

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -  
Faculté de TECHNOLOGIE



**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En** : Télécommunication

**Spécialité** : Systèmes de télécommunication

**Par**: DRIF Meriem & BENABDELOUAHED Bouchra

**Sujet**

**Contribution à la compensation de la dispersion chromatique en utilisant des fibres compensatrices et des fibres de Bragg**

Soutenu publiquement, le 03 / 07 / 2019, devant le jury composé de :

<b>Karim Fath-Allah</b>	<b>MCB</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>	<b>Président</b>
<b>Chikh Bled Mohammed El Kebir</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Ouadah mohammed Chamse eddine</b>	<b>MAB</b>	<b>Univ. Tizi ousou</b>	<b>Co- Encadreur</b>
<b>Chikh Bled Hicham</b>	<b>MAB</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>	<b>Examineur</b>
<b>Debbal Mohammed</b>	<b>MCB</b>	<b>Univ. Ain Témouchent</b>	<b>Invité</b>
<b>Bouregaa Mouweffeq</b>	<b>MCB</b>	<b>Univ. Mascara</b>	<b>Invité</b>

*À nos parents.*

*À nos frères et nos sœurs*

*À nos familles*

*À tous nos amis.*

# *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions **Allah** le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*A notre Encadreur*

**Mr. CHIKH-BLED Mohammed El kebir**

*(Professeur, Université de Tlemcen)*

*Votre compétence, votre clairvoyance et votre grande disponibilité ont constitué un apport considérable sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.*

*Nous vous remercions infiniment pour vos précieux conseils, votre patience et votre confiance.*

*Veillez trouver à travers ces mots, le témoignage de nos sincères remerciements et nos plus grandes estimés.*

*A notre Co-encadreur*

**Mr. OUADAH Mohammed Chamse eddine**

*(Enseignant chercheur, Université Mouloud Maameri Tizi-Ouzou)*

*Nos sincères remerciements s'orientent vers vous, pour votre soutien, votre grande disponibilité et votre aide permanente au cours de ce travail.*

*Vos critiques constructives, vos remarques et vos précieux conseils ont contribué à faire progresser nos recherches.*

*Veillez trouver, dans ces modestes mots, l'expression de notre plus haute considération et nos profonds respects ainsi que notre grande estime.*

*Aux membres du jury*

**Président du Jury : Mr. BOUREGAA Mouwefeq**

*(MCB, Université de Mascara)*

**Examineur : Mr. CHIKH-BLED Hicham**

*(MAB, Université de Tlemcen)*

**Examineur : Mr. DEBBAL Mohammed**

*(MCB, Université d'Ain Témouchent)*

*Messieurs les jurys, nous vous remercions fortement pour l'intérêt que vous avez porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par vos propositions.*

*Nous tenons à vous exprimer nos profondes gratitude et nos sentiments les plus respectueux.*

# Table des matières

Liste des figures .....	8
Liste des tableaux .....	10
Liste des Acronymes .....	11
Introduction générale.....	14
<b>Chapitre 1 : État de L'art</b>	
I. Introduction .....	17
II. Émetteur optique.....	18
II.1 Émetteurs à LED .....	18
II.2. Émetteurs de diodes LASER .....	18
III. Le modulateur de Mach-Zehnder (MMZ) .....	19
IV. Fibre optique .....	20
IV.1. Type des fibres optiques .....	21
IV.1.1. La fibre monomode(SMF).....	21
IV.1.2. La fibre multimode(MMF) .....	22
a) La fibre à saut d'indice .....	22
b) La fibre à gradient d'indice .....	23
IV.2. Avantages de la fibre optique.....	24
IV.3. Inconvénients des fibres optiques .....	26
V. Récepteur optique .....	26
VI. L'amplificateur optique .....	27
VII. Altérations de la fibre optique.....	28
VII.1. L'atténuation .....	28
VII.2. La dispersion.....	29
VIII. Système WDM.....	30
IX. Conclusion .....	31

## Chapitre II : Compensation de Dispersion

I.	Introduction .....	33
II.	La dispersion.....	33
II.1.	La dispersion modale (ou intermodale).....	34
II.2.	La dispersion chromatique.....	35
II.2.1.	La dispersion matérielle $D_m$ .....	36
II.2.2.	La dispersion de guide d'onde $D_g$ .....	36
II.3.	Dispersion de mode de polarisation (PMD) .....	37
III.	Techniques de compensation de dispersion.....	39
III.1.	Technique compensation de dispersion par des fibres compensatrice (DCF) .....	39
III.1.1.	Avantages de DCF.....	41
III.2.	Technique des fibres a réseau de Bragg .....	41
III.2.1.	Les réseaux de Bragg.....	41
III.2.2.	Les fibres à réseaux de Bragg.....	42
III.2.3.	Principe de fonctionnement des fibres à réseau de Bragg .....	43
III.2.4.	Avantages de la fibre à réseau de Bragg.....	45
IV.	Conclusion .....	46

## Chapitre III : Résultats

I.	Introduction .....	48
II.	Chaîne de transmission de base .....	48
III.	Fibre compensatrices de dispersion chromatique (DCF).....	51
IV.	Fibres à réseau de Bragg (FBG).....	57
V.	Compensation de dispersion chromatique dans les liaisons optiques hauts débits .....	64
V.1.	Simulation d'un système WDM sans fibres à réseaux de Bragg .....	65
V.2.	Simulation d'un système WDM avec les fibres à réseaux de Bragg.....	67
VI.	Conclusion .....	70
	Conclusion générale .....	72
	Références bibliographique.....	73

# Liste des figures

## Chapitre I : État de l'art

Figure. I.1. Schéma simplifié d'une LED. ....	18
Figure. I.2.Schéma simplifié d'un modulateur de Mach Zehnder. ....	20
Figure. I.3.Schéma d'un câble à fibre optique. ....	20
Figure. I.4.Structure de fibre monomode. ....	21
Figure. I.5. Fibre à saut d'indice. ....	23
Figure. I.6.Section d'une fibre multimode à gradient d'indice. ....	24
Figure. I.7.Propagation de l'énergie dans une fibre à gradient indice. ....	24
Figure. I.8.Récepteur optique. ....	27
Figure. I.9.Différents types de pertes dans une fibre optique. ....	28
Figure. I.10.La dispersion d'une fibre optique. ....	29
Figure. I.11.Schéma de principe du multiplexage WDM. ....	30

## Chapitre II : Compensation de dispersion

Figure. II.1. Évolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique. ....	33
Figure. II.2. Influence de la dispersion modale sur une impulsion optique. ....	34
Figure. II.3. Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit. ....	35
Figure. II.4. Dispersion de mode de polarisation (PMD). ....	38
Figure. II.5. Pré-compensation DCF. ....	40
Figure. II.6. Prost-compensation DCF. ....	40
Figure. II.7. Pré poste-compensation DCF. ....	40
Figure. II.8. Structure de fibre de Bragg. ....	42
Figure. II.9. Schéma illustrant les propriétés d'un réseau de Bragg. ....	44
Figure. II.10. Pré-compensation FBG. ....	45
Figure. II.11. Poste-compensation FBG. ....	45
Figure. II.12. Pré poste-compensation FBG. ....	45

## Chapitre III : Résultats

Figure. III.1. Chaîne de transmission de base. ....	49
Figure.III.2. Les diagrammes de l'œil (a) pour 10Gbps, (b) pour 20Gbps, (c)pour 40Gbps et (d) pour 60Gbps. ....	50
Figure.III.3. Chaîne de simulation du Pré-DCF. ....	52

