Combinaison CWDM/DWDM.....	21
1.9. Conversion de longueurs d'onde dans un réseau tout optique.....	22
1.10. Conclusion.....	22

## **Chapitre2 : Modulation DPSK**

2.1. Introduction.....	24
2.2. Présentation des formats de modulation.....	26
2.3. Modulation par saut de phase (PSK).....	27
2.3.1. La modulation "PSK-2" : BPSK.....	30
a. Chronogramme de la "PSK-2" : BPSK.....	31
b. Modulation et démodulation.....	31
2.4. Modulation différentielle par saut de phase (DPSK).....	32
2.5. Définition du modulateur Mach-Zehnder (MZ).....	33
2.6. Conclusion .....	34

## **Chapitre 3 : Etude d'une liaison DPSK-NRZ**

3.1. Introduction.....	36
3.2. Présentation du logiciel de simulation.....	36
3.3. Applications d'Optisystem.....	37
3.4. Principales caractéristiques du logiciel Optisystem.....	37
3.5. Avantage du logiciel OptiSystem.....	38

3.6. Description du schéma général de la liaison DPSK-NRZ.....	38
3.7. Critères de qualité d'une transmission.....	40
3.7.1. Le taux d'erreur binaire.....	40
3.7.2. Le facteur de qualité.....	41
3.8. Description de l'émetteur optique.....	41
3.8.1. Différents types de codage.....	43
a. Codages RZ, NRZ.....	43
b. Codage de Manchester.....	43
3.9. Partie réception.....	46
3.10. Effet de variation de la longueur de la fibre optique.....	49
3.11. Effet de variation de la puissance émise.....	50
3.12. Effet de variation du débit.....	52
3.13. Diagramme de l'œil.....	53
3.14. Conclusion.....	54
Conclusion générale.....	57
Bibliographie.....	59

## TABLES DES FIGURES

### Chapitre 1

Figure 1.1 : processus d'émission spontanée.....	4
Figure 1.2 : Niveau d'énergie et processus de transition.....	5
Figure 1.3 : Constitution générale d'une fibre optique.....	6
Figure 1.4 : angle d'acceptance.....	6
Figure 1.5 : La fibre monomode.....	7
Figure 1.6 : La fibre multimode à saut d'indice.....	8
Figure 1.7 : La fibre multimode à gradient d'indice.....	8
Figure 1.8 : Atténuation d'une fibre optique.....	9
Figure 1.9 : dispersion intermodale.....	10
Figure 1.10 : Structure d'une photodiode PIN.....	11
Figure 1.11 : Création d'une paire d'électron-trous dans une jonction PN.....	11
Figure 1.12 : Photodiode à avalanche (APD).....	12
Figure 1.13 : Multiplexage/ démultiplexage.....	13
Figure 1.14 : Principe de multiplexage en longueur d'onde.....	15
Figure 1.15 : Extraction de longueurs d'ondes.....	18
Figure 1.16 : Peigne des fréquences en DWDM.....	19
Figure 1.17 : Combinaison CWDM/DWDM.....	22

### Chapitre 2

Figure 2.1 : Schéma d'un système de transmission numérique.....	24
Figure 2.2 : Utilisation des différents formats de modulations à 40 Gbits/s.....	27
Figure 2.3 : Modulation PSK.....	28
Figure 2.4 : Constellation des symboles en modulation de phase PSK-M.....	30
Figure 2.5 : Constellation de la modulation de phase PSK-2 (BPSK).....	30
Figure 2.6 : Chronogramme de la modulation de phase PSK-2 (BPSK).....	31
Figure 2.7 : Modulateur PSK-2 (BPSK).....	31
Figure 2.8 : Démodulateur PSK-2 (BPSK).....	31
Figure 2.9 : Signaux pré encodée pour DPSK. ....	32
Figure 2.10 : Modulateur DPSK.....	33
Figure 2.11 : schéma d'un interféromètre de Mach Zehnder.....	33

### Chapitre 3

Figure 3.1 Bibliothèque des composants.....	36
Figure 3.2 : Interface d'utilisateur graphique (GUI).....	37
Figure 3.3 : schéma général du système.....	39
Figure 3.4 : Composants dans la partie émission.....	42
Figure 3.5 : (a) format NRZ (b) format RZ.....	43
Figure 3.6 : Codage de Manchester.....	44
Figure 3.7 : Spectre du signal laser.....	44

---

Figure 3.8 : Spectre du signal en provenance du modulateur de Mach Zehnder.....	45
Figure 3.9 : Sortie du deuxième modulateur de Mach Zehnder.....	45
Figure 3.10 : Signal après filtrage à l'émission.....	46
Figure 3.11 : Composant dans la partie réception.....	46
Figure 3.12 : Signal après filtrage Gaussien à la réception .....	47
Figure 3.13 : Sortie de l'interféromètre MZ.....	47
Figure 3.14 : Sortie des deux photodiodes PIN.....	48
Figure 3.15 : Spectre du signal en provenance du filtre de Bessel.....	49
Figure 3.16 : Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre.....	50
Figure 3.17 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la longueur de la fibre....	50
Figure 3.18 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance émise.....	51
Figure 3.19 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance émise.....	51
Figure 3.20 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit.....	52
Figure 3.21 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit.....	53
Figure 3.22. Diagramme de l'œil du système avec les paramètres optimaux.....	54

---

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Les progrès réalisés dans le domaine des télécommunications sont tellement importants et rapides, que les structures des systèmes de transmission connaissent de véritables bouleversements. C'est pourquoi il nous a paru intéressant de commencer ce mémoire par une description des différentes couches constituant les réseaux de télécommunications, ainsi que les différentes techniques employées. Une description de la plupart des composants présents dans ces liaisons sur fibre optique complète les bases à posséder pour aborder cette thèse et aide à la compréhension de la conception d'un système de transmission.

Dans le premier chapitre nous présenterons la chaîne de transmission par fibre optique, qui est constituée par les émetteurs optiques (diodes DEL, diode laser) et récepteurs optiques (photodiode PIN, à avalanche). Nous allons nous intéresser également au support de transmission (fibre optique) et son phénomène de propagation ainsi que les différents types de fibre optique existant. Nous allons présenter la technologie Wavelength Division Multiplexing avec une comparaison avec Time Division Multiplexing et le principe de fonctionnement de cette technologie.

Dans le deuxième chapitre nous allons présenter tout d'abord les deux types de modulation (modulation directe, modulation externe) ensuite présentation des formats de modulation. Enfin, on va s'intéresser à la modulation par saut de phase (PSK) et différentielle (DPSK).

Le troisième chapitre, à pour objectif de présenter le logiciel de simulation OptiSystem, utilisé pour tester la liaison DPSK-NRZ avec étude détaillée des composants. Cela nous a été d'une grande aide pour connaître le système en termes de longueur de liaison, la puissance optique émise et de débit nécessaire pour une telle transmission.

# Chapitre 1

---

## Etude d'une chaîne de transmission par fibre optique

---



## 1.1. Introduction

Les systèmes de transmission par fibre optique sont les seuls actuellement, capables de répondre par leur capacité élevée à la demande croissante du flux de données et particulier les applications multimédia grand public.

Dans ce premier chapitre nous allons nous pencher sur les généralités des transmissions par fibres optiques. Ainsi nous présenterons la description des différents types des fibres optiques.

La technologie Wavelength Division Multiplexing ou WDM, une méthode de transmission apparue dans les années 90, est née de l'idée d'injecter simultanément dans la même fibre optique plusieurs signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais à des longueurs d'ondes distinctes, ce qui correspond plus simplement à un multiplexage de ces longueurs d'ondes.

## 1.2. Système de transmission par fibre optique

Dans un système de transmission sur fibre optique on trouve :

- L'interface optique d'émission a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Il contient principalement le composant optoélectrique d'émission, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL).
- Le canal de transmission permet au récepteur de recevoir l'information émise par l'émetteur par de nombreux supports utilisés. Pour donner une idée de la qualité des supports, disons que les fibres optiques offrent actuellement le meilleur compromis fiabilité/performance.
- L'interface optique de réception contient une photodiode qui convertit le signal optique reçu en signal électrique. Elle est suivie d'un préamplificateur, dont la réalisation doit être soignée car c'est le bruit de celui-ci qui limite la puissance optique minimale détectable, et donc la portée du système.

## 1.3. La partie émission

On distingue classiquement les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL) selon le type de mécanisme mis en jeu pour l'émission de la lumière.

### 1.3.1. Les diodes DEL

Une diode électroluminescente abrégée sous les sigles DEL ou LED (light emitting diode) est un composant optoélectronique qui émet de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une DEL ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens (le sens passant, comme une diode classique, l'inverse étant le sens bloquant) de plus elle produit un rayonnement monochromatique ou poly chromatique incohérent à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse. Dans le cas d'une diode DEL la lumière est émise par l'émission spontanée [1].

#### 1.3.1.1. Emission spontanée

Lorsque la jonction PN est soumise à une tension directe, le courant électrique peut circuler. Le côté plus permet l'injection de trous et le côté moins l'injection des électrons. L'injection de trous dans la zone N et des électrons dans la zone P permet l'émission des photons par la recombinaison radiative électrons-trous. Emission de ces photons est appelée émission spontanée.

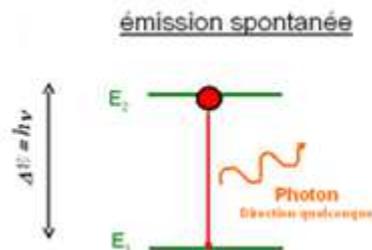


Figure 1.1 : processus d'émission spontanée.

L'énergie de ce photon est :  $E = E_2 - E_1 = h\nu$  (1.1)

Avec :  $h$  : constante de Planck.  $\nu$  : fréquence de radiation émise.

### 1.3.2. Les Diodes Laser

Le mot LASER, sigle de l'expression anglaise Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. L'effet laser ne fut démontré qu'en 1960 par MAIMAN.

Une diode laser est un composant optoélectronique à base de matériaux semi-conducteurs. Elle émet de la lumière monochromatique cohérente (une puissance optique) destinée, entre autres, à transporter un signal contenant des informations (dans le cas d'un système de télécommunications) ou à apporter de l'énergie lumineuse pour le pompage de

certaines lasers (lasers à fibre, laser DPSS) et amplificateurs optiques (OFA, Optical Fiber Amplifier). Deux notions peuvent résumer cet effet : amplification et contre-réaction.

Dans l'amplificateur : un laser s'apparente donc à un oscillateur. La contre-réaction optique est souvent obtenue en plaçant le milieu amplificateur dans une cavité optique (cavité de Fabry Pérot). Pour obtenir l'effet laser, il est nécessaire de privilégier l'émission stimulée au détriment des deux autres processus [1].

### 1.3.2.1. Emission stimulée

Si l'émission stimulée l'emporte sur l'absorption, le nombre de photons augmente au cours de la propagation du faisceau lumineux : le milieu est amplificateur.

Un laser est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée. En effet, dans un semi-conducteur, un électron peut passer d'un état à un autre de trois façons (Figure 1.2) :

- L'émission spontanée : De sa propre initiative, l'électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant un photon spontané.
- L'absorption : En absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé (électron dans la bande de conduction et trou dans la bande de valence).
- L'émission stimulée : Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident. On parle alors de lumière cohérente. Avec l'émission stimulée s'introduit la notion de gain ou d'amplification du rayonnement incident puisque, à partir d'un photon, on en obtient deux.

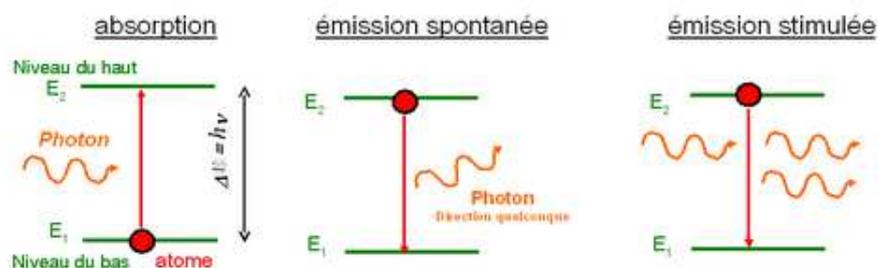


Figure 1.2 : Niveau d'énergie et processus de transition.

## 1.4. Le canal de transmission

### 1.4.1. Fibre optique

La fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. La fibre optique est un guide d'onde constitué de deux diélectriques concentriques [2] :

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

Généralement cette fibre est protégée par un revêtement externe. Voir la figure (1.3) :

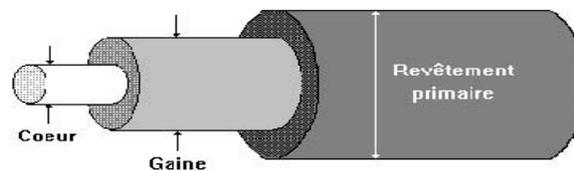


Figure 1.3 : Constitution générale d'une fibre optique.

### 1.4.2. Principe de fonctionnement de la fibre optique

Le principe de fonctionnement d'une fibre optique est basé sur multiples réflexions totales interne dans la lumière à la surface de séparation des deux milieux [3].

Si  $n_1 > n_2$  le rayon s'écarte de la normale.

Si  $\theta_1 > \text{arc sin}(n_2/n_1)$ , il y a réflexion totale.

Ce principe a été démontré par **Snell-Descartes** qui a établi la relation suivante :

$$n_1 \sin\theta = n_2 \sin\theta \quad (1.2)$$

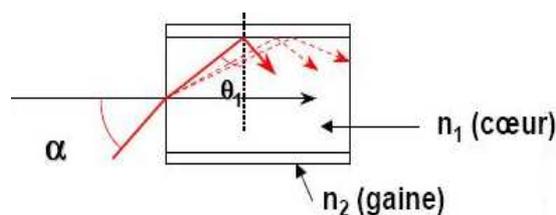


Figure 1.4 : angle d'acceptance.

Angle d'incidence maximal à l'entrée de la fibre, soit l'ouverture du cône d'acceptance appelée l'ouverture ON :

$$ON = \sin(\theta) = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (1.3)$$

### 1.4.3. Classification des fibres optiques

Il y a principalement deux types de fibre optique : monomode et multimode et cette dernière se divise en deux catégories : fibre multimode à saut d'indice et fibre multimode à gradient d'indice [4].

#### a. Fibre monomode

La fibre monomode est une fibre optique qui est conçue pour la transmission d'un seul rayon ou le mode de la lumière comme un support et est utilisée pour la transmission des signaux à longue distance. Pour les courtes distances, elle offre un débit de transmission plus élevé et une portée jusqu'à 50 fois supérieure à la fibre multimode. Le petit diamètre du cœur de cette fibre nécessite une grande puissance d'émission.



Figure 1.5 : La fibre monomode.

#### b. Fibre multimode

Les fibres multimodes sont caractérisées par un cœur de diamètre assez important ce qui engendrera une forte dispersion du signal. Donc, bien que faciles à connecter, on utilisera ce type de fibre uniquement pour des petits réseaux.

##### b.1. Fibre multimode à saut d'indice

C'est la plus ordinaire, elle consiste en un cylindre de réfraction  $n_1$  (cœur), entouré d'une gaine d'indice  $n_2$ . Une telle fibre s'appelle la fibre à saut d'indice et elle est souvent entourée d'un revêtement supplémentaire qui offre une protection mécanique et chimique.

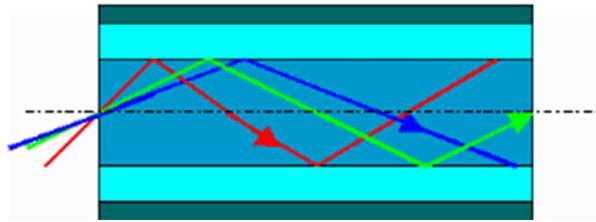


Figure 1.6 : La fibre multimode à saut d'indice.

### b.2. Fibre multimode a gradient d'indice

Ces fibres sont spécialement conçues pour les télécommunications. Leur cœur n'est plus homogène : la valeur de l'indice de réfraction décroît depuis l'axe jusqu'à atteindre la valeur de l'indice de la gaine. Par conséquent, le principe de propagation dans une fibre à gradient d'indice repose sur un effet de focalisation : le faisceau lumineux est continuellement dévié vers l'axe optique de la fibre. Par ailleurs, cette déviation oblige le signal optique à une forme d'un signal sinusoïdal.

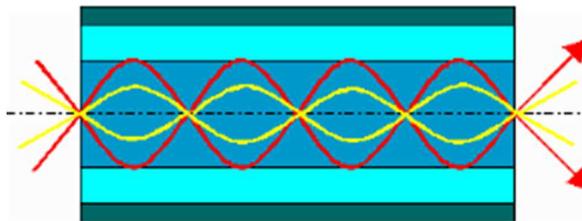


Figure 1.7 : La fibre multimode à gradient d'indice.

### 1.4.4. L'atténuation

L'affaiblissement ou l'atténuation de la fibre optique est due essentiellement à l'absorption et à la diffusion de la lumière dans le milieu diélectrique de la fibre. Les impuretés et les inhomogénéités dans le matériau sont des sources de perte de puissance optique transmise. La réduction de cette atténuation est donc avant tout une affaire de technologie et de méthode de production. La courbe typique de l'atténuation spectrale du matériau de fabrication de fibre optique (silice) est présentée sur la figure suivante :

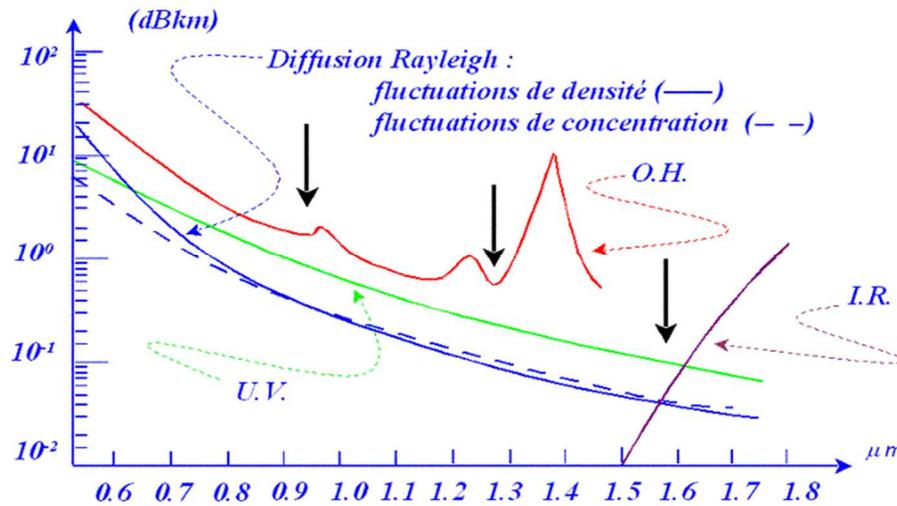


Figure 1.8 : Atténuation d'une fibre optique.