Figure.III.4. Chaîne de simulation du Post-DCF. ....	52
Figure.III.5. Chaîne de simulation du Pré-post DCF. ....	53
Figure.III.6. Facteur de qualité en fonction du débit pour Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF...56	
Figure.III.7. Synoptique de chaîne de transmission Pré-FBG.....	58
Figure.III.8. Chaîne de simulation Post FBG.....	59
Figure.III.9. Chaîne de simulation Pré-post FBG. ....	60
Figure.III.10. Facteur de qualité Q en fonction de débit pour Pré-FBG, Post-FBG, Pré post-FBG. .....	64
Figure. III.11. Système WDM à 16 canaux sans fibres à réseaux de Bragg.....	65
Figure. III.12. Diagrammes de l'œil a un débit de 10Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.....	66
Figure. III.13. Diagrammes de l'œil a un débit de 20Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.....	66
Figure. III.14. Diagrammes de l'œil a un débit de 40Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8,(d) canal 16,.....	66
Figure.III.15 Système WDM à 16 canaux avec les fibres à réseaux de Bragg.....	67
Figure. III.16. Diagrammes de l'œil a un débit de 10 Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8(d) canal 16,.....	67
Figure.III.17. Diagrammes de l'œil a un débit de 20 Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.....	68
Figure.III.18. Diagrammes de l'œil a un débit de 40 Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.....	68

## Liste des tableaux

Tableau.III.1. Paramètres de simulation.....	49
Tableau. III.2. Paramètres de simulation avec DCF. ....	51
Tableau. III.3. Diagrammes de l'œil pour Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF avec les différents débits binaires.....	54
Tableau. III.4. Analyse de Pré-DCF.....	55
Tableau. III.5. Analyse de Post-DCF. ....	55
Tableau.III.6. Analyse de Pré post-DCF. ....	55
Tableau. III.7. Paramètres de simulation avec FBG. ....	57
Tableau. III.8. Diagrammes de l'œil pour Pré-FBG, Post-FBG, Pré post-FBG avec des différents débits binaires.....	61
Tableau. III.9. Résultats de la simulation de compensation Post-FBG.....	62
Tableau. III.10. Résultats de la simulation de compensation Pré post-FBG.....	62
Tableau. III.11. Résultats de la simulation de compensation Pré-FBG. ....	63
Tableau.III.12. Taux d'erreur binaire BER, le facteur de qualité Q en dB et la hauteur de l'œil (canal 1).....	68
Tableau.III.13. Taux d'erreur binaire BER, le facteur de qualité Q en dB et la hauteur de l'œil (canal 4).....	69
Tableau. III.14. Taux d'erreur binaire BER, le facteur de qualité Q en dB et la hauteur de l'œil (canal 8).....	69
Tableau. III.15. Taux d'erreur binaire BER, le facteur de qualité Q en dB et la hauteur de l'œil (canal 16).....	69

## Liste des Acronymes

**LED** : Light Emetting Diode (Diode Électroluminescente).

**WDM** : Wave Length Division Multipling (Multiplexage en Longueur D'onde).

**MUX** : Multiplexer.

**DEMUX** : Demultiplexer.

**DL** : Diode LASER.

**LASER** : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificateur de Lumière Par Emission Stimulée).

**DFB** : Distributed Feedback.

**FP** : Fabry-Pérot.

**DBR**: Distributed Bragg Reflector.

**MMZ**: Modulator Mach-Zehnder.

**ON** : Ouverture Numérique.

**FO** : Fibre optique.

**SMF**: Single-Mode Fiber.

**MMF**: Multimode Fiber.

**NRZ**: Non-return to Zero.

**PIN**: Positive Intrinsic Negative.

**LPF**: Low Pass Filter.

**EDFA**: Erbium Doped Fiber Amplifier.

**P<sub>E</sub>** : Puissance d'entrée.

**P<sub>S</sub>** : Puissance de sortie.

**DCF**: Dispersion-Compensating Fiber.

**FBG**: Fiber Bragg Grating.

**D<sub>mod</sub>** : Dispersion modale.

**D<sub>C</sub>** : Dispersion chromatique.

**D<sub>m</sub>** : Dispersion de matériel.

**D<sub>g</sub>** : Dispersion de guide.

**PMD**: Polarization Mode Dispersion.

**BER**: Bit-Error-Rate.

**PRBS**: Pseudo Random Binary Sequence.

**SI** : Saut d'indice.

**FPB** : Filtre Passe Bas.

# Introduction générale

À la fin du 18<sup>ème</sup> siècle (1792), un premier réseau transmettant des informations par le biais de la lumière est apparu par le génial inventeur, l'abbé Claude Chappe qui avait mis au point le télégraphe optique, sachant que les transmissions n'avaient lieu qu'en air libre, en pleine journée.

Ce n'est qu'autour de 1888 que les professeurs Roth et Reuss employèrent des tubes de verre pour éclairer les cavités et les viscères du corps mais ces tubes de verre ne transmettaient l'image que sur 5 mètres !

La découverte du laser et des amplificateurs optiques (EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier) dans les années 60 ont ouvert une nouvelle voie pour la recherche d'un troisième support de transmission, qui n'est autre que la fibre optique, qui a été rendue possible dans les années 1970. Cette fibre est maintenant reconnue comme un élément central des réseaux de communications modernes.

À la fin des années 80, l'apparition du multiplexage par Division de longueur d'onde (WDM) a considérablement accru l'utilisation potentielle de la bande passante de transmission par fibres, Cette technologie a pour point fort d'exploiter avantageusement l'immense bande passante des fibres optiques.

Avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, La fibre optique a rempli très bien ce rôle de support de transmission. Mais, au milieu des années 1990 la popularité croissante de l'internet et d'autres facteurs s'avère nécessaire d'améliorer toujours les caractéristiques de propagation dans les fibres en augmentant la bande passante. Cependant cette stupéfiante montée en débit a rendu le signal de plus en plus sensible à certains facteurs limitatifs pour les fibres optiques au cours de la propagation du signal, parmi de ces problèmes on a la dispersion chromatique.

La dispersion chromatique est la propriété de la fibre optique qui provoque l'élargissement de l'impulsion lors de la propagation à travers la fibre optique dans le cœur, ce qui a pour effet d'introduire des distorsions dans le signal transmis en bout de fibre.

L'enjeu est donc de trouver des techniques afin de compenser la dispersion chromatique et l'amélioration des performances du système optique. Parmi ces techniques de compensation les plus utilisés on trouve les fibres à réseau de Bragg (FBG) et les fibres compensatrice (DCF).

L'objectif de notre travail est consacré en premier lieu à l'étude de la compensation de dispersion chromatique dans les fibres optiques en utilisant les deux techniques FBG et DCF pour un seul canal puis dans un système WDM à 16 canaux.

La mémoire se décline en trois chapitres.

Le premier a pour but de présenter quelques généralités sur les fibres optiques. Il décrit les différents composants d'une chaîne de transmission ainsi que le système WDM.

Le deuxième sera destiné à la dispersion chromatique et la dispersion de mode de polarisation considérées comme des inconvénients majeurs dans une transmission optique. Les différentes techniques de compensation de dispersion seront également présentées.

Enfin, le dernier chapitre présente une série de résultats de simulation obtenus en utilisant les différentes méthodes de compensation de dispersion ainsi que les performances atteintes.

# Chapitre 1 : État de L'art

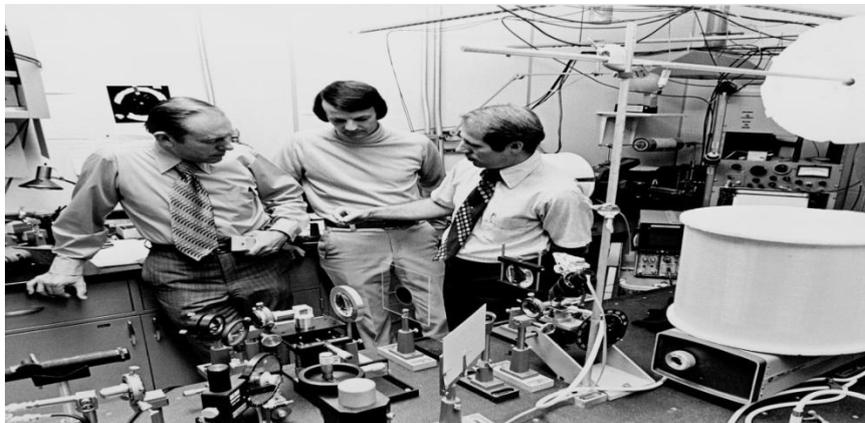
### I. Introduction

Depuis son invention au début des années 1970 par les trois scientifiques Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck, la fibre optique a connu un essor considérable dans les systèmes de transmission et est devenue un des médias le plus utilisés pour transmettre tous types de données (audio, vidéo, Internet). Ce choix est dû aux efforts soutenus des chercheurs dans le domaine des télécommunications optiques.

Ces efforts de recherche ont conduit au développement des amplificateurs à fibre dopée. Cette découverte majeure non seulement renouvelle l'essor des télécommunications par fibres optiques mais révolutionne aussi les architectures de réseaux envisageables [1].

Ainsi, en réponse aux besoins croissants en débit, les systèmes de transmissions optiques ont développé des techniques de multiplexage. Ces techniques permettent une densification du trafic des données sur les réseaux de télécommunications

Toute étude doit nécessairement débiter par un parcours de généralités afin d'apporter les notions de base. Au cours de ce chapitre, nous allons faire une description générale des éléments constituant une chaîne de transmission optique. En premiers lieu, on va présenter l'émetteur qui est composé d'une diode DEL, ou une diode laser et d'une modulation, un canal de propagation qui est la fibre optique tout en citant leurs types, avantages et inconvénients, et enfin le récepteur. Ensuite, nous décrivons brièvement les amplificateurs optiques et les principaux effets de dégradation de signal lors du transport. Enfin, nous introduisons brièvement la technique du multiplexage en longueur d'onde (ou WDM pour Wavelength Division Multiplexing).



### II. Émetteur optique

Dans un système de télécommunications optiques il est nécessaire de disposer d'un émetteur optique qui a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Il comprend généralement le composant optoélectronique d'émission, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode LASER (DL) (émission spontanée pour les DEL et émission stimulée pour les DL) ; il est relié au câble optique soit par une embase de connecteur, soit par une fibre amorce qu'il faut raccorder. Ces deux types de sources sont réalisés à partir de jonction PN polarisée en direct [2].

#### II.1 Émetteurs à LED

Le mot LED est l'acronyme de "Light Emitting Diode" (Diode Electroluminescente en français). Le symbole de la LED est le même que celui de la diode mais on y a ajouté deux flèches sortantes pour représenter le rayonnement lumineux émis comme il est présenté dans la figure (I. 1)

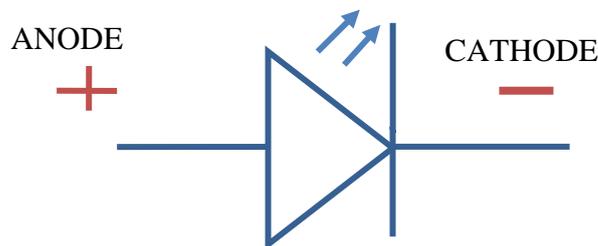


Figure. I.1. Schéma simplifié d'une LED.

La LED est un élément électronique ou plus nettement optoélectronique qui produit de la lumière lorsqu'elle est traversée par un courant électronique.

Comme il est mentionné ci-dessus dans sa forme la plus basique une LED est juste une jonction PN, la recombinaison des électrons libres et les trous qui forment les porteurs majoritaires, donne lieu à une émission de la lumière [3].

Parmi les avantages des DELs on a ; la luminescence élevée, la rapidité de réponse, la grande fiabilité, la forme variée, l'encombrement réduit et la tension d'alimentation faible.

#### II.2. Émetteurs de diodes LASER

Le mot LASER est l'acronyme de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement en Français), c'est un

dispositif à semi-conducteur délivrant un faisceau lumineux monochromatique et cohérent ; les longueurs d'ondes pour les applications en télécommunications correspondant en général à 1.3  $\mu\text{m}$  et 1.55  $\mu\text{m}$  [4].

Dès le début des systèmes de transmission par fibre optique, le choix des sources optiques s'est porté sur les lasers à semi-conducteur (Distributed Feedback (DFB), Fabry-Pérot (FP), Distributed Bragg Reflector (DBR)) en raison de leurs petites dimensions, leur spectre optique relativement étroit, la facilité de moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant et leur faible consommation énergétique [5].

### III. Le modulateur de Mach-Zehnder (MMZ)

Les modulateurs Mach Zehnder sont basés sur les effets électro-optiques ( $\text{LiNO}_3$ , GaAs), à savoir que le changement de l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique [6]. On distingue, deux types d'effets électro-optiques :

- Effet Pockels dans lequel, la variation de l'indice optique est proportionnelle au champ appliqué.
- Effet Kerr, où la variation de l'indice est proportionnelle au carré du champ appliqué.

Le MMZ est un interféromètre formé souvent d'un bras de référence et d'un bras dans lequel une variation de phase est induite par effet électro-optique. Ces deux bras sont deux guides optiques parallèles et de longueurs égales comme le montre la figure (I.2).

La lumière incidente est divisée de manière égale entre les deux bras de l'interféromètre, quand aucune tension n'est appliquée aux guides d'ondes. La recombinaison des ondes provenant des bras conduit à une figure d'interférence. Si une tension est appliquée à l'un des bras de sorte que la différence de phase entre les deux faisceaux de sortie est un multiple impair de  $\pi$ , l'interférence est destructive (aucune lumière n'est injectée en sortie). L'interféromètre de MZ constitue donc un modulateur d'amplitude [7].

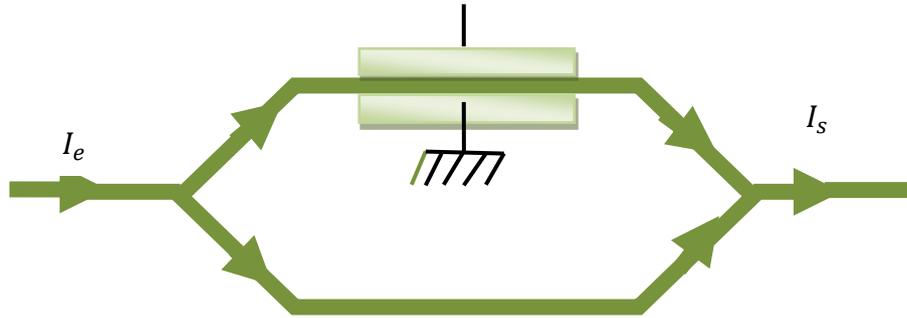


Figure. I.2.Schéma simplifié d'un modulateur de Mach Zehnder.