La valeur limite de l'affaiblissement est donnée par la loi de Rayleigh, qui affirme que la puissance optique absorbée décroît comme  $\frac{1}{\lambda^4}$ . Les pics de la courbe sont dus aux résonances des ions  $OH^-$  présents comme impuretés dans la fibre.

On remarque l'existence de trois fenêtres spectrales, régions où l'atténuation est minimale.

Les fibres optiques fonctionnent actuellement dans ces trois fenêtres : elles définissent donc les gammes d'ondes utilisées en communication optique. On les appelle « fenêtres optiques » [1].

### 1.4.5. La dispersion

La dispersion au sens large est un étalement ou un élargissement des pulses lumineux lors de leur propagation le long d'une fibre. Une dispersion trop importante augmente le taux d'erreur au niveau du récepteur [2].

#### 1.4.5.1. Dispersion intermodale

La cause principale de l'élargissement des impulsions dans les fibres optiques multimodes est la dispersion intermodale. Cet élargissement est provoqué par les différences des temps de parcours des rayons (ou des modes). La dispersion intermodale  $D_i$  est l'élargissement temporel maximum  $t$  d'une impulsion par unité de longueur de fibre. Dans le cas d'une fibre optique monomode, cette dispersion est nulle et ne sera donc pas prise en compte.

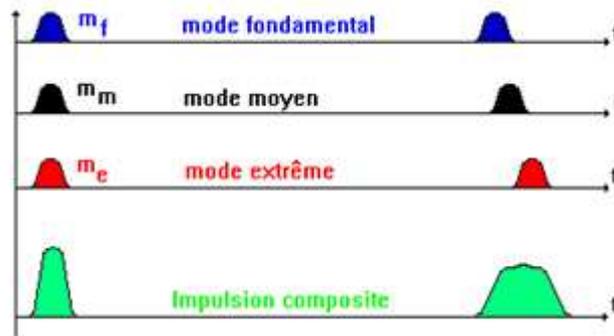


Figure 1.9 : dispersion intermodale.

### 1.4.5.2. Dispersion chromatique

Dans la bande passante des signaux transmis, l'atténuation peut être considérée comme Constante et les distorsions sont essentiellement représentées par la dispersion chromatique qui traduit la variation du temps de propagation de groupe en fonction de la fréquence(ou de manière équivalente de la longueur d'onde).

Le paramètre de dispersion chromatique ( $D$ ) est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km.

En fait, la dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion modale).

## 1.5. La partie réception

La partie réception est le dernier étage de la chaîne de transmission, elle a pour rôle de recevoir le signal optique provenant de la fibre et le convertir en un signal électrique pour en extraire les données transmises.

### 1.5.1. La photodiode PIN

Une photodiode est un composant essentiel dans les communications par fibres optique. Elle fonctionne en réception comme générateur de courant. Elle convertit, avec un certain rendement, la puissance optique  $P_{op}$  incidente en courant électrique  $I_{ph}$  qui est ainsi délivré par la photodiode. Ce courant est ensuite converti en tension par une résistance de charge  $R_l$  puis amplifié avant de subir un traitement électronique.

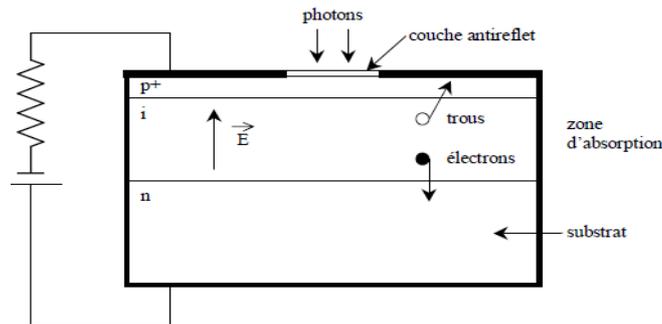


Figure 1.10 : Structure d'une photodiode PIN.

Les photodiodes PIN sont réalisées à partir d'une jonction PN polarisée en inverse. Dans une telle jonction, il existe une zone déserte (sans porteurs libres) où règne un champ électrique qui s'oppose au passage des porteurs majoritaires.

Lorsqu'un photon incident est absorbé, des paires de porteurs, sont générées aussi bien dans la zone déserte qu'en dehors de celle-ci (zone de diffusion).

Dans la zone déserte, les porteurs sont dissociés par le champ électrique qui déplace chaque porteur vers la région où il est majoritaire et crée ainsi un courant de déplacement.

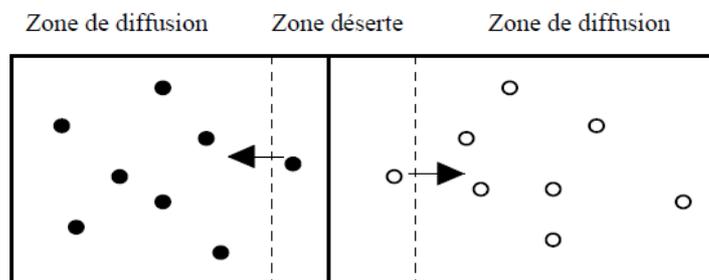


Figure 1.11 : Création d'une paire d'électron-trous dans une jonction PN.

Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode PIN sont la sensibilité et le courant d'obscurité.

La notion de sensibilité  $S_\lambda$  est le rapport entre la puissance lumineuse incidente  $P_{op}$  et le courant photogénéré  $I_D$  :

$$I_{ph} = S_\lambda \times P_{op} \quad (1.4)$$

Le photocourant  $I_{ph}$  est directement proportionnel à la puissance lumineuse incidente selon la relation [5].

$$I_{photogénère} = S_{\lambda} \times P_{op} + i_{abs} \quad (1.5)$$

### 1.5.2. Photodiode à avalanche PDA

En faisant croître le champ électrique dans la jonction PIN, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors et les porteurs se multiplient. Ce photodétecteur à gain interne est appelé photodiode à avalanche ou PDA (en anglais APD).

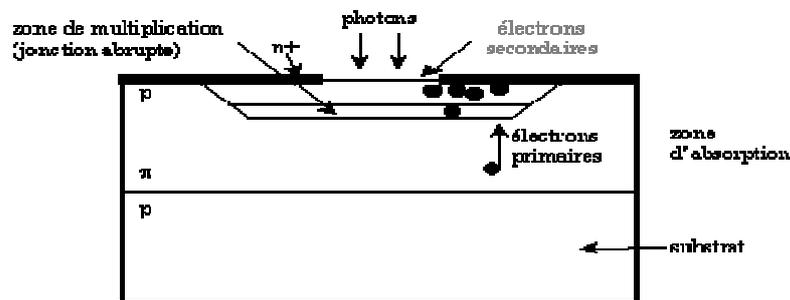


Figure 1.12 : Photodiode à avalanche (APD).

Lorsque le champ électrique existant dans la zone déserte est suffisamment intense (polarisation inverse) les porteurs accélérés par ce champ peuvent atteindre l'énergie d'ionisation du matériau et produire la rupture des liaisons de valence. Il y a, dans ce cas, création d'autres paires secondaire (électrons-trous) qui, dissociées par le champ interne, sont accélérées et accentuent le processus d'avalanche [5][6].

## 1.6. Multiplexage/ démultiplexage

Afin de limiter les risques d'engorgement des canaux de transmission utilisés, il convient de rendre multiples, ou "multiplexer", Le multiplexage est l'opération qui consiste à grouper plusieurs voies, attribuées chacune à une communication, de façon à les transmettre simultanément sur le même support physique (fibre optique, câble, fréquence porteuse d'une liaison radioélectrique, satellite, ...) sans qu'elles se mélangent ou se perturbent mutuellement. A la réception, un démultiplexage aussi parfait que possible doit permettre de séparer ces voies et de les restituer sous leur forme originale. Ce partage des ressources disponibles nécessite que chacune d'entre elles soit isolée des autres, il faut donc s'assurer de l'orthogonalité des ressources.

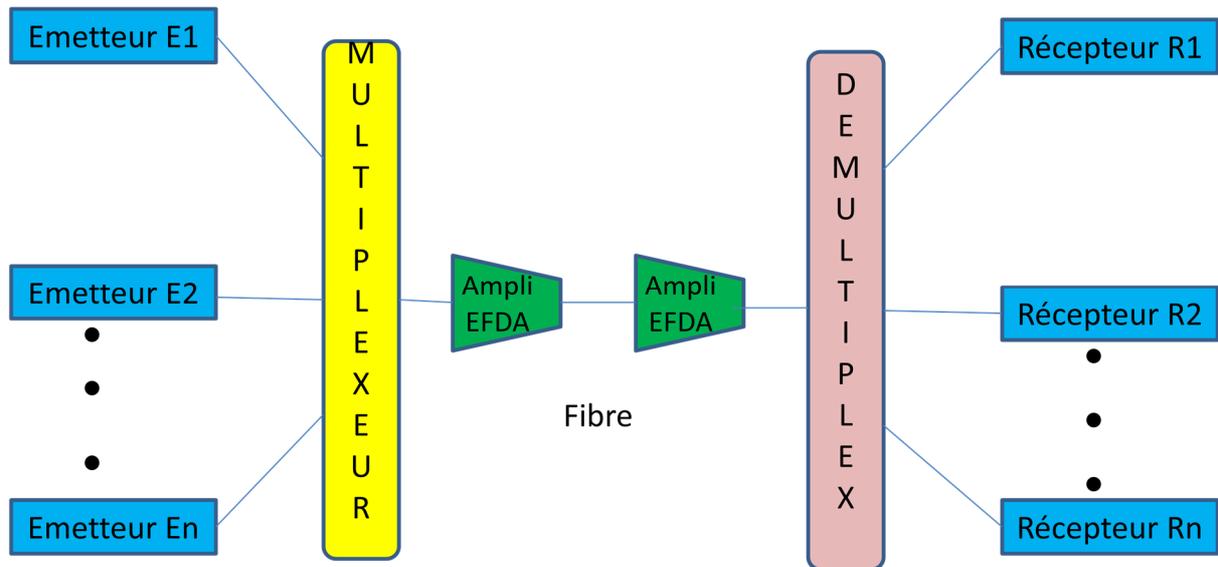


Figure 1.13 : Multiplexage/ démultiplexage.

Toutes ces liaisons peuvent être bilatérales (duplex).

Il existe essentiellement trois formes de multiplexage dans la gamme radiofréquence et hyperfréquence : le multiplexage fréquentiel ou spectral (FDM, Frequency Division Multiplex, ou FDMA, Frequency Division Multiple Access), le multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplex, ou TDMA) et le multiplexage de code (CDM, Code Division Multiplex, ou CDMA).

Dans les deux premiers cas, on fractionne en temps ou en fréquence un canal de transmission pour le répartir entre différents utilisateurs. Dans le troisième cas, ce sont les utilisateurs qui sont rendus orthogonaux entre eux. Ces différentes formes de multiplexage sont la plupart du temps combinées dans les systèmes existants, ainsi qu'avec le multiplexage "géographique" : si deux ensembles émetteur/récepteur sont suffisamment éloignés l'un de l'autre, ils peuvent utiliser la même fréquence.

Enfin, une nouvelle forme de multiplexage, spécifique à la propagation sur des fibres optiques, s'est récemment développée : le WDM (Wavelength Division Multiplex).

### 1.6.1. Comparaison des multiplexages TDM et WDM

Au premier abord, on pourrait penser que les deux approches de multiplexage optique TDM et WDM sont semblables. Elles le sont au niveau formel parce qu'elles permettent la superposition sur le même support physique de transmission de plusieurs canaux de

communication, identifiables selon leur décalage temporel pour TDM et selon leur longueur d'onde pour WDM. Cependant au niveau technologique l'approche TDM présente des inconvénients significatifs par rapport à l'approche WDM.

En premier lieu les canaux TDM ne sont pas transparents pour le débit de modulation ni pour le type de modulation. Ils sont uniquement modulables numériquement et leur débit est imposé par le multiplexeur temporel. A l'inverse, chaque canal WDM peut être modulé individuellement, numériquement ou analogiquement, en amplitude ou en phase. Le débit de chaque canal WDM peut en outre être choisi arbitrairement du moment que les spectres des signaux ne se recouvrent pas. Il en résulte donc une plus grande flexibilité.

Une autre caractéristique désavantageuse du multiplexage optique TDM provient du très haut débit du signal multiplexé qui résulte des agrégations des canaux entrelacés temporellement. Cette conséquence inhérente au multiplexage temporel constitue un inconvénient majeur pour les systèmes de transmission optiques lorsque le signal multiplexé se met à couvrir des dizaines de gigahertz. Le traitement électronique constitue alors un frein aux opérations de multiplexage et démultiplexage temporels. Alors que l'approche WDM effectue celles-ci optiquement et passivement. De plus le phénomène de dispersion limite d'autant plus la propagation du signal TDM multiplexé que son débit est important. Les débits moindres de chaque canal WDM permettent d'éviter ce problème.

Enfin, l'approche TDM souffre d'un manque d'extensibilité. L'addition d'un nouveau canal TDM nécessite une modification des décalages temporels et une resynchronisation des canaux déjà existants. Inversement, l'indépendance des canaux WDM autorise la création d'un nouveau canal simplement par l'ajout d'un émetteur laser et d'une fibre optique appropriés, sans affecter les autres canaux.

En conclusion l'approche WDM s'avère la technique de multiplexage préférentielle pour les systèmes de transmission optiques, en raison de la transparence, de la flexibilité et de l'extensibilité des canaux WDM [7].

### **1.7. Principe du multiplexage en longueur d'onde**

Le multiplexage WDM, multiplexage à répartition de longueur d'onde, repose sur une propriété physique de la lumière. En effet, tout comme les signaux électriques se propagent avec une fréquence propre, les signaux lumineux possèdent une longueur d'onde. Partant de ce constat, il paraît naturel que le multiplexage FDM utilisé sur les réseaux électriques ait son homologue pour les réseaux optiques.

Chaque train de signaux numériques, après multiplexage, est véhiculé sur sa propre longueur d'onde comme sur une seule fibre. Ces trains peuvent donc être de débits et de formats différents. De cette façon, on peut aisément augmenter le débit de transmission d'une fibre sans avoir à la remplacer par une autre.

La figure montre le principe du multiplexage en longueur d'onde :

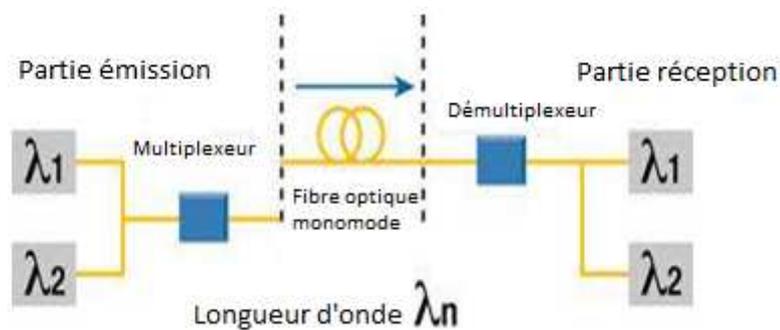


Figure 1.14 : Principe de multiplexage en longueur d'onde.

La précision du signal généré par le laser fait qu'il convient parfaitement pour le multiplexage WDM. La mise en œuvre du multiplexage WDM sur fibre monomode requiert l'utilisation de plusieurs lasers simultanément puisque chaque laser ne peut émettre que sur une unique longueur d'onde. Le signal émis par chacun d'eux va ensuite être envoyé sur la fibre, et ce indépendamment des autres signaux générés.

### 1.7.1. Fonctionnement générale

La technologie du WDM est représentée par deux terminaux et un lien optique monomode les reliant. Le premier est un multiplexeur, le second un démultiplexeur.

Le multiplexeur a pour rôle de changer les longueurs d'ondes des signaux entrant et de les multiplexer sur un seul canal. Pour changer les longueurs d'ondes entrantes, il est nécessaire d'utiliser un transpondeur. Lorsque des signaux arrivent au niveau du multiplexeur, il est possible qu'ils aient la même longueur d'onde, même si l'émetteur est différent. Etant donné qu'il n'est pas possible d'envoyer deux fois la même longueur d'ondes sur un même lien au risque d'erroné l'information des deux signaux, c'est le transpondeur qui va se charger de changer la longueur d'onde d'un des deux signaux.

Ainsi, chaque flux entrant va être codé sur une porteuse par modulation d'amplitude ou de phase. Ce qui permet donc de diffuser des signaux de sources différentes et ayant des longueurs d'ondes identiques sur un même canal.

Arrivé au démultiplexeur, celui-ci va agir comme plusieurs filtres dans des zones de longueurs d'ondes données. Il a donc connaissance des longueurs d'ondes qui circulent dans le lien optique. Le démultiplexeur va donc pouvoir récupérer l'intégralité d'un signal qui avait été multiplexé.

L'intérêt de la fibre optique est que ces signaux ne peuvent se confondre, à la réception ils seront parfaitement distingués.

### **1.7.2. Les composants spécifiques d'un réseau WDM**

Deux équipements sont essentiels dans les réseaux optiques WDM.

#### **1.7.2.1. Brasseur des conteneurs**

Les nœuds d'un réseau WDM assurent une fonction de brassage permettant d'acheminer les conteneurs à travers le réseau jusqu'à destination. Pour bien comprendre ce qu'est le brassage, nous prenons l'exemple du conteneur fibre : lorsque dans un nœud on démultiplexe les longueurs d'onde d'une fibre, on peut souhaiter remplacer une ou plusieurs de ces longueurs par d'autres, issues d'une autre fibre, avant de les multiplexer vers une fibre sortant du nœud. On parle alors de brassage de conteneurs puisqu'à partir de plusieurs conteneurs (des longueurs d'onde) entrant dans le nœud on peut échanger ces conteneurs pour une nouvelle répartition de sortie.

Pour désigner de manière générique l'équipement qui permet de réaliser le brassage d'un conteneur on parle d'OXC, pour Optical Crossconnect qu'on pourra appeler brasseur optique. Lorsqu'on considère les différents OXC des différents niveaux on regroupe un tel dispositif sous un nom générique : un brasseur hiérarchique (hierarchical crossconnect, HXC) [8].

##### **1.7.2.1.1. Les différents types d'OXC suivant les niveaux de conteneurs**

###### **a. Brassage des fibres**

On peut brasser les fibres optiques arrivant de plusieurs câbles dans un nœud : on parle alors de F-OXC pour Fiber Optical Crossconnect. Une fibre contenant un certain nombre de longueurs d'onde, le brasseur manipule directement toutes ces longueurs d'onde dans un ensemble global non dissocié (le conteneur "fibre").

###### **b. Brassage des bandes**

Il existe un niveau intermédiaire entre la longueur d'onde simple et la fibre de longueurs d'onde : la bande de longueurs d'onde, introduite pour la première fois dans les

réseaux en anneau. L'équipement de brassage correspondant au niveau du nœud est logiquement appelé B-OXC pour Band Optical Crossconnect.

### **c. Brassage des longueurs d'onde**

L'équipement qui permet de réaliser ce brassage de longueurs d'onde est un W-OXC pour Wavelength Optical Crossconnect. Cet équipement permet de commuter une longueur d'onde entrante dans un nœud vers une longueur d'onde sortante allant vers l'un des nœuds voisins. Cette commutation est réalisée par un commutateur optique.

#### **1.7.2.1.2. Les fonctionnalités des brasseurs**

L'encapsulation dans différents niveaux hiérarchiques permet de regrouper des conteneurs d'un niveau donné dans des conteneurs de plus haut niveau. Au niveau des nœuds, on doit pouvoir gérer ces différentes encapsulations dans des brasseurs. 8 longueurs d'onde peuvent par exemple être encapsulées dans une bande en passant d'un W-OXC à un B-OXC.

Un nœud peut aussi servir de point d'entrée ou de sortie à des données sur le réseau.

Les termes fibers, bands, waves correspondent à fibres, bandes et longueurs d'onde. La fonctionnalité add ou drop d'un brasseur lui permet d'insérer ou de retirer un signal du réseau. On peut directement insérer une fibre, une bande ou une longueur d'onde dans un des niveaux F-OXC, B-OXC ou W-OXC. Les capacités de multiplexage/démultiplexage sont illustrées par les connexions entre les niveaux deux par deux et par les termes "mux" et "demux".

Les équipements de brassage fournis par les équipementiers peuvent en effet varier suivant la taille, à fonctionnalités équivalentes. Il y a alors un lien étroit entre la capacité d'un équipement et son coût.

#### **1.7.2.2. Les multiplexeurs à insertion/extraction optique**

Le WDM permet, sur une même fibre, l'acheminement de flux numériques dans des canaux optiques ayant des longueurs d'onde différentes. Pour extraire une ou plusieurs longueurs d'ondes sans couper la totalité de la fibre, un multiplexeur d'insertion/extraction ou MIE, en anglais OADM, pour Optical Add/Drop Multiplexer, est utilisé. Pour sécuriser automatiquement un parcours, deux équipements OADM placés aux extrémités d'une fibre optique peuvent être utilisés à condition de travailler en synchronisme sur les bons parcours lumineux demandés. Dans ce cas, on dispose de ROADM (R pour Reconfigurable) qui assurent le routage dynamique en longueur d'onde sur le réseau. Les industriels spécialisés proposent à cet effet une approche hybride avec commutation sélective en longueur d'onde et

compatibilité aux normes de réseau optique de transmission permettant d'optimiser les coûts et d'améliorer l'évolutivité, la souplesse et l'utilisation des débits à acheminer.

La figure (1.15) illustre l'extraction de longueurs d'ondes.

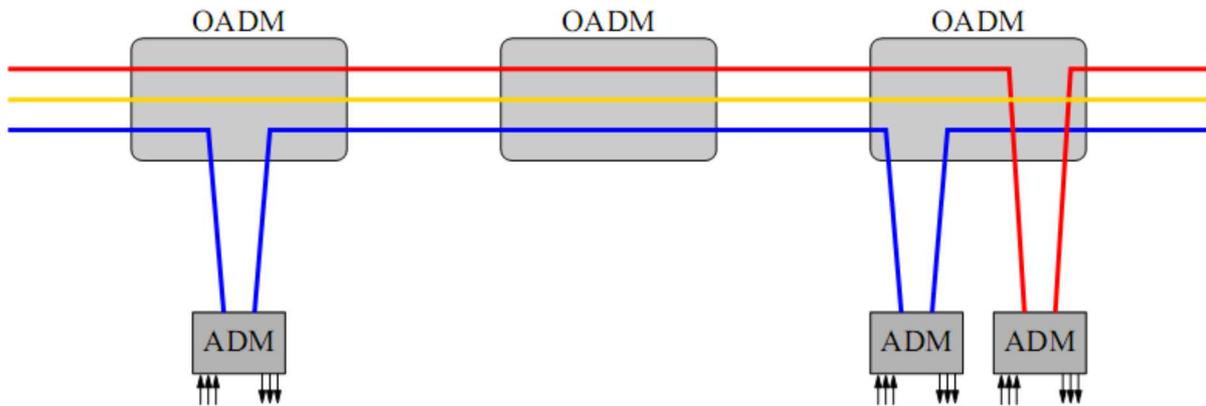


Figure 1.15 : Extraction de longueurs d'ondes.

### 1.8. Les différentes technologies WDM

Il existe plusieurs technologies WDM. Elles restent identiques par leur principe mais se différencient uniquement par le nombre de canaux exploités dans une fibre. Le multiplexage WDM est caractérisé par l'intervalle minimum entre deux longueurs d'onde utilisables. Cet intervalle peut être exprimé en nanomètres ou en gigahertz. Si cet intervalle est inférieur ou égal à 0,8 nanomètres (soit 100 GHz) on parle alors de multiplexage DWDM (Dense WDM).

Des tests ont même été effectués avec des intervalles de 0,4 et 0,2 nanomètres. On parle alors d'U-DWDM pour Ultra-Dense WDM. L'utilisation de 32 longueurs d'onde différentes sur une fibre à 10 gigabits par secondes permet donc d'atteindre assez facilement un débit de 320 gigabits. Prochainement, lorsque 160 longueurs d'onde pourront être utilisées, la même fibre à 320 gigabits par secondes pourra fournir un débit de 1,6 térabits par secondes.

Il existe une autre forme de multiplexage WDM, moins performante, le CWDM (Coarse WDM qui signifie WDM grossier). Dix-huit canaux au maximum sont utilisables, mais en général les équipements émettent sur quatre, huit ou seize canaux.

Le WWDM (Wide WDM) est un autre dérivé du WDM réservé désormais aux systèmes avec des canaux espacés de plusieurs nm incluant aussi les canaux dans des fenêtres de transmission différentes. Il est encore plus restrictif que le CWDM puisqu'il ne permet l'utilisation que de quatre canaux.

### 1.8.1. Les caractéristique du D-WDM et de l'U-DWDM

Le DWDM et le U-WDM est la clé du progrès des réseaux de fibre optique. Il augmente considérablement le rendement et la souplesse des réseaux, lorsque plusieurs canaux d'information affluent sur une même fibre. La particularité du D-WDM et du U-WDM est qu'ils utilisent des espacements de longueurs d'ondes très court c'est-à-dire inférieur ou égal à 0,8 nanomètres. C'est grâce à cela qu'il est possible d'avoir un nombre de canaux important dans la fibre.

On parle alors d'U-DWDM pour Ultra-Dense WDM. L'utilisation de 32 longueurs d'onde différentes sur une fibre à 10 gigabits par secondes permet donc d'atteindre assez facilement un débit de 320 gigabits.

L'inconvénient de cette technologie est qu'il est nécessaire d'avoir un laser refroidi en température. Les longueurs d'onde d'émission étant très proche, il est nécessaire de réguler la température du laser entre les impulsions. Un laser régulé en température représente un coût très onéreux.

L'avantage des technologies D-WDM et U-DWDM est qu'ils utilisent des longueurs d'ondes qui sont amplifiables sans pour autant passer par l'intermédiaire d'un amplificateur électrique. Ce principe évite donc la reconversion d'un signal optique en signal électrique pour être amplifié et à sa retransformations en signal optique [9].

La figure (1.16) représente les peines de fréquences en DWDM :

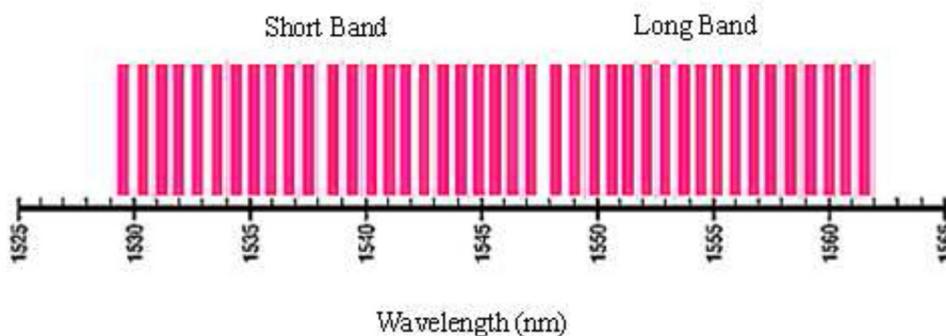


Figure 1.16 : Peigne des fréquences en DWDM.

#### 1.8.1.1 Les éléments constituant une liaison optique DWDM

Plusieurs types d'éléments constituent une liaison optique DWDM :

Les transpondeurs, qui sont des émetteurs / récepteurs laser. Ils sont capables de convertir les signaux provenant d'une interface Client en une longueur d'onde DWDM. La valeur du  $\lambda$  émis est soit fixée en usine par le constructeur, soit réglable.

Les multiplexeurs permettent d'injecter plusieurs lambdas dans une seule fibre. Une fonction de démultiplexage est également couplée à cet équipement, afin de séparer en fin de ligne les différentes longueurs d'onde qui ont été transportées dans la fibre.

Les amplificateurs sont indispensables pour compenser régulièrement l'affaiblissement de la puissance lumineuse des canaux. Les plus puissants, appelés boosters, sont insérés en début de ligne afin de gagner en distance de transmission.

Tous les 80 à 120 km, on dispose également d'amplificateurs de ligne qui permettent d'amplifier tous les lambdas à la fois.

Enfin, avant le démultiplexage des lambdas et leur réception en fin de ligne, une pré amplification est effectuée, de manière à ce que la puissance lumineuse des canaux soit suffisante pour que les données puissent être exploitées par les transpondeurs. Des modules de compensation de dispersion sont également placés pour réduire l'étalement temporel du signal provoqué par la fibre.

### **1.8.1.2 Les effets non linéaires les plus néfastes**

Néanmoins le D-WDM introduit des phénomènes non linéaires qui ont notamment pour conséquence de limiter en pratique la distance entre amplificateurs entre 50 et 100 Km. L'introduction d'effet non linéaire n'apparaît pas tant que le nombre de canaux reste inférieur à 32 canaux et que la puissance par canal reste inférieure à 1mW. Voici les effets non linéaires les plus néfastes actuellement :

- Cross Phase Modulation (XPM) : Apparaît lorsque la phase d'un signal est modifiée par un autre signal de longueur d'onde proche.
- Four Wave Mixing (FWM) : Crée de l'inter-modulation optique entre les différents canaux.
- Stimulated Raman Scattering (SRS) : Appelé "effet raman", augmente les écarts de puissance reçue entre canaux et par conséquent produit une trop grande dispersion du rapport signal/bruit. Il peut aussi modifier la longueur d'onde d'un signal. Ce décalage en fréquence correspond à un échange d'énergie entre le rayon lumineux et le milieu, le phénomène physique par lequel un milieu peut diffuser de la lumière en modifiant légèrement sa fréquence.

### **1.8.2. Les caractéristiques de CWDM**

Le CWDM (Coarse WDM) permet de transporter de manière simple jusqu'à seize longueurs d'ondes sur de courtes distances de 60 à 80 km. Le C-WDM n'est pas compatible

avec les amplificateurs optiques. C'est notamment pour cette raison que le C-WDM est utilisé sur des distances plus que ses confrères. Donc pas d'amplification et pas de régulation en température du laser, ceci permet d'avoir des composants moins chers pour faire du multiplexage optique.

Le spectre utilisé s'étend de 1270 à 1610 nm. L'espacement entre chaque canal est de 20 nm et les émetteurs/récepteurs lasers peuvent subir quelques décalages en longueur d'onde sans que les signaux soient perdus. On peut ainsi s'affranchir d'un asservissement des lasers en température et c'est notamment ce qui rend le CWDM financièrement attractif.

Le système CWDM autorise la transmission d'un maximum de 9 applications sur une paire de fibres optiques. Cette technique est conseillée en particulier pour la transmission sur des fibres louées ou lors de manque de fibres dans des câbles déjà posés. Le système possède une structure modulaire et peut ainsi être étendu en diverses étapes d'ampleur variable. La transmission des flux de données s'effectue à des taux de transfert allant de 100 MBit/s à 2,5GBit/s par canal.

### **1.8.3. Combinaison CWDM/DWDM**

La technologie CWDM s'est établie ces dernières années comme l'alternative économique au système DWDM d'exploitation démultipliée des capacités de la Fibre optique.

Toutefois, du fait du grand écart entre les canaux (20nm), les systèmes sont limités dans le nombre de canaux utilisables. Ainsi, selon la qualité de la fibre, on ne dispose que de 8 voire 16 canaux par fibre.

Jusqu'ici, lorsque les exigences de capacité du client augmentaient au-delà de cette limite, il fallait obligatoirement opter pour une technologie DWDM, beaucoup plus chère. Ceci entraînait des coûts d'investissement élevés car on faisait le pas vers un système complètement différent.

De nouveaux systèmes innovants permettent une migration en douceur grâce à une combinaison intelligente des techniques CWDM et DWDM. Dès qu'un élargissement des capacités est nécessaire, il est possible d'élargir chacun des 8 canaux CWDM de max. 8 canaux DWDM. Ainsi, dans le cas d'une construction maximale, on peut réaliser jusqu'à 64 canaux optiques, sans provoquer automatiquement de nouveaux coûts d'investissement élevés.

La figure (1. 17) illustre cette combinaison.

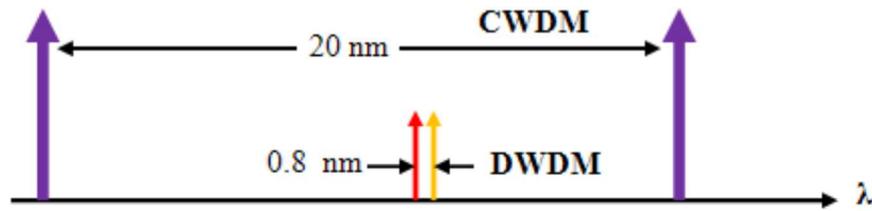


Figure 1.17 : Combinaison CWDM/DWDM.

Une telle modulaire présente l'avantage majeur d'acquérir uniquement le nombre de canaux effectivement nécessaires et donc d'abaisser le niveau financier d'accessibilité. Par ce biais, les coûts de stockage, maintenance et de services en sont d'autant réduits [10].

### 1.9. Conversion de longueurs d'onde dans un réseau tout optique

Dans un réseau tout optique, on requiert la continuité des longueurs d'onde le long d'une suite de fibres. L'absence de conversion de longueurs d'onde signifie que si l'on emprunte une longueur d'onde donnée dans une fibre du réseau, on continuera à utiliser cette même longueur d'onde sur tout le chemin optique emprunté. Ainsi, si on identifie cette longueur d'onde par une couleur dans une fibre, lorsque cette longueur d'onde est brassée par un W-OXC, elle continuera à utiliser la même couleur dans la fibre sortante.

Cependant, les équipements des nœuds du réseau peuvent avoir la capacité de convertir les longueurs d'onde : cela signifie qu'un nœud du réseau peut réémettre une longueur d'onde sur une couleur différente. En général, la conversion est assurée par un passage de l'optique vers l'électronique et vice versa. Certains de nos modèles prennent en compte cette hypothèse.

### 1.10. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une description détaillée de tous les composants présents dans un système de transmission sur fibre optique, les diodes DEL électrique et optiques, et les diodes laser. Les fibres optiques possèdent de nombreuses qualités pour transmettre une grande quantité d'informations sur de longues distances. La photo détection a également été rappelé avec une description de deux exemples de photo détecteur, la photodiode PIN et à avalanche, et leur principe de fonctionnement.

La technologie du WDM est sans concurrence du point de vue de la capacité car le coût de la fibre et des matériaux ne cesse de baisser avec des portées toujours plus longues.

# Chapitre 2

---

# Modulation DPSK

---

## 2.1. Introduction

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique est donné à la figure (2.1) où l'on se limite aux fonctions de base :

- La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires.
- Le codeur peut éventuellement supprimer des éléments binaires non significatifs (compression de données ou codage de source), ou au contraire introduire de la redondance dans l'information en vue de la protéger contre le bruit et les perturbations présentes sur le canal de transmission (codage de canal). Le codage de canal n'est possible que si le débit de source est inférieure à la capacité du canal de transmission (la probabilité d'erreur  $P_e$  tend dans ce cas vers 0 d'après les travaux de Hartley - Shannon).
- La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis.
- Enfin, du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur.

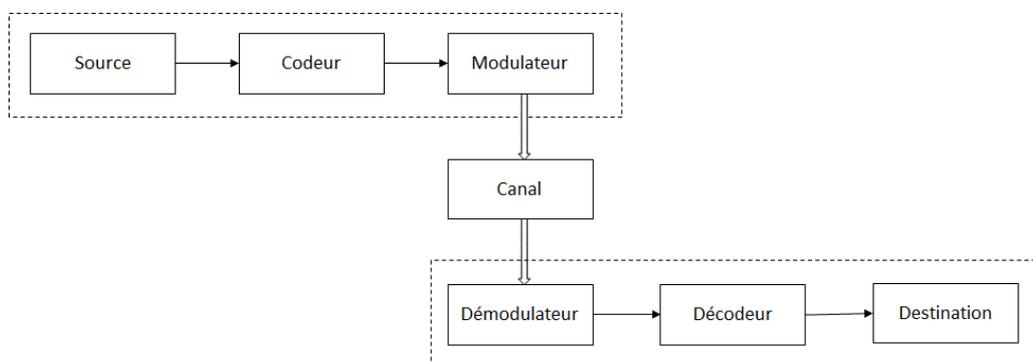


Figure 2.1 : Schéma d'un système de transmission numérique.

La modulation peut être définie comme le processus par lequel le signal est transformé de sa forme originale en une forme adaptée au canal de transmission. Elle a pour fonction de transposer l'information sur une porteuse, afin d'occuper un espace fréquentiel plus réduit et que l'on a choisi.

On module une porteuse dont la fréquence est beaucoup plus élevée que le message à transmettre. Cette nouvelle fréquence est plus favorable à la transmission. La modulation consiste à faire varier les caractéristiques de la porteuse (amplitude, fréquence, phase) en fonction du message à transmettre. Le procédé de modulation peut être de 2 types différents, à savoir le type direct, et le type externe.