#### IV. Fibre optique

Une fibre optique est un guide d'onde cylindrique et diélectrique aussi fin que des cheveux humains, constitué de matériaux à faible perte tel que verre de silice ; dans sa forme la plus simple, elle se compose d'une partie centrale appelée le cœur, d'indice de réfraction  $n_1$ , et d'une gaine optique, d'indice de réfraction  $n_2$ , entourée par un revêtement protecteur pour le protéger des dommages environnementaux et mécaniques [8].

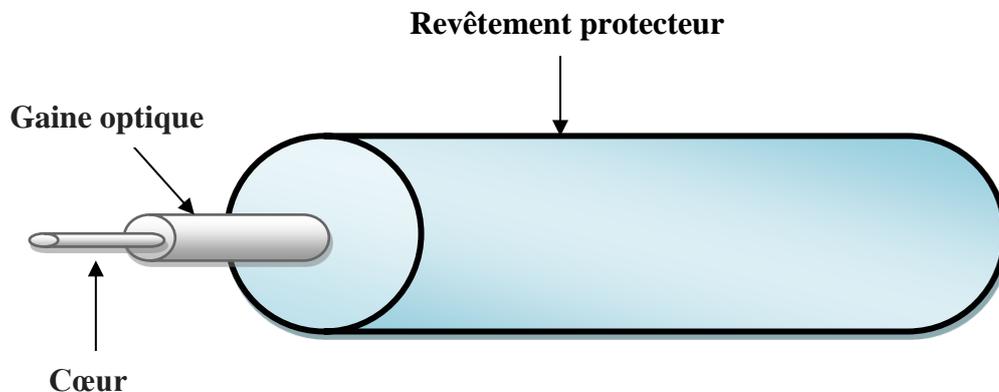


Figure. I.3.Schéma d'un câble à fibre optique.

Le guidage de la lumière dans la fibre se fait par la réflexion totale interne. Cela n'est garanti que si deux conditions sont réunies ; la première condition est que le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui du cœur. La deuxième condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique (ON) [9] :

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (I.1)$$

#### IV.1. Type des fibres optiques

Selon le profil d'indice de la fibre optique, il existe deux grandes familles de fibres optiques : la fibre optique monomode et la fibre optique multimode. La fréquence normalisée  $V$  est donné par la relation suivante :

$$V = \frac{2. \pi. a}{\lambda} ON \quad (I.2)$$

$a$  représente le rayon du cœur,  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $ON$  l'ouverture numérique.

Si  $V$  est plus petit que 2.405, un seul mode peut se propager ; la fibre est dite monomode et si  $V$  est supérieur à 2.405, la fibre est dite multimode.

Par ailleurs, selon le profil d'indice de réfraction de la fibre optique, elle peut être classée comme : fibre monomode à saut d'indice, fibre multimode à saut d'indice et fibre multimode à gradient d'indice [10].

##### IV.1.1. La fibre monomode (SMF)

La fibre monomode possède un diamètre du cœur très petit ( $<10\mu\text{m}$ ), ce diamètre est tellement réduit qu'il ne peut exister qu'un seul mode de propagation d'où l'appellation mono (uni) mode.

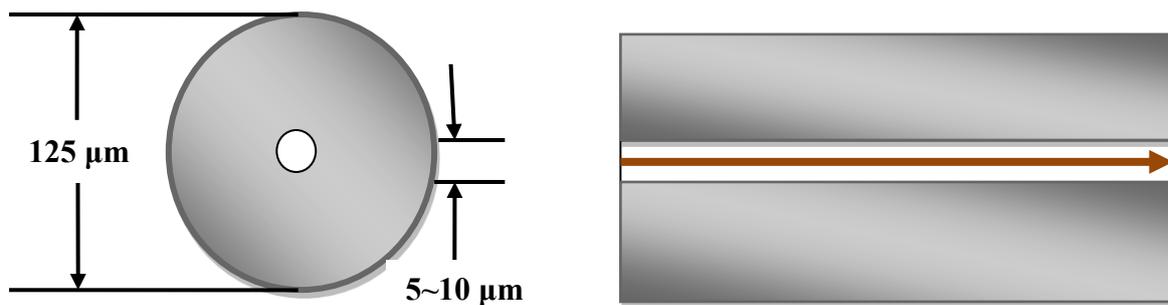


Figure. I.4. Structure de fibre monomode.

Actuellement les fibres monomodes présentent une bande passante plus large et une atténuation de l'ordre (0.5 dB/km pour 1.3 et 0.2 dB/Km pour  $\lambda= 1.5 \mu\text{m}$ ). C'est pour cette raison qu'elles sont universellement utilisées pour les transmissions haut débit et sur des longues distances [11].

### IV.1.2. La fibre multimode (MMF)

C'est une fibre dont le diamètre du cœur est important (supérieur ou égale à  $50\mu\text{m}$ ) pour que le faisceau de la lumière puisse se propager suivant plusieurs chemins nommés « Modes », le nombre de mode se propageant dans le cœur égale approximativement à  $V^2/2$ .

Comme ce type de fibre à plusieurs modes de propagation, certains d'entre eux se propagent plus rapidement que d'autres. Ce qui provoque la dispersion intermodale qui est la source principale de déformation temporelle des impulsions optiques codant l'information numérique. Ce type de fibre optique est habituellement réservé à des applications courte distance telle que les réseaux informatiques [12].

Selon le profil d'indice, On distingue deux types de fibres optiques :

- Fibres à saut d'indice
- Fibres à gradient d'indice.

#### a) La fibre à saut d'indice

Dans les fibres à saut d'indice, l'indice de réfraction reste constant dans tout le cœur, puis décroît brusquement en effectuant un saut d'indice dans la gaine. Les rayons qui se propagent dans ce type de fibre ayant la même longueur d'onde en prenant des chemins différents avec une vitesse de valeur constante  $v = \frac{c}{n_1}$ .

Ces rayons donc arrivent à destination avec des temps distincts selon les chemins effectués, ceci cause une forte dispersion du signal lumineux.

Le profil de l'indice de réfraction dans le cœur et la gaine est exprimé comme suit [14] :

$$n(r) = \begin{cases} n_1 r < a & (\text{cœur}) \\ n_2 r \geq a & (\text{gaine}) \end{cases} \quad (I.3)$$

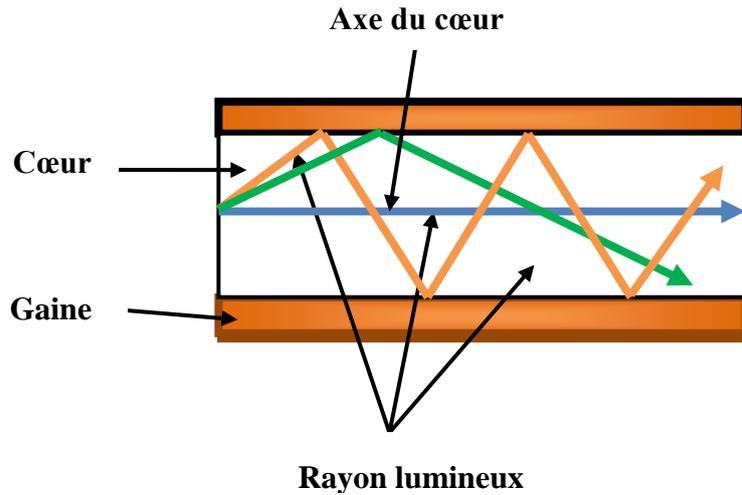


Figure. I.5. Fibre à saut d'indice.