**a. La modulation directe**

La modulation directe peut être assimilée à une technique de modulation de type "classique". En effet, on va ici moduler directement le courant injecté en entrée de la diode. A la suite de cette modulation de courant, l'intensité de la lumière produise par la diode sera affectée. Plus le courant reçu par la diode est important, plus l'intensité lumineuse qu'elle délivrera sera puissante. Cependant, cette méthode de modulation comporte un inconvénient majeur. La modulation d'amplitude du courant affecte en effet la fréquence du signal émis. C'est pour cette raison qu'en général elle n'est plus très utilisée, au profit de la modulation externe.

**b. La modulation externe**

La modulation externe est-elle légèrement plus subtile. En effet, ici le courant injecté à la diode restera constant, mais on va utiliser un modulateur externe afin de parvenir à moduler le signal lumineux. Le principe de fonctionnement est le suivant :

En fonction du signal de modulation

- Un champ électrique est généré et influe sur l'indice de réfraction du modulateur externe.
- Une puissance constructive est créée, cela provoque la disponibilité de la puissance optique.
- Une puissance destructive est créée, cela provoque alors une absence d'émission de lumière.

## 2.2. Présentation des formats de modulation

Les systèmes de communications optiques ont principalement utilisé le format de modulation d'amplitude On-Off Keying en le combinant avec NRZ (Non-Return to Zero) ou bien avec RZ (Return-to-Zero). La popularité de ce format de modulation est due à sa simplicité de mise en œuvre. En effet, pour générer ce format, on a besoin d'un seul modulateur d'amplitude. À la réception, une simple photodiode suffit pour la détection. Récemment, plusieurs formats de modulation ont fait leurs apparitions, suite aux limitations que présente le format d'amplitude face aux effets linéaires et non linéaires et à la demande d'augmentation de débit ainsi que des distances de transmissions. Parmi ces nouveaux formats de modulations, une technique plus avancée pour atteindre des très longues distances est de coder l'information en exploitant la phase du signal optique, cette technique est plus connue sous le nom de DPSK (Differential Phase Shift Keying).

Cette technique de modulation est bien plus complexe à mettre en œuvre, mais néanmoins plusieurs études ont montré que la DPSK présente une très nette amélioration de la sensibilité du récepteur de 3dB par rapport à la modulation d'amplitude. Elle présente également une très grande robustesse face aux effets non linéaires de la fibre, ainsi que la possibilité de transmettre sur des distances plus longues avec la même qualité. Plusieurs autres types de formats de modulation ont fait leur apparition afin de réduire l'impact des phénomènes altérant la propagation.

Parmi les plus prometteurs, il existe un format de type duobinaire mélangeant le format d'amplitude et de phase. Celui-ci a été développé et breveté par Alcatel sous le nom de PSBT (Phase Shaped Binary Transmission) [11].

Ce type de format consiste en une modulation mixte d'amplitude et de phase obtenue de manière optique au moyen d'un signal DPSK filtré par un interféromètre de Mach-Zehnder (MZI) présenté ci-dessous.

L'avantage de ce type de format de modulation semble être prometteur en vue de garantir une bonne compatibilité avec l'espacement des canaux à 100GHz pour les WDM et à 50GHz pour les DWDM. Ceci est dû à son spectre très réduit, sa grande tolérance à la dispersion chromatique (CD) ce qui se traduit par une augmentation de la distance de transmission, et une bonne résistance à la dispersion modale (PMD).

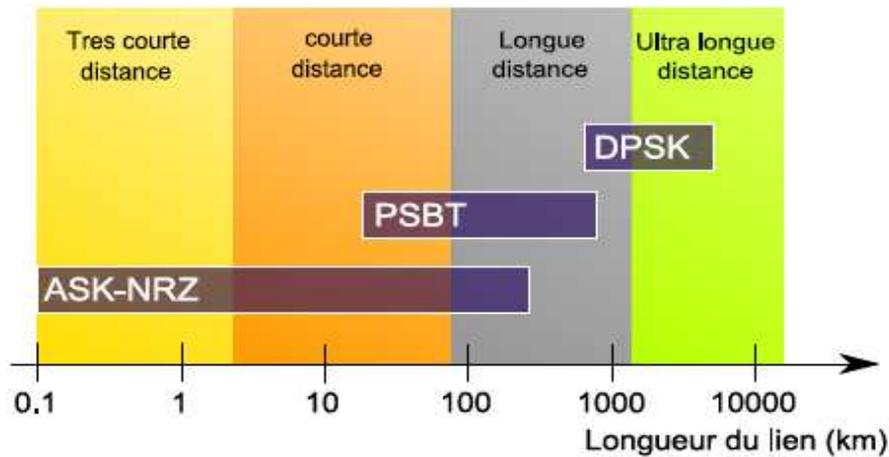


Figure2.2 : Utilisation des différents formats de modulations à 40 Gbits/s.

La figure est un aperçu sur les distances que peuvent atteindre certains formats de modulation à un débit de 40Gbits/s. Nous remarquons que la PSBT est moins bonne que la DPSK pour les ultra-longues distances mais le principal avantage qu'offre ce format réside dans sa simplicité. Ce format rends possible la migration vers les hauts débits avec un changement mineur de l'émetteur et une photodiode classique plus rapide en détection sans pour autant changer les lignes de transmissions et les fibres. Ceci garantis une migration en douceur de l'infrastructure de transmission vers les 40Gbits/s, à moindre coût financier.

### 2.3. Modulation par saut de phase (PSK)

La modulation par sauts de phase (Phase Shift Keying), est la modulation de phase appliquée à un signal binaire. Ce mode de transmission est celui qui présente le meilleur rapport signal sur bruit dans un canal gaussien et c'est pour cette raison que nous l'avons choisi.

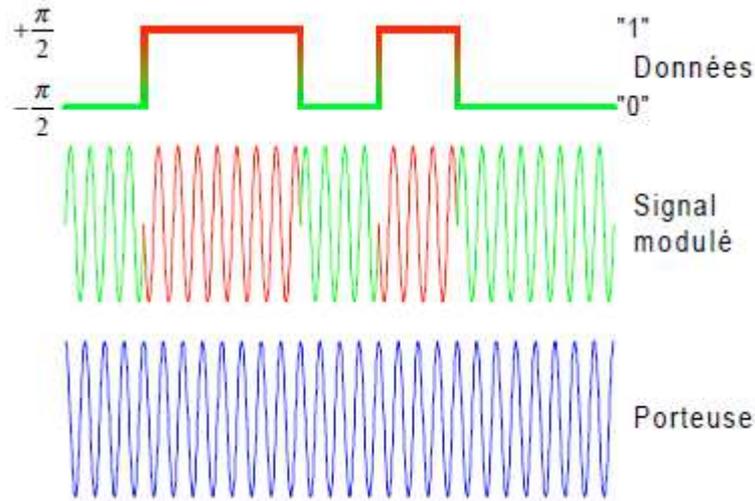


Figure 2.3 : Modulation PSK.

L'expression générale d'une modulation numérique est définie par :

$$m(t) = \text{Re} \left[ \sum_k C_k(t) \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \right] \quad (2.1)$$

avec  $C_k(t) = a_k(t) + jb_k(t)$  (2.2)

Les signaux élémentaires  $a_k(t)$  et  $b_k(t)$  utilisent la même forme d'onde  $g(t)$  qui est ici une impulsion rectangulaire, de durée  $T$  et d'amplitude égale à  $A$  si  $t$  appartient à l'intervalle  $[0, T]$  et égale à 0 ailleurs.

On a toujours:  $a_k(t) = a_k \cdot g(t - kT)$  et  $b_k(t) = b_k \cdot g(t - kT)$  (2.3)

Soit :  $C_k(t) = (a_k + jb_k) \cdot g(t - kT) = c_k \cdot g(t - kT)$  (2.4)

Dans le cas présent, les symboles  $c_k$  sont répartis sur un cercle, et par conséquent :

$$C_k = a_k + jb_k = e^{j\varphi_k} \quad (2.5)$$

$$\text{D'où : } a_k = \cos(\varphi_k) \quad b_k = \sin(\varphi_k) \quad (2.6)$$

Et :  $a_k(t) = \cos(\varphi_k) \cdot g(t - kT)$   $b_k(t) = \sin(\varphi_k) \cdot g(t - kT)$  (2.7)

On pourrait imaginer plusieurs PSK- $M$  pour la même valeur de  $M$  où les symboles seraient disposés de façon quelconque sur le cercle ! Pour améliorer les performances par rapport au bruit, on impose aux symboles d'être répartis régulièrement sur le cercle (il sera ainsi plus facile de les discerner en moyenne). L'ensemble des phases possibles se traduit alors par les expressions suivantes :

$$\varphi_k = \frac{\pi}{M} + k \frac{2\pi}{M} \text{ lorsque } M > 2$$

$$\varphi_k = 0 \text{ ou } \pi \text{ lorsque } M = 2 \quad (2.8)$$

**Remarque**

Les symboles  $c_k$  prennent leurs valeurs dans un alphabet de  $M > 2$  éléments  $\{e^{j\varphi_k}\}$  où  $\varphi_k$  est défini ci-dessus avec  $k = 0, 1, \dots, M-1$ . On peut aussi considérer que  $a_k$  et  $b_k$  prennent simultanément leurs valeurs dans l'alphabet  $\{\cos(\varphi_k)\}$  et  $\{\sin(\varphi_k)\}$ .

Le signal modulé devient :

$$m(t) = \text{Re}[\sum_k e^{j\varphi_k} \cdot g(t - kT) \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}] = \text{Re}[\sum_k g(t - kT) \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k)}] \quad (2.9)$$

Soit, plus simplement, en ne considérant que l'intervalle de temps  $[kT, (k+1)T]$  :

$$\begin{aligned} m(t) &= \text{Re}[A \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k)}] \\ m(t) &= A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k) \\ &= A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cdot \cos(\varphi_k) - A \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \cdot \sin(\varphi_k) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Cette dernière expression montre que la phase de la porteuse est modulée par l'argument  $\varphi_k$  de chaque symbole ce qui explique le nom donné à la PSK. Remarquons aussi que la porteuse en phase  $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  est modulée en amplitude par le signal  $A \cdot \cos(\varphi_k)$  et que la porteuse en quadrature  $\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  est modulée en amplitude par le signal  $A \cdot \sin(\varphi_k)$ .

L'expression de la PSK montre qu'il s'agit d'une modulation à enveloppe constante, l'enveloppe étant le module de l'enveloppe complexe. Cette propriété est intéressante pour des transmissions sur des canaux non linéaires, ce qui fait de la PSK un outil de choix par exemple pour les transmissions par satellites. L'intérêt d'avoir un signal modulé à enveloppe constante est que cela permet d'employer les amplificateurs dans leur zone de meilleur rendement qui correspond souvent à un mode de fonctionnement non linéaire.

Ainsi, la disposition des symboles sur un cercle se traduit non seulement par enveloppe constante, mais aussi, par une énergie identique mise en œuvre pour transmettre chaque symbole, ces deux aspects étant bien entendu intimement liés [12].

On appelle "PSK-M" une modulation par déplacement de phase (PSK) correspondant à des symboles M-aires. La figure (2.4) montre différentes constellations de PSK pour  $M = 2, M = 4$  et  $M = 8$ .

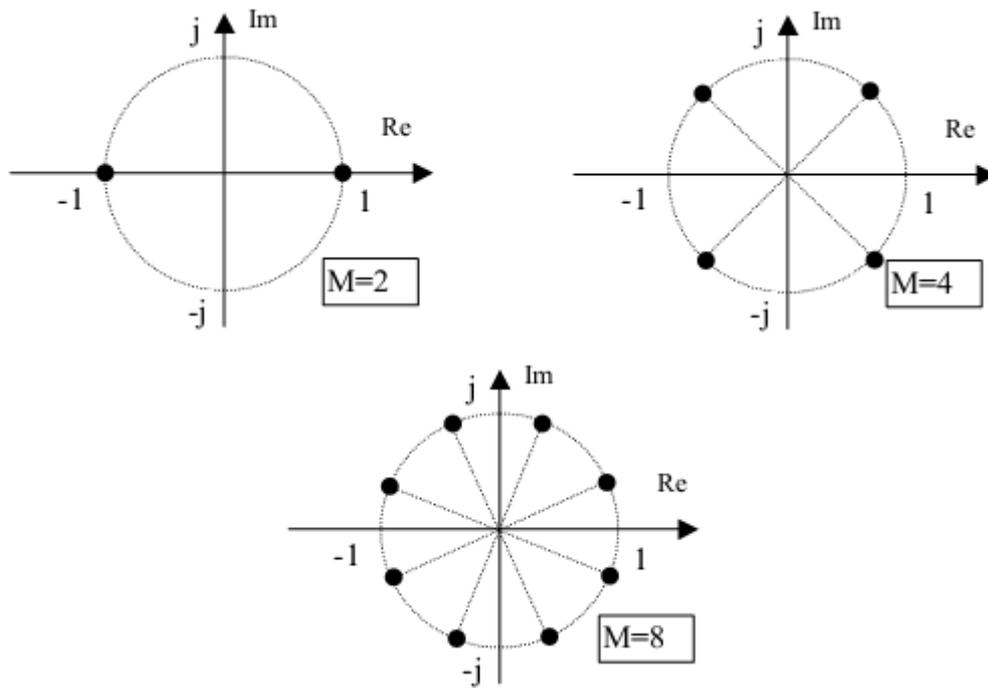


Figure 2.4 : Constellation des symboles en modulation de phase PSK-M.

### 2.3.1. La modulation "PSK-2" : BPSK

Un exemple de modulation PSK-M est la modulation PSK-2 encore appelée par son abréviation anglaise : **BPSK** pour "Binary Phase Shift Keying" [13]

C'est une modulation binaire (un seul bit est transmis par période T) :

$$n = 1, \quad M = 2 \quad \text{et} \quad \varphi_k = 0 \text{ ou } \pi$$

Le symbole  $c_k = e^{j\varphi_k}$  prend donc sa valeur dans l'alphabet  $\{-1, 1\}$ .

Ici, la modulation ne s'effectue que sur la porteuse en phase  $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ . C'est une modulation mono dimensionnelle. Le signal modulé s'écrit alors pour t appartenant à l'intervalle  $[0, T]$  :

$$m(t) = \pm A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2.11)$$

La constellation PSK-2 (BPSK) est représentée par la figure (2.5). On remarquera que cette modulation est strictement identique à la modulation ASK-2 symétrique.

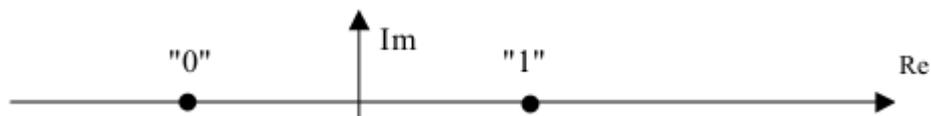


Figure 2.5 : Constellation de la modulation de phase PSK-2 (BPSK).

**a. Chronogramme de la "PSK-2" : BPSK**

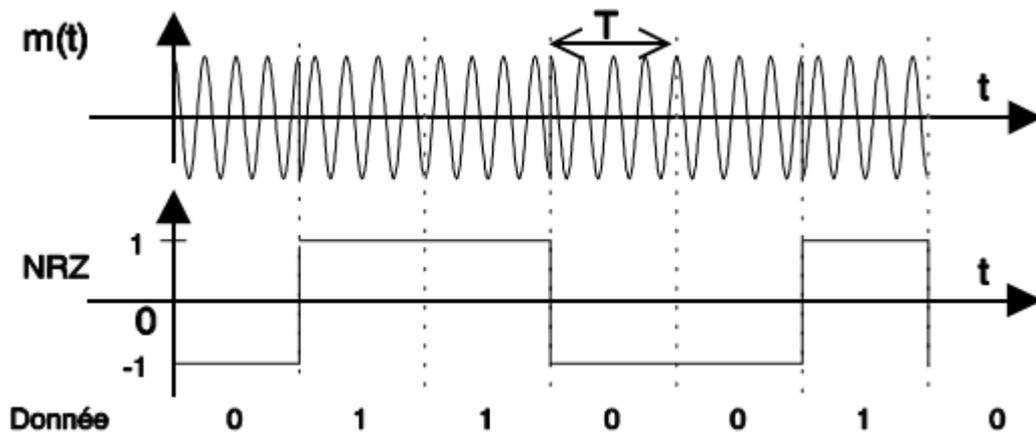


Figure 2.6 : Chronogramme de la modulation de phase PSK-2 (BPSK).

**b. Modulation et démodulation**

Le modulateur représenté sur la figure (2.7) est constitué d'un multiplicateur qui effectue le changement de fréquence sur un train numérique codé en NRZ [14].

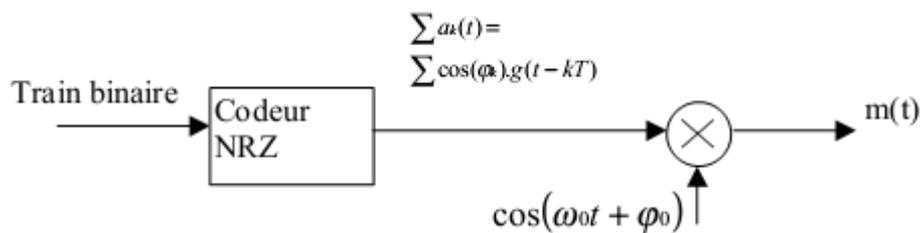


Figure 2.7 : Modulateur PSK-2 (BPSK).

Le récepteur requiert l'utilisation d'une démodulation cohérente : (voir la figure (2.8) : le synoptique simplifié du démodulateur PSK-2).

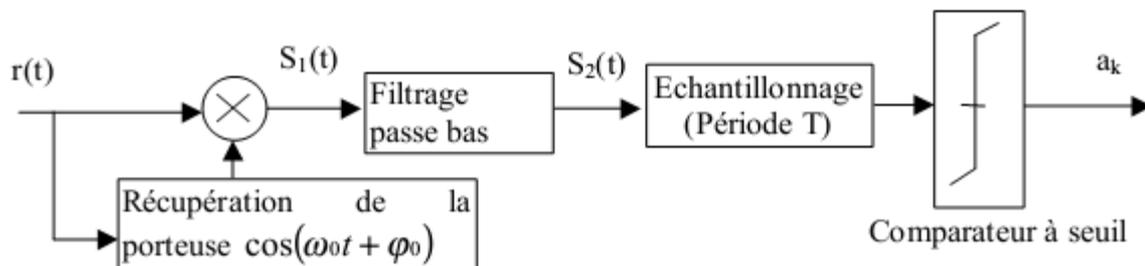


Figure 2.8 : Démodulateur PSK-2 (BPSK).