Les fibres à saut d'indice ont typiquement, un diamètre de cœur de 1mm, un diamètre de gaine de 2.2 mm et une bande passante de 25 MHz (par ex : 10 Mbits/s en NRZ sur une distance  $\leq 100$  m), elles sont généralement utilisées pour les liaisons jusqu'à 150 m [13].

#### b) La fibre à gradient d'indice

L'indice de réfraction du cœur dans les fibres à gradient d'indice n'est pas constant, mais diminue graduellement de sa valeur maximale  $n_1$  au centre du cœur à sa valeur minimale  $n_2$  à l'interface entre le cœur et la gaine. Cette variation de l'indice peut être représentée comme suit :

$$n(r) = \begin{cases} n_1(1 - 2\Delta(r/a)^\alpha)^{1/2} & r < a & (\text{cœur}) \\ n_1(1 - 2\Delta)^{1/2} = n_2 & r \geq a & (\text{gaine}) \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Où  $\Delta$  est la différence relative d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine,  $a$  est le rayon du cœur, et  $\alpha$  le paramètre de profil d'indice [14].

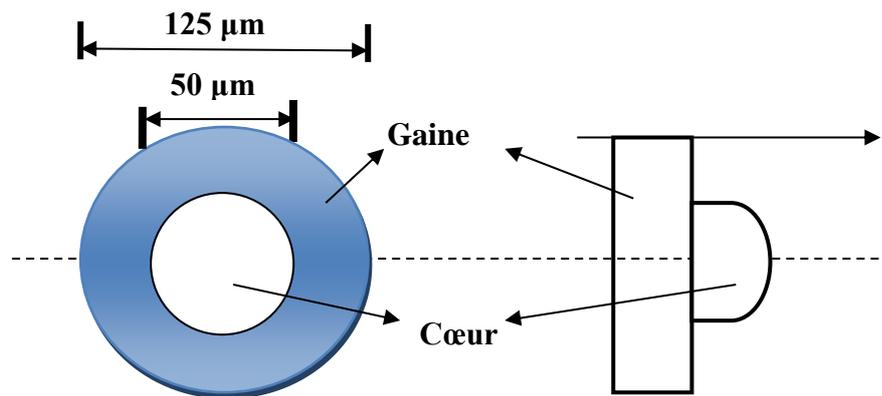


Figure. I.6. Section d'une fibre multimode à gradient d'indice.

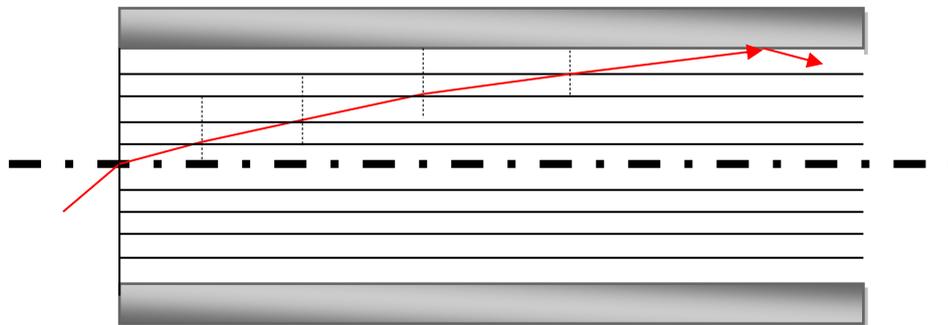


Figure. I.7. Propagation de l'énergie dans une fibre à gradient indice.

La figure (I.7) montre comment les rayons se propagent d'une manière quasi ellipsoïdale à cause des variations de l'indice de réfraction dans le cœur dans une fibre à gradient d'indice.

Les fibres à gradient d'indice (silice dopée) ont typiquement, un diamètre de cœur de 50 à 62.5  $\mu\text{m}$ , un diamètre de gaine de 150  $\mu\text{m}$  et une bande passante de 100 à 1000 MHz/km. [13].

#### IV.2. Avantages de la fibre optique

Les systèmes à fibres optiques ont largement remplacé les systèmes de communication à base de métal, en raison de leurs avantages par rapport à la transmission électrique. Les principaux avantages de la transmission par fibre optique sont :

- ✓ **Une large bande passante** : aucun autre support de transmission n'offre la bande passante que la fibre optique. La quantité d'information qui peut être transportée par

unité de câble à fibre optique est énormément plus élevée que les câbles métalliques (une vitesse allant jusqu'à 1.6 Tb/s dans les systèmes déployés sur le terrain et jusqu'à 10 Tb/s dans les systèmes de laboratoire).

- ✓ **Petite taille et poids** : Le câble en Fibre est beaucoup plus petit et plus léger que les câbles électriques pour faire le même travail [3]. Il occupe aussi moins d'espace que des câbles métalliques de la même capacité d'information.
- ✓ **Le Coût des matériaux** : Contrairement au cuivre, les matières premières pour le verre sont moins chères. Cela signifie que plusieurs kilomètres de câble à fibre optique peuvent être réalisés pour moins cher ; que des longueurs équivalentes en fil de cuivre.
- ✓ **Isolation électrique** : Comme la fibre optique n'a pas de composants métalliques, elle peut être utilisée dans les environnements de forte incidence de la foudre, les zones inflammables et les zones de brouillages électromagnétiques sans être affectée.
- ✓ **Pas d'interférence électromagnétique** : La transmission de la lumière par les fibres optiques n'est pas affectée par d'autres rayonnements électromagnétiques à proximité puisque la fibre optique appartient au matériau isolant, de raison qu'elle n'agit pas en tant qu'antenne pour capter les signaux électromagnétiques. Elle peut également fonctionner dans des environnements électriquement bruyants, sans problème, car le bruit électrique n'affectera pas la fibre [14]. C'est pourquoi la communication optique comporte si peu d'erreurs.
- ✓ **Faible perte de transmission** : Lorsque le signal de fréquence élevée est propagé par un câble coaxial traditionnel, il perd la moitié de sa puissance seulement après quelques centaines de mètres, par contre la fibre optique offre une très faible perte de transmission avec un pas de régénération de 15 km ou plus. Ainsi, un répéteur sera requis à très longue distance [15].
- ✓ **Longue durée de vie** : Le cycle de vie d'un réseau en fibre optique est de 20 ans, alors que le seuil de rentabilité moyen varie de 2 à 5 ans. La fibre optique est donc une valeur sûre et durable économiquement pour les entreprises [16].

- ✓ **Sécurité des signaux** : La lumière provenant des fibres optiques ne rayonne pas de façon significative et offre donc un degré élevé de sécurité du signal. Contrairement à la situation des câbles de cuivre, un signal optique transmis ne peut pas être obtenu à partir d'une fibre de manière non invasive (c.-à-d. sans tirer l'énergie optique de la fibre). Cette caractéristique est évidemment intéressante pour les applications militaires et bancaires [13].