Soit  $r(t) = B \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k)$  le signal non bruité reçu par le récepteur dans l'intervalle de temps  $[kT, (k+1) T]$ . Après multiplication avec la porteuse récupérée, on obtient :

$$S_1(t) = B \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \tag{2.12}$$

Soit, après filtrage pour éliminer la composante à la fréquence  $2f_0$  :

$$S_2(t) = \frac{B}{2} \cdot \cos(\varphi_k) \quad (2.13)$$

Le récepteur doit encore récupérer le rythme des symboles transmis, puis échantillonner le signal  $S_2(t)$  au milieu de chaque période. Suivant le symbole émis  $-1$  ou  $1$ ,  $\varphi_k$  prend la valeur  $\pi$  ou  $0$  et le signe de  $S_2(t)$  devient négatif ou positif mettant en évidence la donnée binaire reçue "0" ou "1".

#### 2.4. Modulation différentielle par sauts de phase (DPSK)

Dans le cas d'une transmission PSK, il est nécessaire au récepteur de retrouver la fréquence et la phase de la porteuse. La restauration de la fréquence ne nous posera pas trop de problèmes, mais la récupération de la phase sera beaucoup plus délicate. Dans le cas des fréquences optiques, c'est presque impossible.

Dans ce type de modulation, les données sont préalablement codées de façon différentielle.

Pour transmettre un "1", nous maintenons la donnée précédente, et pour transmettre un "0", nous changeons de signe par rapport à la donnée précédente, ceci s'effectue en multipliant les données par le bit précédemment transmis [15].

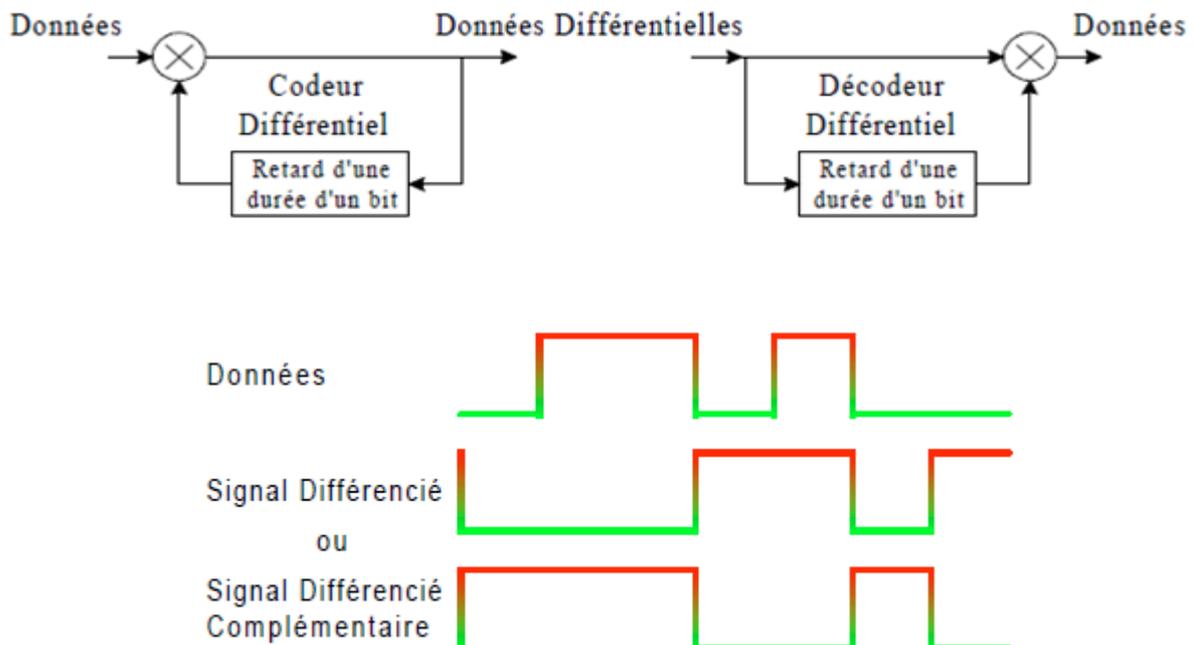


Figure 2.9 : Signaux pré encodée pour DPSK.

Nous pouvons observer à la Figure (2.9), qu'en fonction de la valeur des données précédemment transmises, il existe deux possibilités complémentaires de transmissions. Dans les deux cas, une transition représentera un "0", et une absence de transition représentera un "1". La transmission est donc insensible au signe du signal reçu. À la réception, le décodage est réalisé en effectuant le produit des deux derniers signaux reçus.

Cette propriété, d'être insensible au signal reçu, est très intéressante dans le cas d'une transmission sur paires torsadées (premières applications), ou comme dans notre cas, lors d'une modulation de la phase d'une fréquence optique peu stable, compliquée encore par le fait que la polarisation n'est pas connue.

Notre modulateur est composé d'un modulateur Mach-Zehnder, ce modulateur a trois entrées et une sortie, les deux entrées en provenance d'un générateur sinusoïdal et une d'un signal modulé.

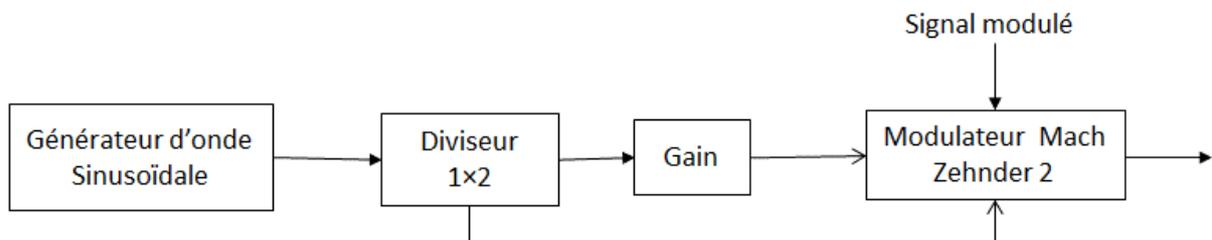


Figure 2.10 : Modulateur DPSK

## 2.5. Définition du modulateur Mach-Zehnder (MZ)

La technique utilisée pour moduler l'amplitude d'un faisceau consiste à lui faire traverser un interféromètre de Mach Zehnder, dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras.

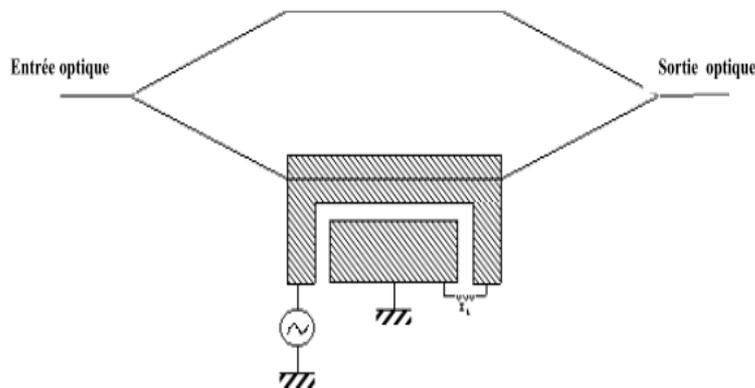


Figure 2.11 : schéma d'un interféromètre de Mach Zehnder.

La lumière est couplée dans deux guides par un embranchement Y, l'écartement entre les deux bras étant suffisant pour que le couplage par onde évanescente soit négligeable. Les

deux faisceaux se recombinent ensuite dans un deuxième embranchement Y.L'indice de réfraction du matériau électro-optique est modifié par l'application d'une tension, entraînant ainsi un déphasage entre les deux faisceaux.

Suivant leur différences de phase relative, les deux faisceaux interfèrent de manière constructive (toute la puissance est disponible en sortie) ou destructive (aucune lumière n'est injectée en sortie).Entre ces deux extrêmes, tous les états sont possibles et la modulation de la lumière reproduit celle de la tension [16].

## 2.6. Conclusion

La modulation de phase est considérée comme l'une des technologies clé pour la génération des systèmes de communication optiques à haut débit et longue portée.

La complexité de l'ensemble émission/réception de la modulation augmente avec le nombre de phases. Cependant cette complexité n'est pas très élevée et fait de la modulation de phase une modulation fréquemment utilisée pour une phase allant de 2 à 16 avec de bonnes performances.

Dans les inconvénients de la modulation de phase, citons l'existence de sauts de phase importants de  $\pm \pi$  radians qui font apparaître des discontinuités d'amplitude.

Le format de modulation de phase de type DPSK s'avère plus intéressant, car il présente une très nette amélioration de la sensibilité, il présente également une très grande robustesse face à la dispersion chromatique et aux effets non linéaires de la fibre, permettant ainsi une meilleure qualité de transmission sur des distances plus longues avec la même qualité.

## Chapitre 3

---

# Etude d'une liaison DPSK-NRZ

---

### 3.1. Introduction

Ce chapitre propose une description de logiciel de simulation Optisystem, destinée à faciliter la connaissance et la maîtrise du simulateur par les futurs utilisateurs.

Nous aborderons ensuite à la liaison DPSK-NRZ, puis on va définir les éléments qui serviront de critères de qualité pour évaluer la qualité de transmission de notre liaison, on étudiera l'effet de variation des paramètres de la liaison sur la qualité de transmission, à savoir la longueur de la fibre, la puissance émise et le débit, on y exposera ainsi les résultats obtenus avec des interprétations.

### 3.2. Présentation du logiciel de simulation

La conception et l'analyse des systèmes de communications optique, comprennent des dispositifs non-linéaires et des sources de bruit non gaussiennes qui sont très complexes et couteuses en temps, il en résulte que ces tâches ne peuvent désormais être effectuées rapidement et efficacement qu'avec l'aide de nouveaux outils logiciel.

Dans notre thèse nous avons opté pour un logiciel de simulation des systèmes de communications optique innovants qui conçoit, teste et optimise pratiquement n'importe quel type de liaison optique dans la couche physique d'un large éventail de réseaux optiques, il s'agit d'Optisystem qui est un simulateur basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications par fibre optiques.

Sa vaste bibliothèque de composants actifs et passifs comprend des paramètres réalistes, ces capacités peuvent être étendu facilement avec l'ajout des composants et peuvent être reliés à un large éventail d'outils figure (3.1), une interface complète d'utilisateur graphique (GUI) contrôle la disposition optique des composants, les modèles et ces présentations graphiques figure (3.2).

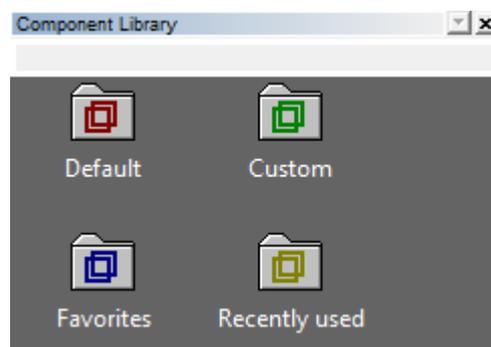


Figure 3.1 Bibliothèque des composants.

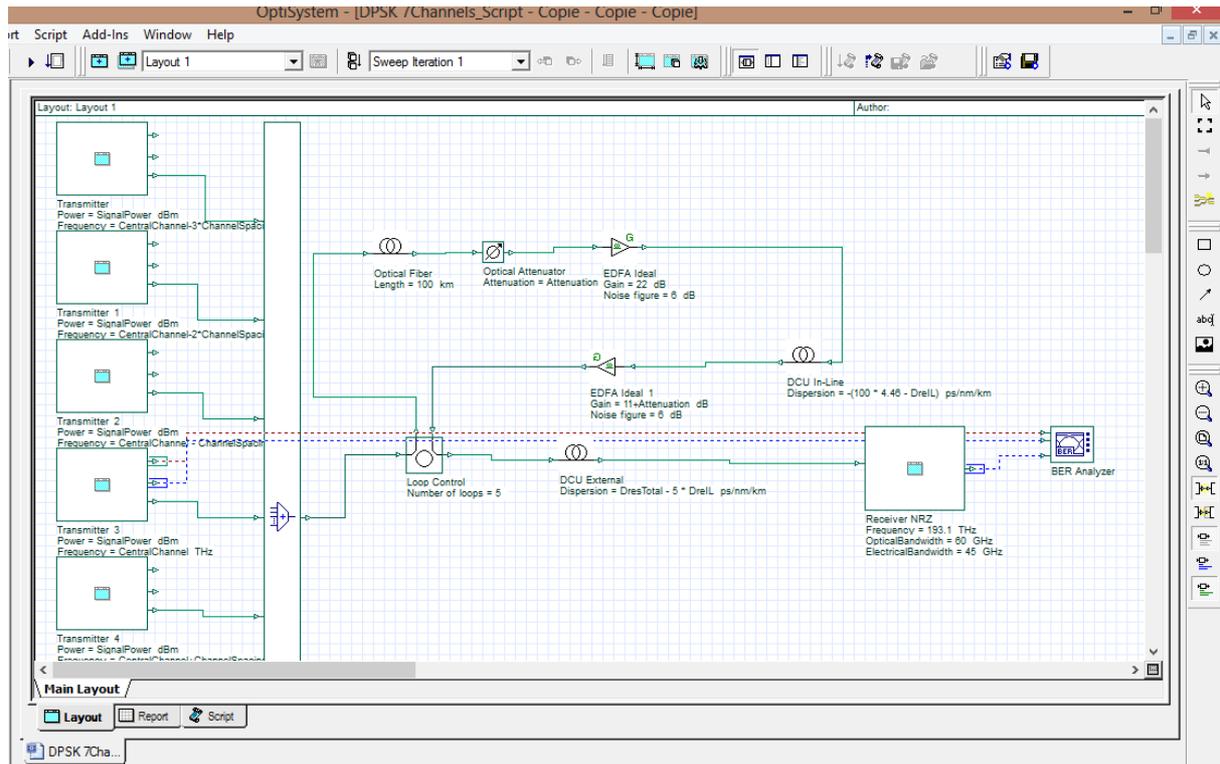


Figure 3.2 : Interface d'utilisateur graphique (GUI).

### 3.3. Applications d'Optisystem

Parmi les diverses applications d'Optisystem nous allons citer les plus utilisées :

- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER) et le calcul du bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et optiques passifs (PON).
- L'espace libre pour les systèmes optique (OSA).
- La conception d'anneau SONET/SDH.
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

### 3.4. Principales caractéristiques du logiciel Optisystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la Bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs.

- Les outils de visualisation avancée produit le SAOS Spectral, le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation schémas et beaucoup plus.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire sur le moniteur au même port. l'état de l'art et le calcul de flux de données.

### **3.5. Avantage du logiciel OptiSystem**

Les avantages du logiciel OptiSystem sont :

- Obtenir un aperçu de performances du système de fibre optique.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation du système.
- Présentation virtuelle des options de conceptions.

### **3.6. Description du schéma général de la liaison DPSK-NRZ**

La figure (3.3) représente le schéma général du système étudié il est composé d'abord d'un multiplexeur qui combine entre les signaux en provenance de 7 émetteurs optique, le schéma général de chaque émetteur est présenté ci-dessous.

Le signal de sortie du multiplexeur passe par plusieurs tronçons, chaque tronçon est composé d'une longueur de fibre optique, suivi d'un atténuateur optique, d'un amplificateur EDFA, unité de compensation de dispersion (DCU) et enfin d'un deuxième amplificateur. A la fin de la liaison on va trouver un DCU externe et un récepteur optique.

Une fibre à compensation de dispersion (DCF, Dispersion Compensation Fiber) est une fibre spéciale de forte dispersion négative dans la fenêtre [1500 nm; 1600 nm]. Elle permettra de compenser la dispersion accumulée sur les tronçons de fibres standards.

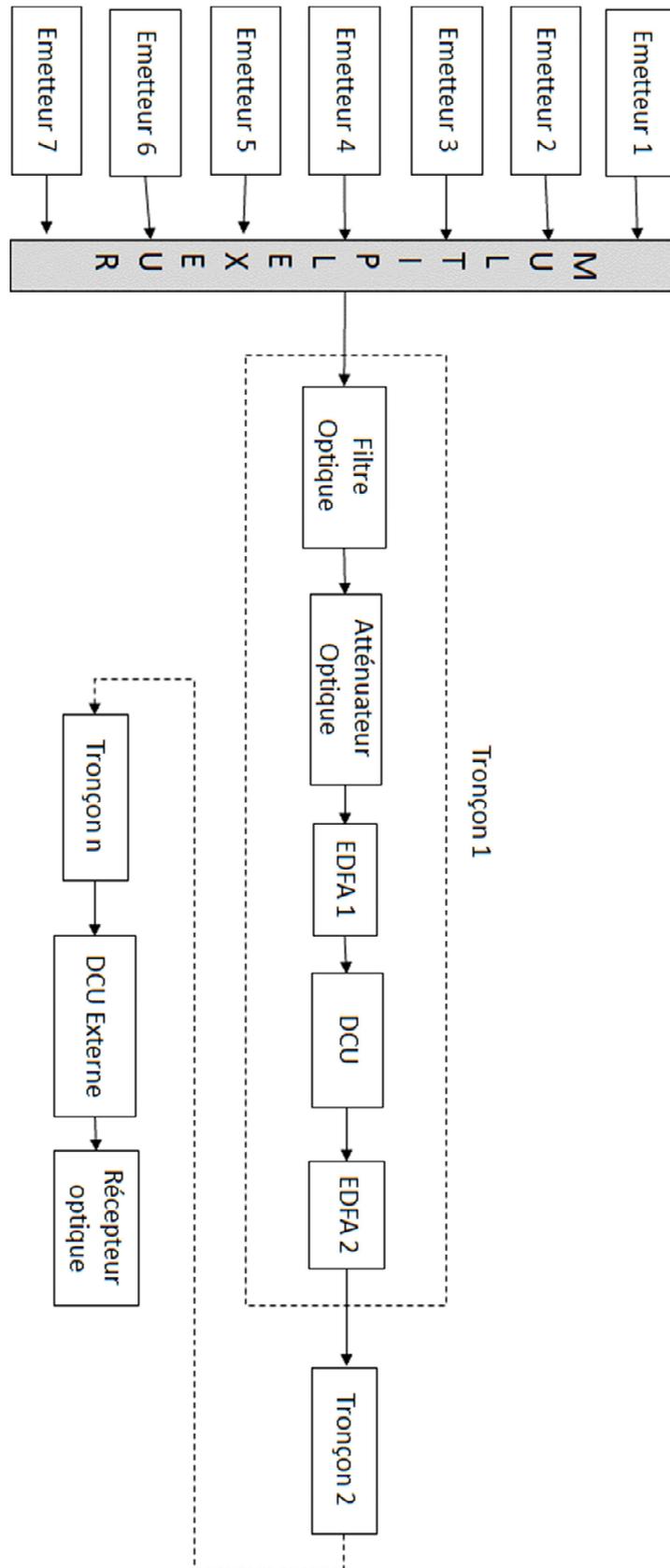


Figure 3.3 : schéma général du système.