### IV.3. Inconvénients des fibres optiques

Comme tout système de communication, la fibre optique n'a pas que des avantages. Cependant, on trouve certaines limitations :

- ✓ L'installation des fibres optiques exige des dépenses très importantes.
- ✓ Il est particulièrement difficile d'assembler des fibres optiques à cause de la très petite dimension du cœur. Cela nécessite des compétences spéciales et des équipements d'épissage et de mesure coûteux.
- ✓ La fibre optique est très fragile vue de sa composition.
- ✓ La fibre peut être affectée par les divers produits chimiques, y compris l'hydrogène gazeux (un problème sur les câbles sous-marins).
- ✓ La dispersion dans les fibres optiques, car elle limite le débit de transmission des données dans ces dernières.

## V. Récepteur optique

Dans une chaîne de transmission par fibre optique, le récepteur est un élément aussi essentiel que l'émetteur [9]. Son rôle est de convertir le signal optique reçu à la sortie de la fibre optique en signal électrique en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur qui présente les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, tel est le cas des photodiodes PIN ou à avalanches [11]. Puisque le courant électrique est très faible, un amplificateur électrique à gain élevé est ajouté pour rendre le photo-courant produit suffisamment fort. Après avoir été amplifié, le signal passe par un filtre Passe-bas (LPF) pour réduire le bruit qu'il produit en dehors de la bande passante du signal avant de subir un traitement électronique pour analyser les données fournies.

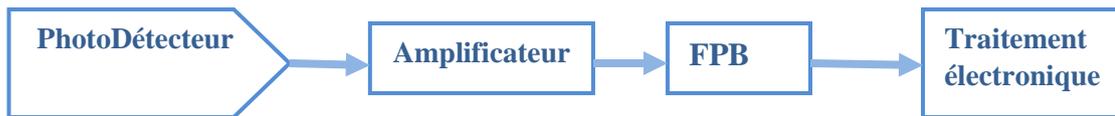


Figure. I.8. Récepteur optique.

Du point de vue des liaisons par fibre, les paramètres importants qui caractérisent la détection sont : la longueur d'onde de coupure, la sensibilité du détecteur ( $A/W$ ) qui chiffre le rapport entre le photo-courant recueilli et la puissance optique incidente, le rendement quantique, et le courant d'obscurité du détecteur [12].

### VI. L'amplificateur optique

Une évolution énorme a été effectuée sur les fibres et les dispositifs pour les systèmes de communications optiques au début des années 60. Mais les vrais changements ont été dans les années 1980 quand les amplificateurs apparus.

Dans les systèmes optiques, les données transportées sur des distances très longues sont attachées à de divers effets qui dégradent le signal tel que l'atténuation, l'élargissement, le déphasage...etc.

La résolution de ce problème a été dépassée traditionnellement à l'aide des répéteurs optoélectroniques qui sert à transformé le signal optique en signal électrique puis le régénéré à l'aide d'un émetteur optique.

Cette technique devient très complexe à mettre en œuvre, et coûteuse pour les systèmes multicanaux, d'où l'idée de remplacer ces répéteurs par des amplificateurs optiques qui amplifient directement le signal optique sans exiger sa conversion au domaine électrique et qui sont beaucoup plus simples et devrait coûter beaucoup moins que les répéteurs [17].

Il existe de nombreux types d'amplificateurs optiques ; On distingue les amplificateurs à semi-conducteurs, les amplificateurs Raman et les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA). Leur principe repose sur la possibilité d'amplification optique par émission stimulée de lumière. Ici on va s'intéresser qu'à l'amplificateur EDFA, qui occupe une place importante dans les liaisons par fibre, notamment en tant qu'amplificateur de ligne [12].

## VII. Altérations de la fibre optique

### VII.1. L'atténuation

Lors de la propagation dans une fibre optique, la lumière subit une distorsion due aux différents types de pertes telles que les effets d'absorption, de diffusion et de rayonnement. Ce qui résulte l'affaiblissement de la puissance moyenne du signal lumineux. La figure (I.9) représente les différents types de pertes dans une fibre optique.

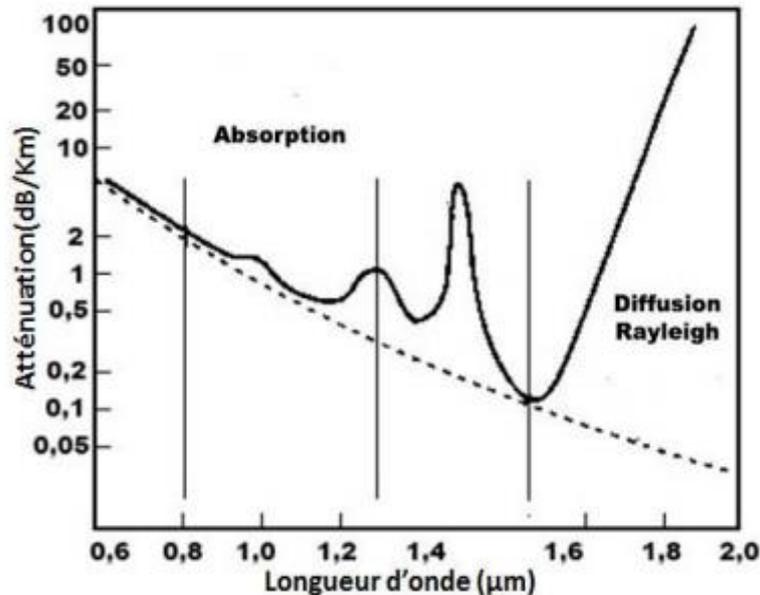


Figure. I.9. Différents types de pertes dans une fibre optique [4].

Un coefficient d'atténuation est exprimé généralement en décibel par kilomètre (dB/Km) ou en décibel par mètre (dB/m) et se calcule à partir des puissances mesurées en entrée de fibre  $P_E$  et en sortie  $P_S$  de la lumière se propageant dans une fibre de longueur  $L$  :

$$\alpha = -\frac{10}{L} \log\left[\frac{P_S}{P_E}\right] \quad (I.5)$$

Suivant l'atténuation les fibres peuvent être utilisées pour la propagation essentiellement dans deux « fenêtres en longueur d'onde » :

- ✓ Les fenêtres 1300 nm qui ont une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne importante d'environ 0,4 dB/km ; mais les composants optoélectroniques à ces longueurs d'ondes (lasers et récepteurs) sont peu coûteux ; elles sont utilisées pour les systèmes de télécommunications courtes distances (quelques dizaines de kilomètres) ou de faibles capacités.

- ✓ Les fenêtres à 1550 nm qui ont une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0.2 dB/km ; elles se divisent en trois bandes S, C et L, elles sont utilisées généralement pour les télécommunications longues distances et à haut débit à cause de la faible atténuation dans cette fenêtre qui permet d'espacer bien davantage les coûteux régénérateurs et/ou amplificateurs nécessaires pour la compensation de l'atténuation dans la fibre [18].

### VII.2. La dispersion

Actuellement, c'est la dispersion, et non pas l'atténuation, le facteur limitant de performances dans la communication par fibre optique. La dispersion est définie par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation. Cet élargissement réduit le débit dans un système de communication optique, car il force à accroître le délai entre deux impulsions figure (I. 10),

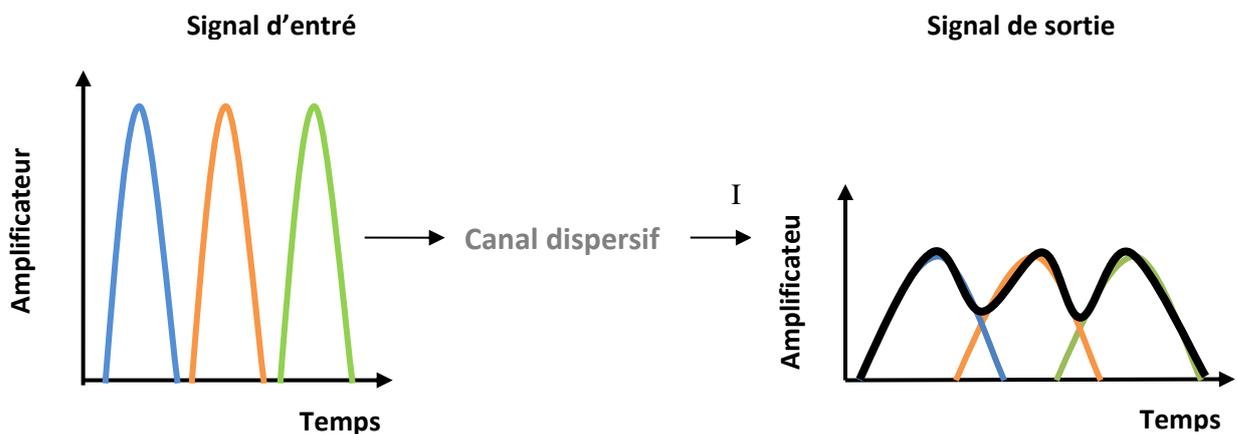


Figure. I.10. La dispersion d'une fibre optique.

Il y a plusieurs causes pouvant expliquer ce phénomène. La première cause vient du fait que les vitesses de groupe des différents modes ne sont pas pareilles pour une longueur d'onde donnée (lorsque nous considérons la propagation dans une fibre multimode), cet effet est nommé dispersion modale.

La deuxième cause vient du fait que l'indice de réfraction d'un milieu dépend de la longueur d'onde et que les sources utilisées pour transmettre le signal ne sont pas purement monochromatiques (on parle alors de dispersion chromatique ou de dispersion matériau). Les différentes composantes spectrales d'une source ont donc des temps de propagation différents, ce qui provoque l'élargissement d'une impulsion (peu importe le fait qu'elle soit guidée ou non) [19].

Supposant que l'impulsion est gaussienne, l'élargissement de l'impulsion  $\Delta t_{est}$  défini comme suit :

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_E^2 - \Delta t_S^2} \quad (I.6)$$

$\Delta t$  est exprimé en nanosecondes ou picosecondes.

### VIII. Système WDM

Cette partie vise à présenter une vue générale sur la technique de multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing).

Le multiplexage à répartition de longueur d'onde WDM consiste à utiliser des longueurs d'ondes légèrement différentes (couleur différente) pour transmettre différents signaux sur une même fibre (figure (I.11)). Cette technologie a permis d'augmenter le débit de transmission dans les liens point à point. Plusieurs signaux générés indépendamment dans le domaine électronique sont convertis vers le domaine optique en utilisant des diodes lasers de différentes longueurs d'onde mais assez proches. Les signaux résultants sont ensuite multiplexés et couplés à une fibre optique [11]. Le récepteur ou le nœud de répartition n'aura qu'à démultiplexer le signal pour obtenir les divers canaux de départ.

Afin d'augmenter la capacité totale d'un système WDM, il est possible de jouer sur le débit transporté par chaque canal ou sur le nombre de canaux.

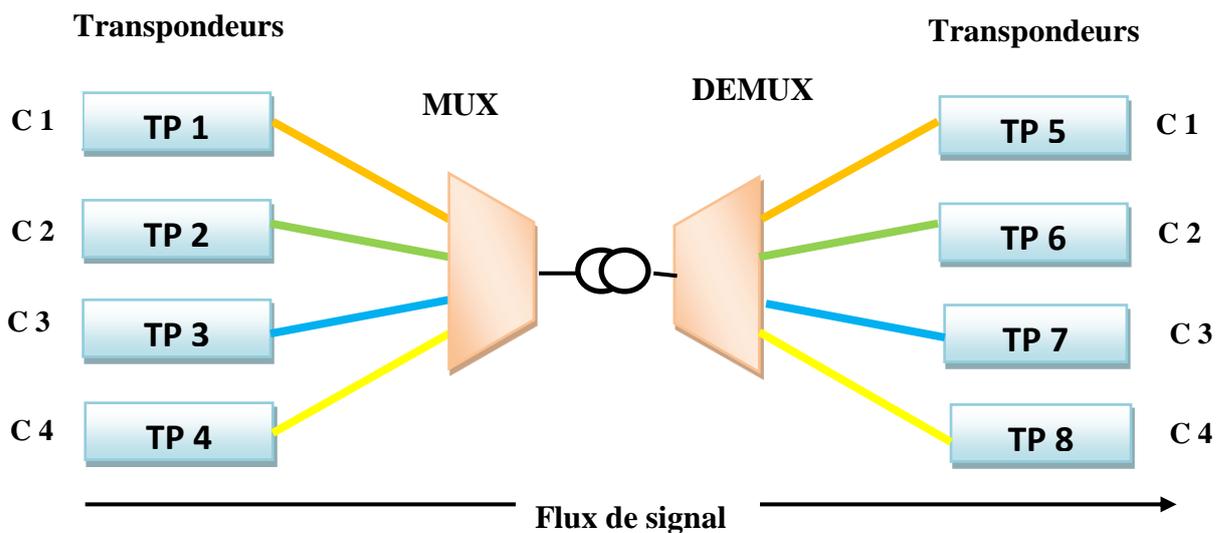


Figure. I.11.Schéma de principe du multiplexage WDM.

Les premiers systèmes WDM apparus vers 1995 offraient des débits de 10 Gbit/s (soit 4 canaux multiplexent sur la bande C ayant une capacité nominale de 2,5 Gbit/s), le premier réseau long distance à avoir bénéficié de cette technique est le réseau sous-marin Sea-Me-We3 mis en service en 1998 avec un débit de 20 Gbit/s (soit 8 x 2,5 Gbit/s) [21].

L'avantage de la technique WDM est qu'elle ne dépend pas de la vitesse des équipements électroniques. Mais le nombre de longueurs d'onde qu'une fibre peut transporter est borné : d'une dizaine de longueurs d'ondes il y a quelques années, on est passé à plusieurs centaines aujourd'hui. De plus, en WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissants avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux [18].

### **IX. Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les trois blocs, que comporte la chaîne de transmission optique ainsi que les différents éléments essentiels de chaque bloc, en s'attardant sur les différentes dégradations que subit le signal au cours de sa propagation dans une fibre optique telle que L'atténuation et le phénomène de la dispersion chromatique. Ensuite, une description globale sur la technique de multiplexage en longueur d'onde a été réalisée.

# **Chapitre II :**

## **Compensation de**

### **Dispersion**

## I. Introduction

L'augmentation du débit sur les lignes de transmission utilisées aujourd'hui a fait de la dispersion un problème majeur. La dispersion de vitesse de groupe induite dans la fibre perturbe la propagation du signal dans les réseaux de télécommunications optiques. Le phénomène se traduit par l'élargissement temporel des impulsions lumineuses constituant le signal, ce qui a pour effet d'introduire des distorsions dans le signal transmis en bout de fibre. Il est donc impératif de compenser la dispersion cumulée au cours de sa propagation.

Pour remédier à ces problèmes d'élargissement temporel nous allons nous focaliser sur les techniques de compensation de la dispersion chromatique. Deux techniques de compensation seront envisagées : la première utilise la fibre compensatrice (DCF), tandis que la seconde utilise la fibre de Bragg (FBG). Ces deux composants vont nous permettre de compenser la dispersion chromatique.