Les atténuateurs optiques sont des équipements qui permettent d'insérer une atténuation contrôlée sur un lien optique. Utilisés avec des testeurs de transmissions, ils permettent de déterminer la marge des systèmes optiques, de vérifier la sensibilité des récepteurs et de tester les taux d'erreur bit (BER).

### 3.7. Critères de qualité d'une transmission

Pour définir la qualité d'une transmission optique, différents critères existent. Les trois principaux critères de qualité d'un signal transmis le taux d'erreur binaire, le facteur de qualité et le diagramme de l'œil. Ces trois critères sont décrits dans la suite [17]:

#### 3.7.1. Le taux d'erreur binaire

Le moyen quantitatif d'évaluer la qualité d'une transmission consiste à évaluer la probabilité d'erreur par élément binaire, qui correspond à la probabilité de prendre une décision erronée sur un élément binaire.

Le taux d'erreur binaire (TEB) ou BER (pour Bit Error Rate) est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits émis. Comme nous l'avons décrit dans la première partie de ce chapitre, le récepteur prend une décision sur la présence d'un symbole «1» ou «0» selon le niveau de signal reçu. Cette décision est prise à l'instant d'échantillonnage et à l'aide d'une bascule de décision pour laquelle la tension reçue au-dessus d'un seuil est considérée comme un symbole «1», et au-dessous de ce seuil comme un symbole «0». Si les fluctuations d'amplitude et temporelles sont importantes, la tension d'un symbole «1» peut passer au-dessous du seuil et la tension d'un symbole «0» au-dessus du seuil, des erreurs sont alors commises.

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad (3.1)$$

Le taux d'erreur binaire communément accepté dans le milieu des télécommunications optiques est de  $10^{-9}$ , correspondant à une erreur commise sur un milliard de bits lus. On tolère alors un signal de taux d'erreur binaire de  $10^{-4}$  puisqu'il permet après traitement par le code correcteur d'erreurs de retrouver un taux d'erreur binaire de  $10^{-12}$ . Cette tolérance est cependant une marge que les opérateurs assurent, le taux d'erreur binaire en ligne ne dépasse en général pas  $10^{-9}$ .

### 3.7.2. Le facteur de qualité

Le facteur de qualité est le rapport signal sur bruit électrique en entrée du circuit de décision du récepteur, il est défini par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.2)$$

Où  $\mu_1$  et  $\mu_0$  sont respectivement les tensions moyennes des symboles «1» et «0» à l'instant de décision, et  $\sigma_1$  et  $\sigma_0$  les variances des probabilités de puissance des symboles «1» et «0».

Le facteur de qualité est donc relié au taux d'erreur binaire (TEB) dans l'hypothèse où la distribution de puissance des symboles est gaussienne, par la relation suivante :

$$TEB = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (3.3)$$

Où  $\operatorname{erfc}$  est la fonction erreur complémentaire défini par :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-y^2) dy \quad (3.4)$$

Il est souvent utilisé plutôt que le taux d'erreur binaire dès lors que le taux d'erreur binaire est trop faible pour être mesuré. En effet, plus le taux d'erreur binaire est faible, plus le temps de mesure est long pour une même précision sur la mesure. Expérimentalement, le taux d'erreur binaire n'est par conséquent pas toujours mesurable directement.

Le facteur de qualité est fréquemment utilisé pour quantifier la qualité d'une liaison ; un facteur de qualité de 6 correspond à un taux d'erreur binaire de  $10^{-9}$ .

### 3.8. Description de l'émetteur optique

La figure 3.5 présente le schéma général de l'émetteur optique

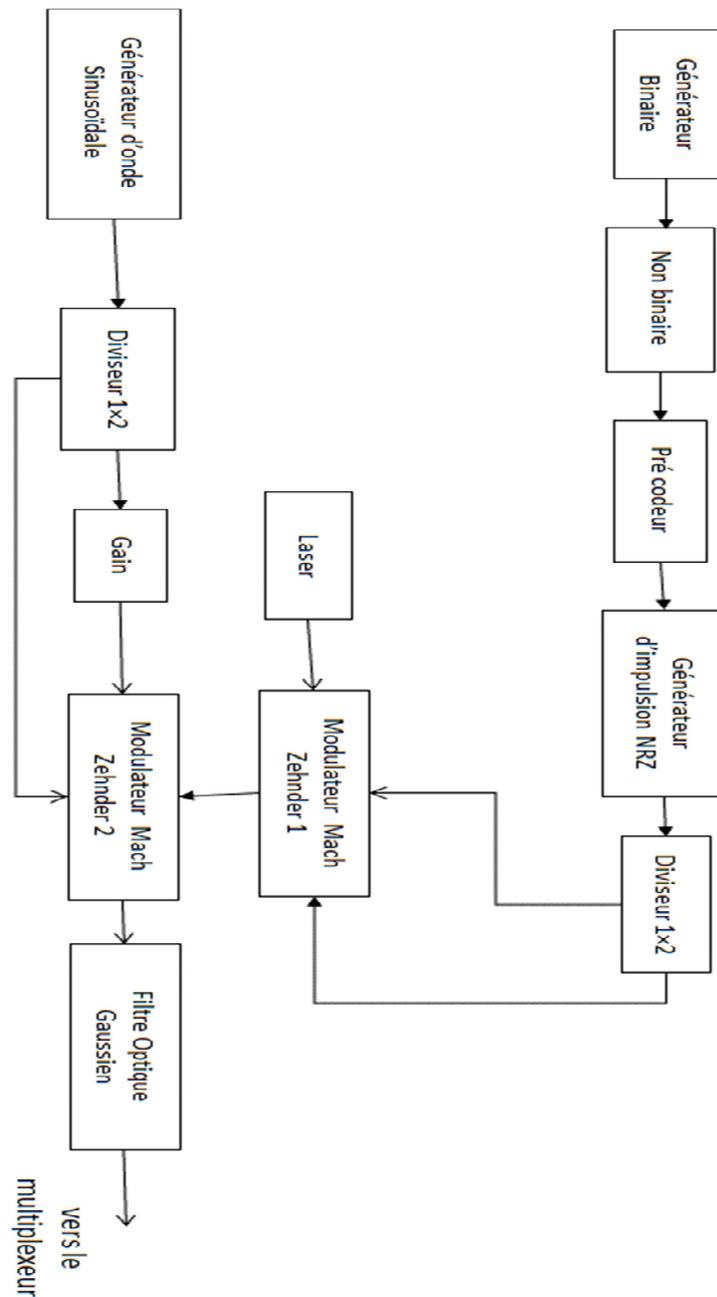


Figure 3.4 : Composants dans la partie émission.

Notre générateur binaire est caractérisé par un débit de 42,65Gb/s, ce qui donne un débit global de 300Gb/s. Pour ce qui est du codage qui suit le générateur binaire il en existe plusieurs, les plus utilisés sont les codages RZ, NRZ et le codage de Manchester, un récapitulatif de ces différents types de codage est donné dans ce qui suit.

### 3.8.1. Différents types de codage

#### a. Codages RZ, NRZ

Les deux principaux formats de modulation d'amplitude sont le format RZ (Return-to-Zero) et le format NRZ (Non-Return-to-Zero). Ils sont schématisés sur la Figure (3.6).

Pour le format NRZ, le signal transmis dans chaque temps bit est continue. Deux symboles «1» se succèdent, le signal reste à son niveau haut : Un «0» est codé par un signal à faible puissance, et un «1» par un signal à forte puissance.

Comme son nom l'indique, pour le format RZ qui est un dérivé du format NRZ le signal est éteint d'un bit sur l'autre, même si deux symboles «1» sont transmis successivement. C'est un format impulsionnel [17].

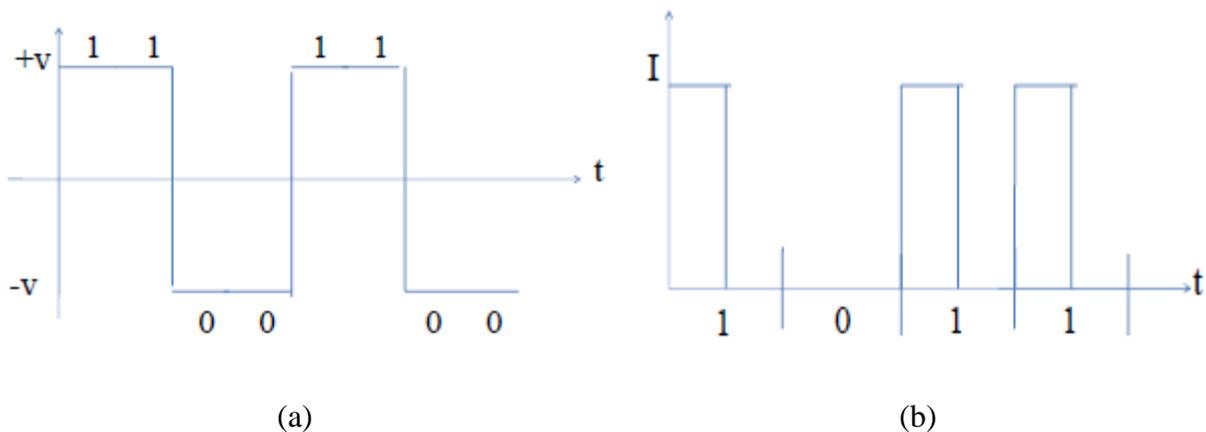


Figure 3.5 : (a) format NRZ (b) format RZ.

#### b. Codage de Manchester

Dans le codage Manchester, l'idée de base est de provoquer une transition du signal pour chaque bit transmis. Un 1 est représenté par le passage de +V à -V, un 0 est représenté par le passage de -V à +V.

Le codage Manchester réalise un OU Exclusif entre le signal d'horloge et les données.

Il y a une inversion du signal systématique au milieu de la période d'horloge, ce qui garantit l'impossibilité d'avoir un signal continu.

Pour transmettre un 1 il s'agira d'un front montant et pour transmettre un 0, d'un front descendant [18].

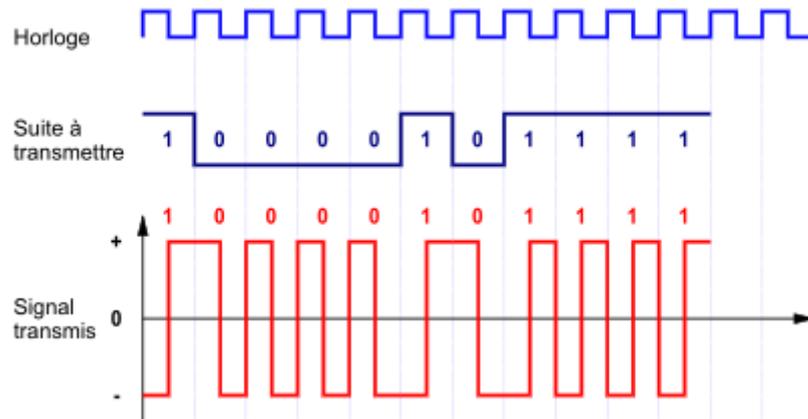


Figure 3.6 : Codage de Manchester.

Pour notre système on a utilisé le codage NRZ qui est utilisé pour des débits très élevés. Il existe dans notre système deux modulateurs de Mach-Zehnder. Le premier à comme entrées le signal en provenance d'un laser continu de longueur d'onde  $1,555\mu\text{m}$  et d'une puissance optique de sortie de  $1,25\text{ mW}$ . Le spectre du signal laser est représenté sur la figure (3.7).

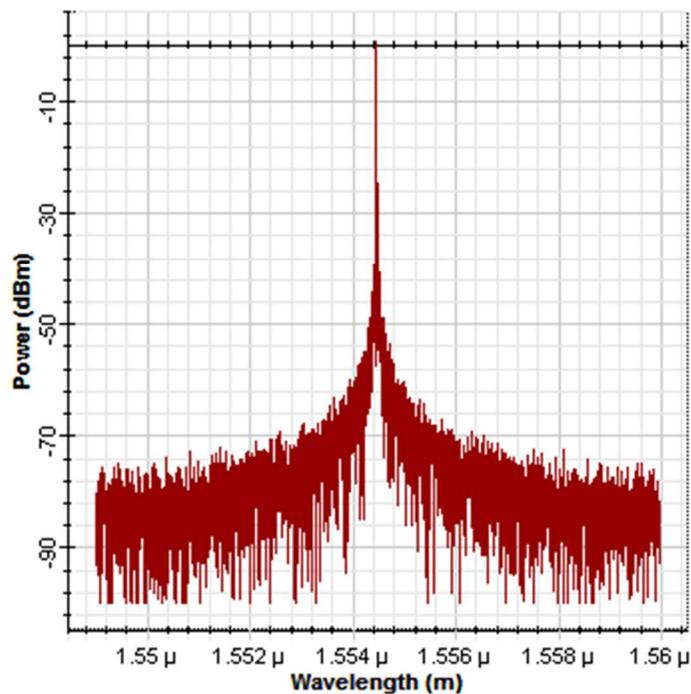


Figure 3.7 : Spectre du signal laser.

La sortie du premier modulateur de Mach-Zehnder est présentée sur la figure (3.8).

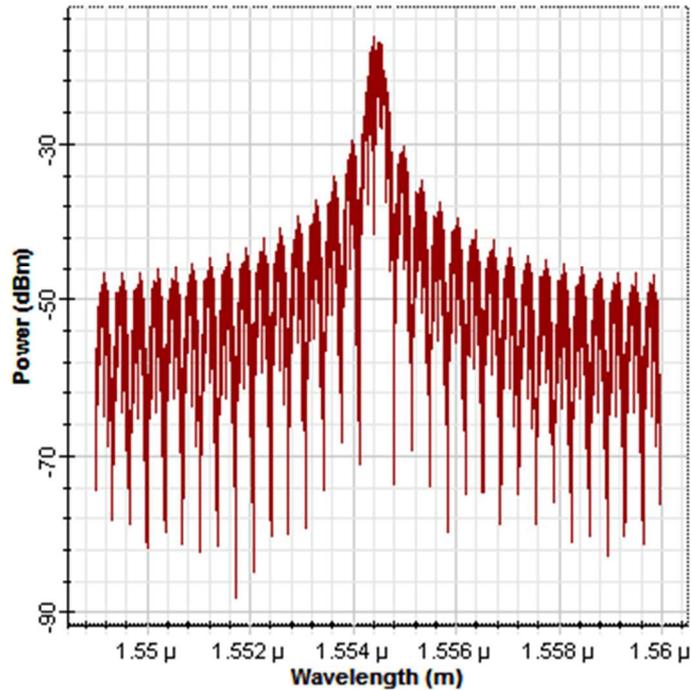


Figure 3.8 : Spectre du signal en provenance du modulateur de Mach Zehnder.

Le deuxième modulateur de mach-Zehnder a plusieurs entrées, parmi lesquelles le signal de sortie du premier modulateur ainsi que deux sinusoïdes de fréquence 21,32GHz en déphasage de  $\pi$ . La sortie du modulateur est donnée sur la figure (3.9)

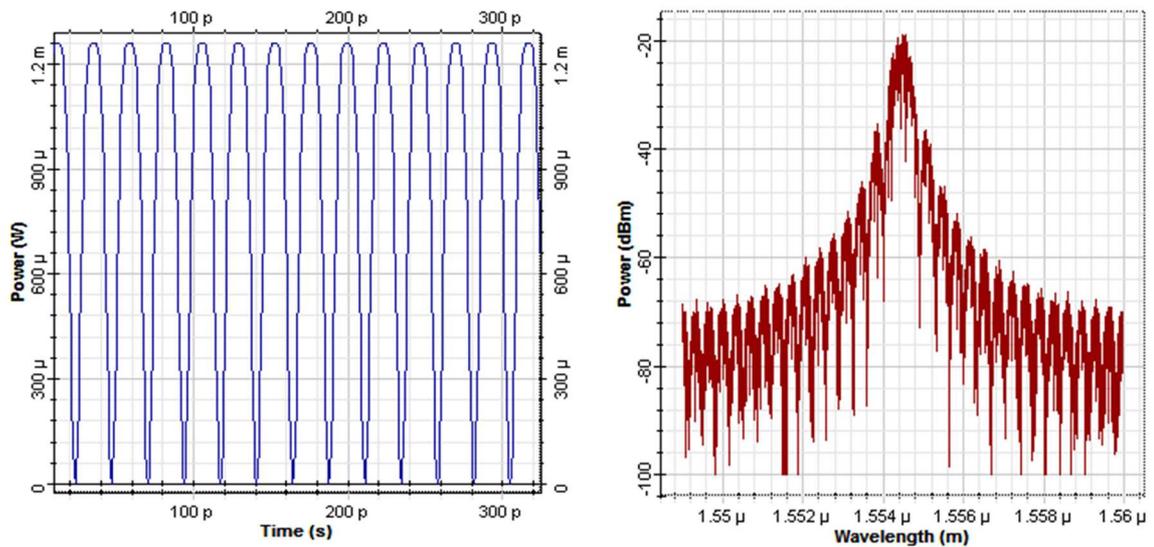


Figure 3.9 : Sortie du deuxième modulateur de Mach Zehnder.

Le signal est enfin filtré par un filtre optique Gaussien passe bande de fréquence centrale 192,86THz est de largeur de bande 60GHz.

Le filtre Gaussien est un filtre isotrope spécial avec des propriétés mathématiques bien précises.  $\sigma$  caractérise l'écart type soit la largeur du filtre : autrement dit la largeur du filtre en partant du point central est égal à  $3\sigma$  arrondi à l'entier supérieur.

Réponse impulsionnelle : 
$$h(x, y) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right) \times e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3.5)$$

Le signal de sortie de ce filtre est le suivant :

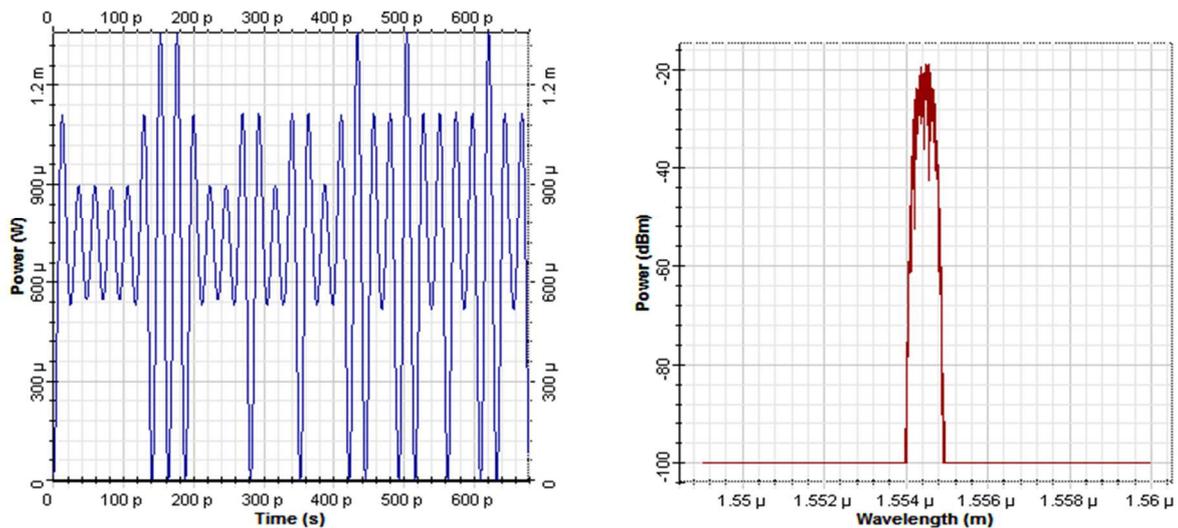


Figure 3.10 : Signal filtré.

### 3.9. Partie réception

La figure (3.11) présente le schéma générale du récepteur optique

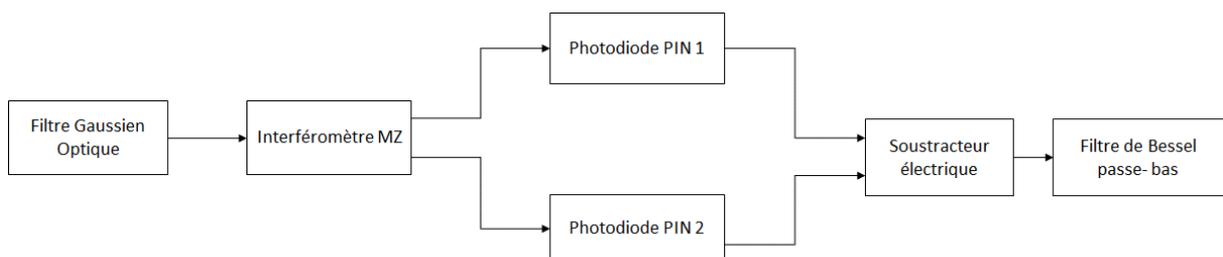


Figure 3.11 : Composant dans la partie réception.

Notre récepteur optique est constitué d'un filtre optique Gaussien avec une fréquence de 193.1THz et une bande passante 60GHz. Le signal de sortie de ce filtre est le suivant :

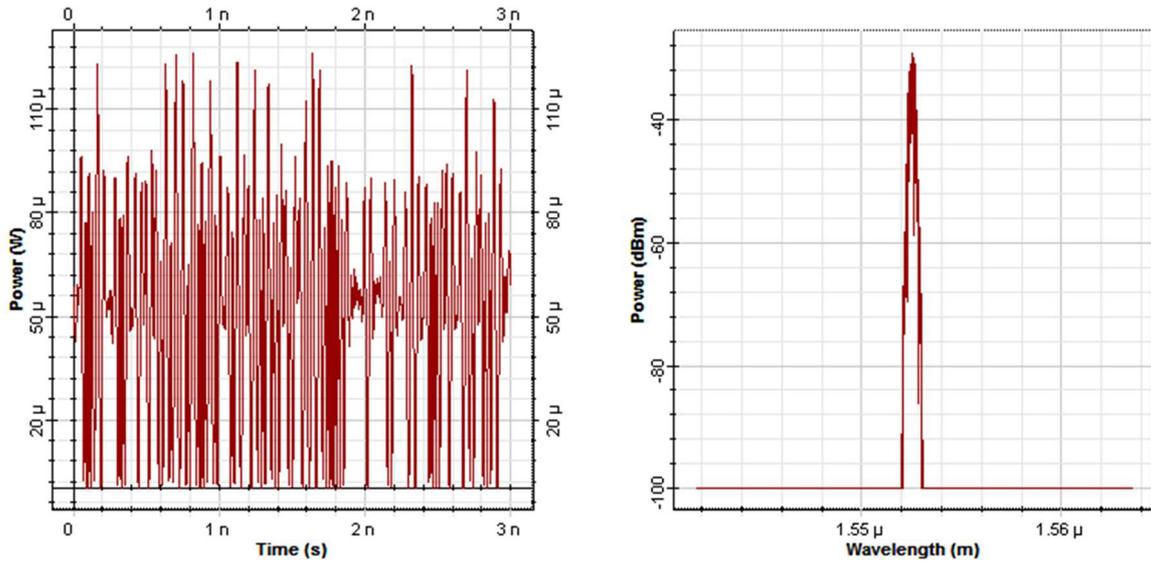


Figure 3.12 : Signal filtré.

Le signal de sortie de l'interféromètre MZ est le suivant :

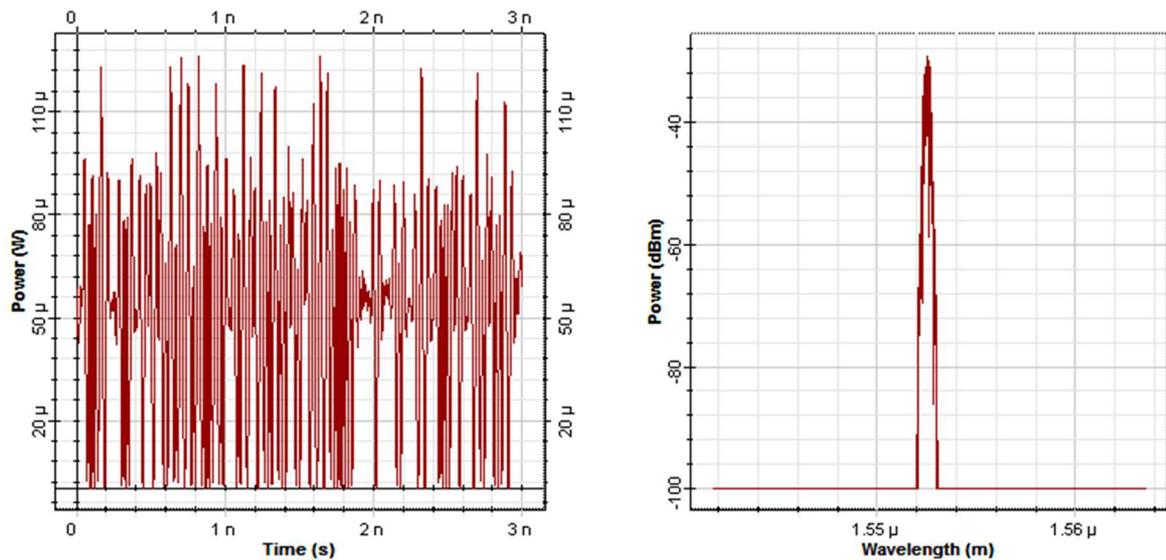


Figure 3.13 : Sortie de l'interféromètre MZ.

Les deux signaux de sortie de l'interféromètre MZ sont convertis en courants électriques par l'intermédiaire de deux photodiodes PIN. Le courant électrique de sortie de chaque photodiode est le suivant :

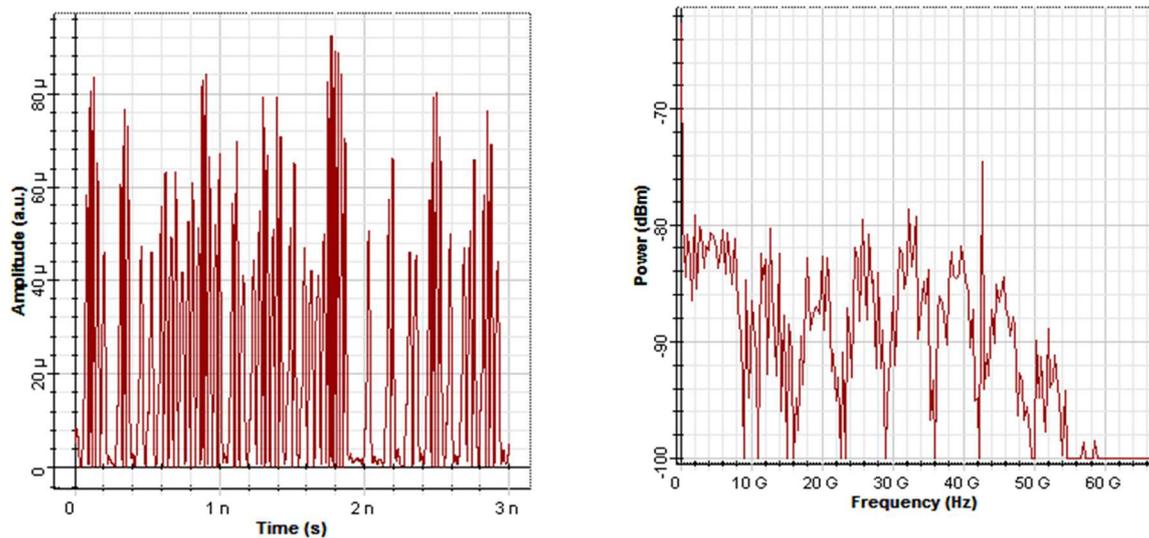


Figure 3.14 : Sortie des deux photodiodes PIN.

Un soustracteur suit les deux photodiodes PIN, la différence entre les deux signaux sera ensuite filtrée par un filtre de Bessel.

Le filtre de Bessel, également désigné sous le nom de filtre de Thompson, est un filtre polynômial (« tout pôle ») dont la caractéristique principale est d'offrir un délai constant en bande passante. Concrètement, cela signifie que toutes les fréquences pures, en bande, le traversent en un temps rigoureusement égal. Le filtre de Bessel permet donc de minimiser la distorsion que subit un signal complexe lors d'une opération de filtrage.

Le signal de sortie du filtre de Bessel est représenté sur la figure (3.15).

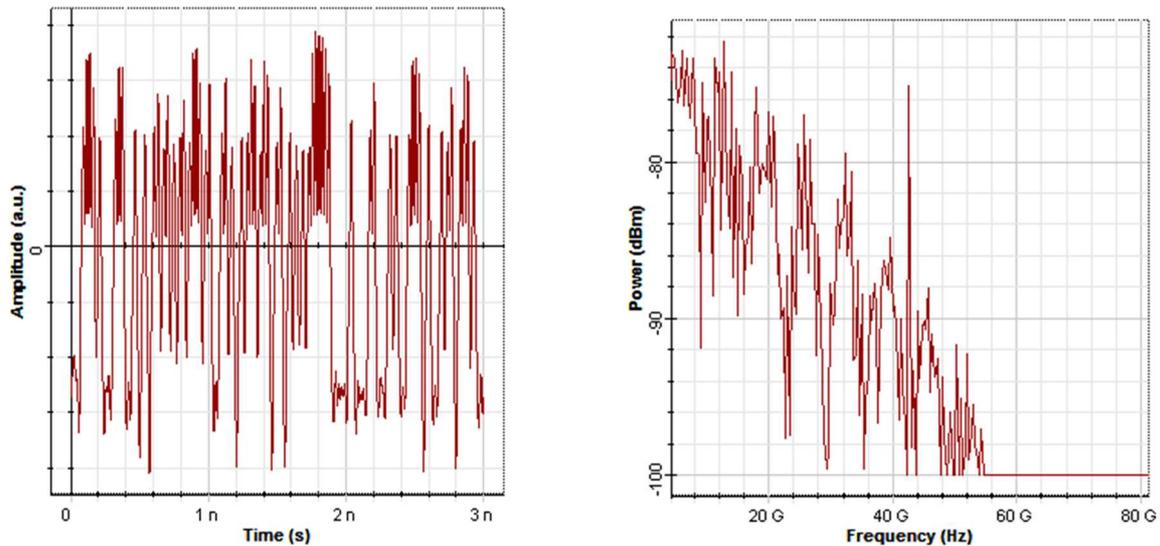


Figure 3.15 : Spectre du signal en provenance du filtre de Bessel.

### 3.10. Effet de variation de la longueur de la fibre optique

En télécommunications optiques on considère qu'on a une bonne qualité de transmission pour un BER allant de  $10^{-12}$  et  $10^{-9}$ , dans ce qui suit on va prendre comme référence un BER de  $10^{-10}$  ce qui correspond à un facteur de qualité de 6,4. On considère que pour un BER inférieur à  $10^{-10}$  et un facteur de qualité supérieur à 6,4 on aura une bonne qualité du signal reçu.

En premier temps nous allons étudier l'effet de variation de la longueur de la fibre optique sur la qualité de la transmission.

Les figures (3.16) et (3.17) représentent la variation du facteur de qualité (Q) et du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la longueur de la fibre optique.

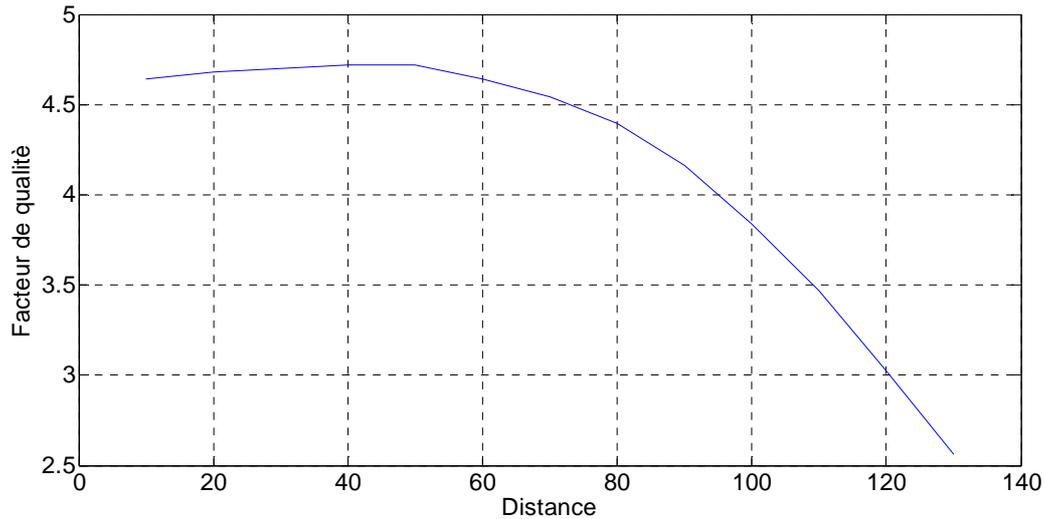


Figure 3.16 : Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre.

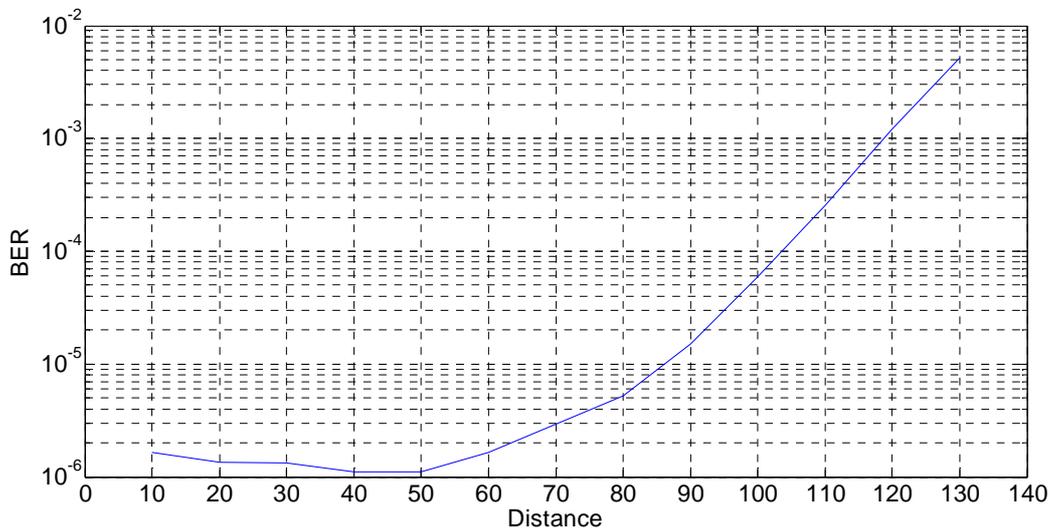


Figure 3.17 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la longueur de la fibre.

Pour les résultats obtenus on note une amélioration de facteur de qualité jusqu'à une distance de 60 km puis une dégradation à partir de cette longueur. Pour ce qui est du taux d'erreur binaire on note une stabilisation à  $10^{-6}$  pour une distance allant jusqu'à 50 km après on a une dégradation pour atteindre une valeur de  $10^{-3}$  pour 130 km.

### 3.11. Effet de variation de la puissance émise

Les mesures suivantes sont faites en variant la puissance émise tout en gardant une longueur de la fibre constante de 100 km avec un débit de 42.65 Gbits/s.

Les figures (3.18) et (3.19) ci-dessous montrent la variation du facteur de qualité (Q) et du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la puissance émise.

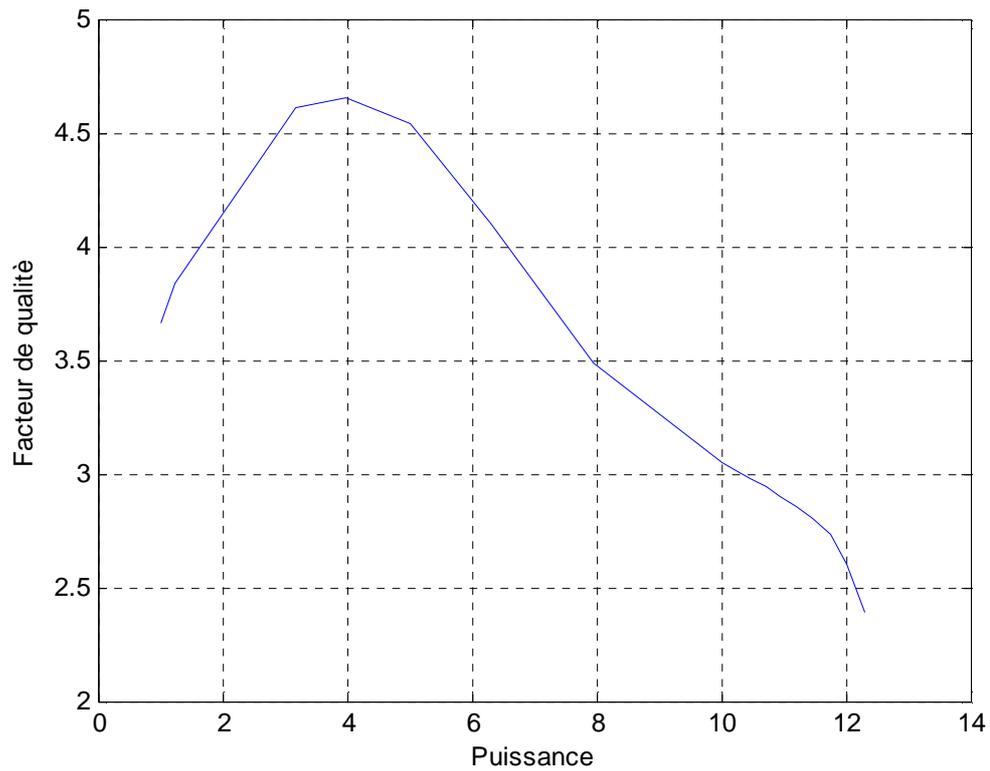


Figure 3.18 : Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance émise.

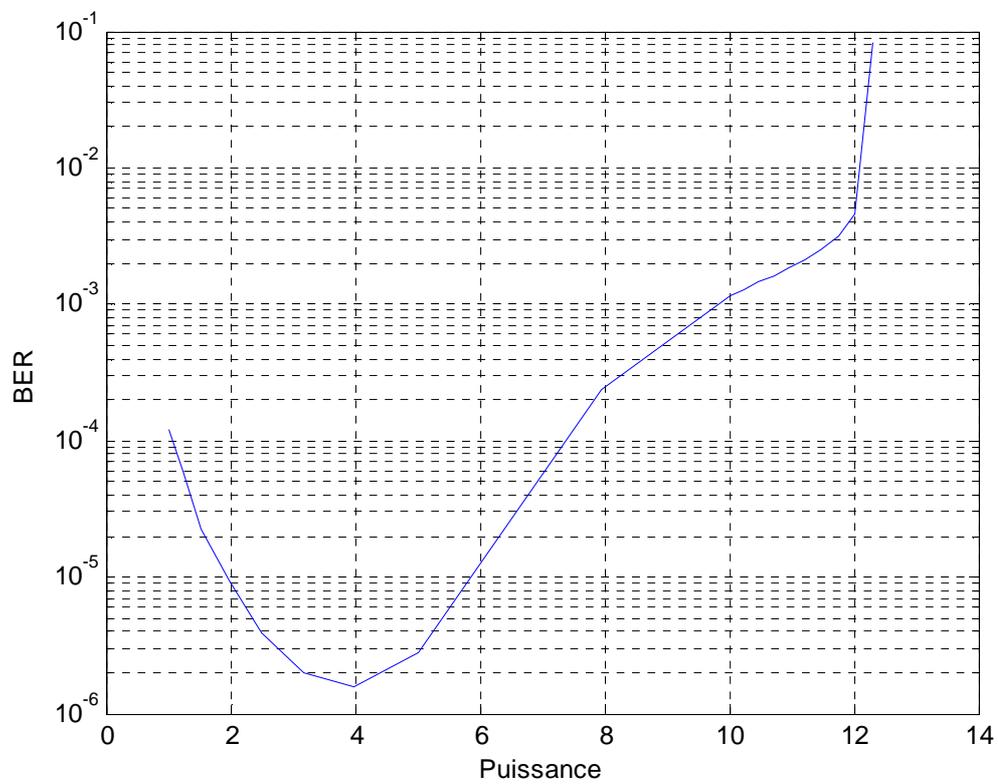


Figure 3.19 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance émise.

Pour ce qui est de la puissance on note une amélioration du facteur de qualité jusqu'à atteindre une valeur de 4mW puis une nette dégradation. On obtient le meilleur taux d'erreur binaire  $10^{-6}$  une puissance de 4mW.

### 3.12. Effet de variation du débit

Le but de toute liaison est d'atteindre une bonne transmission avec le plus grand débit, tout en conservant le signal émis à la réception. Dans ce qui suit on va étudier l'effet du débit sur notre liaison.

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation pour différents débit se propagent sur une distance de 100 km.

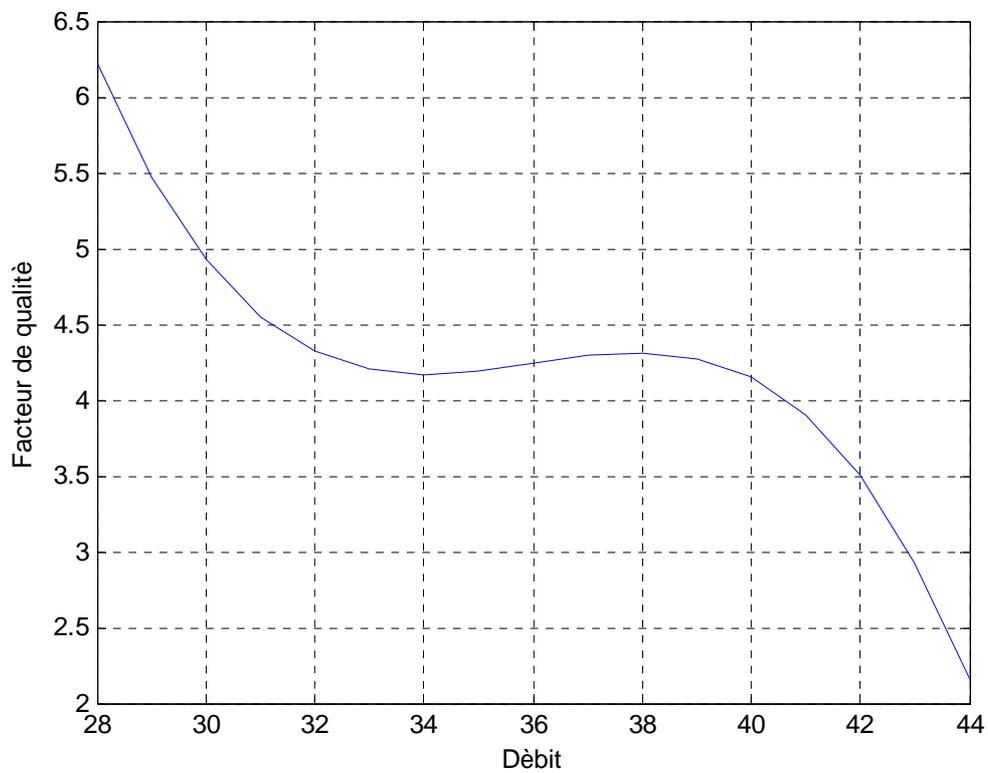


Figure 3.20 : Variation du facteur de qualité en fonction du débit.

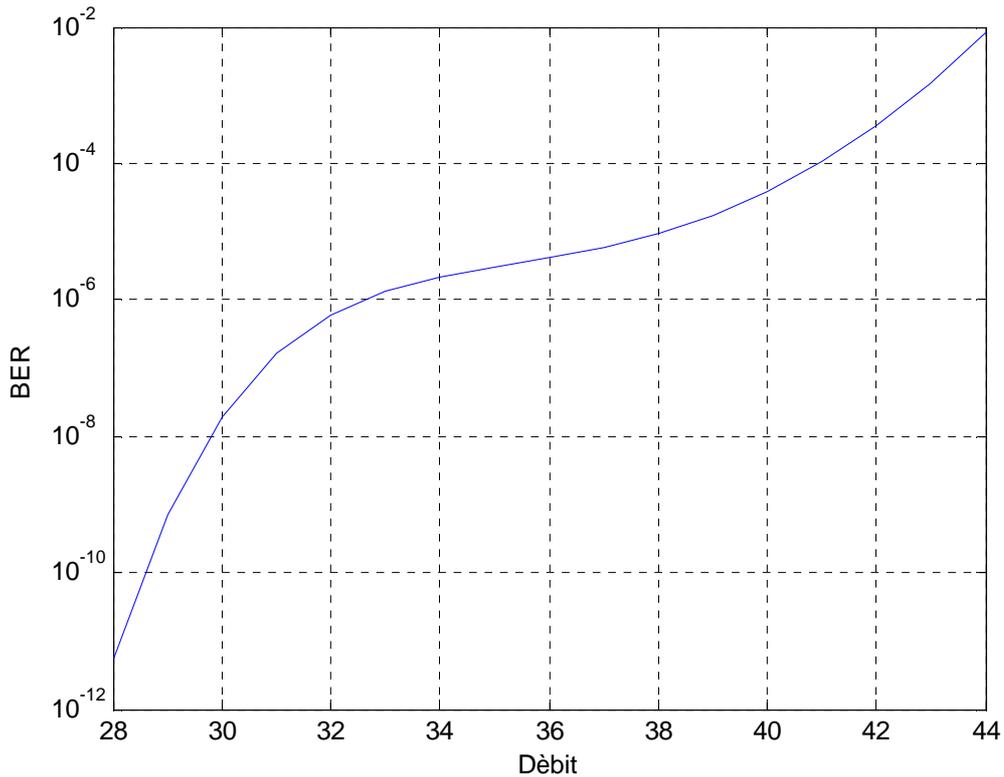


Figure 3.21 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit.

On note une dégradation de la qualité de transmission pour un débit allant jusqu'à 32Gbits/s puis elle se stabilise pour des valeurs de débit 32Gbits/s à 40Gbits/s. à partir de 40Gbits/s on note une dégradation considérable de la qualité de transmission. Pour ce qui est du taux d'erreur binaire on obtient un TEB inférieur à  $10^{-10}$  pour des débits inférieurs à 29Gb/s démontrant une très bonne qualité de transmission sur fibre optique.

### 3.13. Diagramme de l'œil

Les précédentes simulations ont montrés que la qualité de transmission est meilleure pour une distance de 50Km, une puissance de 4mW et débit de 28Gbits/s. Dans ce cas on a testé la liaison avec ces paramètres et on a trouvé le diagramme de l'œil suivant :

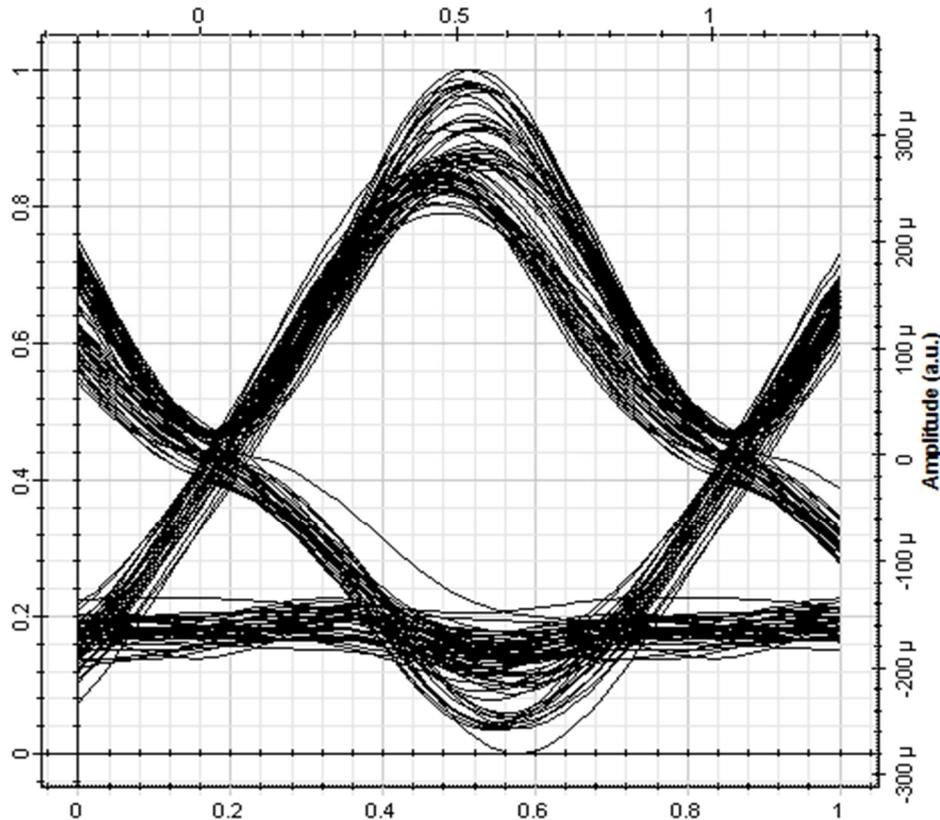


Figure 3.22. Diagramme de l'œil du système avec les paramètres optimaux.

La façon visuelle pour estimer la qualité d'un signal est d'observer le diagramme de l'œil qui représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence reçue. Il représente l'accumulation du bruit d'émission sur le signal au long du parcours. Plus l'œil est ouvert plus on a une meilleure qualité du signal reçu.

On note ci-dessus un diagramme de l'œil ouvert avec un bruit très réduit, ce qui témoigne d'une très bonne qualité de transmission.

### 3.14. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons effectué l'étude de la qualité de transmission en agissant sur différents paramètres tel que la longueur de la fibre optique, la puissance du laser et le débit de transmission.

Cette étude nous a permis de définir les meilleurs paramètres possibles qui assurent une qualité de transmission optimale. Au final, nous avons testé la liaison NRZ-DPSK avec

ces paramètres avec le diagramme de l'œil correspondant qui été ouvert, témoignant d'une très bonne qualité de transmission.

---

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Avec les fibres optiques, l'information n'est plus transmise sous forme électrique, mais lumineuse. Elle est résistante et de moins en moins coûteuse. La fibre optique, ce petit bijou technologique de la taille d'un cheveu, représente le meilleur moyen actuel pour transporter de très hauts débits d'informations numériques, n'a pas fini de nous étonner et de révolutionner le monde des télécommunications.

Ce mémoire est composé de trois chapitres. Le premier chapitre a été consacré à l'étude d'une chaîne de transmission qui est constituée d'un émetteur qui a un rôle de transformer le signal électrique en signal optique, il contient soit une diode DEL soit une diode laser, et un récepteur qui contient une photodiode qui convertit le signal reçu en signal électrique, et un canal de transmission qui est dans notre cas la fibre optique. Le multiplexage en longueur d'onde WDM permet ainsi de multiplier la capacité de transmission des fibres optiques. Cette innovation a été illustrée dans ce chapitre ainsi que le principe, le fonctionnement et les composants spécifiques aux réseaux WDM. On peut distinguer de différentes technologies WDM : CWDM, DWDM, U-DWDM et WWDM.

Au cours du deuxième chapitre, l'étude était portée sur la modulation par saut de phase (PSK) et modulation différentielle (DPSK), la découverte d'une nouvelle technologie qui permet d'avoir accès au haut débit et longue portée pour les systèmes de communication optique.

Pour finir nous avons effectué une série de simulation en agissant sur des facteurs de liaison optique comme la longueur de la fibre, la puissance émise par le signal et le débit approprié à cette liaison.

---

# Bibliographie

---

# Bibliographie

---

- [1] P. LECOY : «Télécoms sur fibres optiques»
- [2] Z.Sidi Ali Mebarek : « Télécommunication optique »
- [3] I et M JOINDOT« Les télécommunications par fibres optiques», DUNOD, 1996
- [4] J. C. PALAIS ,Fiber Optic Communication, 4ème edition, Prentice Hall, 1998
- [5] C. BOISROBERT, Z. TOFFANO, « Cours de DESS et DEA d'Optique et Optoélectronique », Université de Nantes, 2001.
- [6] T. KANEDA, « Silicon and Germanium avalanche photodiodes semiconductor and semimetals», Lightwave Communications Technology, Vol. 22, Part D, Photodetectors.
- [7] D.Vandrome « Transmissions optiques », [http:// www.renaters.fr](http://www.renaters.fr), juin 2007.
- [8] O.Adamus, J.Copin, E.Panetta « Nouvelles technologies reseaux :SONET/WDM », IRIS,2003
- [9] C.Mosse, « Implémentation d'algorithmes pour les reseaux optiques WDM », [clau.mosse@nomade.fr](mailto:clau.mosse@nomade.fr), IUP GMI d'Avignon, 2004
- [10] H.Bauer, « Nouvelles technologies pour de nouvelles perspectives : Combinaison et intelligente des systèmes», CWDM et DWDM, [http:// www.microsens.com](http://www.microsens.com), 2005.
- [11] D.Penninckx, M.Chbat, L et Al. Pierre «The phased-shaped binary transmission (PSBT) : A New technique to transmit far beyond the chromatic dispersion limit» IEEE Photonics Technology Letters Published : FEB 1997
- [12] A .GLAVIEUX, M.JOINDOT «Communications numériques» Paris, Masson, 1996.
- [13] J.C.BIC, D.DUPONTEIL, J.C.IMBEAUX Eléments de communications numériques, Transmission sur fréquence porteuses, Paris, Dunod, 1986.
- [14] F. COULON «Théorie et traitement des signaux» Paris, Dunod, 1984.
- [15] G. Charlet , H.Mardoyan, P. Tran, A.Klekamp, M.Astruc, M. Lefrancois and S.Bigo, 2005, «DPSK modulation format» Electronic Letter
- [16] J. LAURENRT, 2004-Communication Optique à très haut débits. Examen Probatoire. Département STIC. Centre de Paris. 46p
- [17] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6063/1/Mast.Tel.Hamedi.pdf>
- [18] [https://www.google.dz/?gws\\_rd=cr&ei=QuNPVevtKuj7ygPLxICoAw#q=codages transmission](https://www.google.dz/?gws_rd=cr&ei=QuNPVevtKuj7ygPLxICoAw#q=codages transmission)

## Résumé

Les progrès réalisés en optoélectroniques ont permis de concevoir des systèmes capables de transmettre simultanément plusieurs longueurs d'onde de lumière sur une seule fibre. Plusieurs flux de données à débit binaire élevé (2.5Gbits/s, 10Gbit/s et plus récemment 40Gbit/s et 100Gbit/s) ont pu être multiplexés grâce à la division de plusieurs longueurs d'onde (WDM).

Les techniques de modulation de la phase (PSK pour phase-shift keying) présentent aujourd'hui un fort potentiel pour les systèmes de transmission optique à longue distance et à haut débit.

Le but de ce travail est d'étudier et d'évaluer les performances d'un système de transmission WDM se basant sur la technique de modulation DPSK (Differential PSK) avec un codage NRZ.

**Mots clés :** WDM, modulation DPSK, codage NRZ, Taux d'erreur binaire, facteur de qualité.

## Abstract

With the progress that optoelectronic has achieved, telecom engineer can design systems which are able to transmit many signals with different wavelengths simultaneously inside optical fiber. Many data flows with high bit rate (2.5Gbits/s, 10Gbit/s and more recently 40Gbit/s and 100Gbit/s) can be multiplexed by Division wavelength multiplexing (WDM).

Phase modulation techniques (PSK Phase-Shift Keying) have today great potential for optical transmission systems for long distance and high speed.

The aim of our work is to study and evaluate the performance of a WDM transmission system based on the DPSK modulation technique (Differential PSK) with NRZ coding.

**Keywords :** WDM, DPSK modulation, NRZ coding, Bit Error Rate, Quality factor.