## II. La dispersion

Lorsqu'une impulsion se propage en régime linéaire dans une fibre optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporel de celle-ci (figure. II.1)

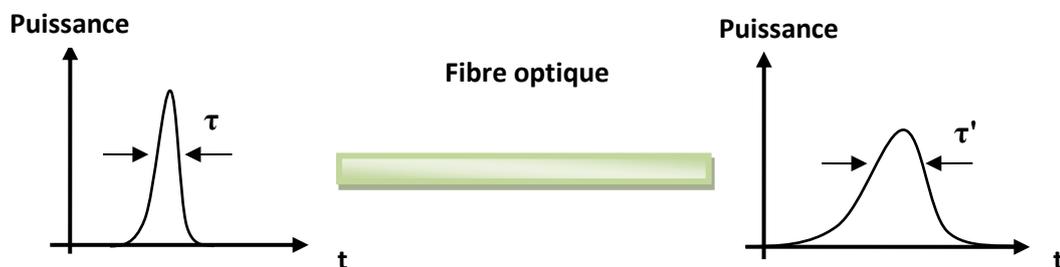


Figure. II.1. Évolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique.

Une impulsion lumineuse s'élargit lorsqu'elle se propage le long de la fibre. Cette distorsion est la conséquence de la dispersion, au sens large la dispersion est définie comme étant l'étalement ou l'élargissement de l'impulsion dans une fibre optique. Des éléments tels que l'ouverture numérique, le diamètre du noyau, l'indice de réfraction, la longueur d'onde ou encore et la largeur de ligne du laser peuvent causer l'impulsion à s'élargir. La dispersion augmente le long de la longueur de la fibre [22]. Les liaisons optiques à longue distance utilisent une fibre monomode, et donc la dispersion intermodale n'est pas présente.

Il existe plusieurs types de dispersion contribuant à l'étalement de l'impulsion au cours de sa propagation dans le guide : Dispersion modale, dispersion chromatique dont la dispersion matérielle et la dispersion du guide d'onde et la dispersion de polarisation.

### II.1. La dispersion modale (ou intermodale)

La dispersion modale vient du fait que les différents modes d'une fibre ont leur vitesse de groupe propre et donc au bout d'un certain temps de propagation, les différents modes seront décalés les uns par rapport aux autres. Au moment de détecter le signal, les modes seront combinés au niveau du détecteur ayant pour conséquence une impulsion élargie. L'ensemble des retards entre les différents rayons qui composent le signal lumineux, détermine en réception une distorsion du signal électrique obtenu par le convertisseur optique-électrique. Cette distorsion est la Dispersion Modale ; ce phénomène apparaît dans les fibres multimodes à saut d'indice ou à gradient d'indice. et dans le cas d'une fibre optique monomode, cette dispersion est nulle.

La dispersion modale  $D_{mod}$  est l'élargissement temporel maximum  $\tau$  d'une impulsion par unité de longueur de la fibre [23].

$$D_{mod} = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{\tau}{L} \quad [Ps/km] \quad (II. 1)$$

$t_{max}$  et  $t_{min}$  représentent respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide.

$L$  : longueur de la fibre optique.

Par conséquent, les modes ne seront pas reçus en même temps et le signal sera déformé, l'impulsion est alors étalée (figure II.2).

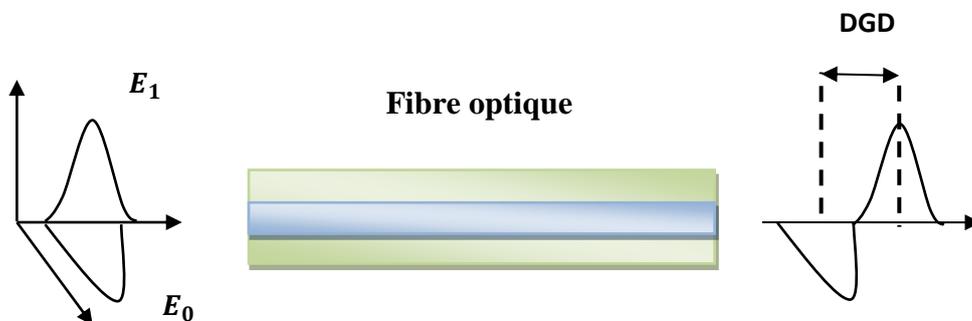


Figure. II.2. Influence de la dispersion modale sur une impulsion optique.

## II.2. La dispersion chromatique

La dispersion chromatique ou intermodale est un paramètre important dans une fibre optique. Quand une onde électromagnétique interfère avec les électrons liés d'un diélectrique, la réponse du support dépend de la fréquence optique  $\omega$ . Cette propriété, connu sous le nom de dispersion chromatique, se manifeste à travers la dépendance fréquentielle de l'indice de réfraction  $n(\omega)$ . L'origine de la dispersion chromatique est liée à la caractéristique des fréquences de résonance pour lesquelles le support absorbe les radiations électromagnétiques à travers les oscillations des électrons liés. Elle induit un élargissement temporel des impulsions se propageant dans la fibre.

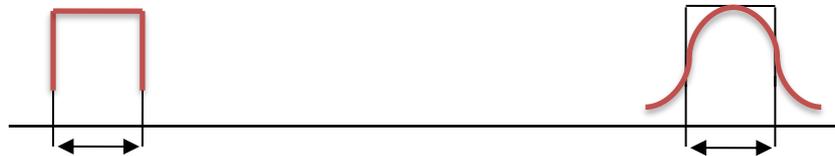


Figure. II.3. Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit.

En d'autres termes, la déformation de l'impulsion qui se propage dans la fibre est due au fait que la source transmet des impulsions qui contiennent une distribution bien déterminée de longueurs d'ondes autour de l'onde centrale. Chaque longueur d'onde se propage avec une vitesse différente causant ainsi l'élargissement de l'impulsion originale [24].

$D_c$  : Elle limite aussi la distance sur laquelle un signal peut être transmis sans régénération électronique du signal numérique d'origine. Cette distance est appelée limite de dispersion ou longueur de dispersion chromatique  $LD_c$ . Elle représente la distance de transmission au bout de laquelle une impulsion s'élargira de l'intervalle d'un bit. La limite de dispersion estimée pour un signal de largeur spectrale  $\Delta\lambda$  est donnée par [18].

$$L_D \approx \frac{1}{2 \cdot B \cdot D_c \cdot \Delta\lambda} \quad (II.2)$$

Où B est le débit de transmission.

Cela veut dire aussi que pour une longueur de transmission donnée L, la dispersion chromatique limite également le débit qu'on peut transmettre dans une liaison optique.

La dispersion chromatique, c'est un paramètre important dans une fibre optique. Elle comporte la dispersion du matériau (est causée par la dépendance de l'indice de réfraction de

la longueur d'onde) et la dispersion du guide d'onde (Elle est causée par le fait que la répartition de la lumière du mode fondamental sur le cœur et la gaine dépend de la longueur d'onde) ; elle s'exprime alors selon :

$$D_c = D_m + D_g \quad (\text{II.3})$$

### II.2.1. La dispersion matérielle $D_m$

Elle trouve son origine dans la dépendance fréquentielle de la réponse des électrons de valence du matériau diélectrique (silice) soumis à un champ optique excitateur. Cette réponse dynamique se traduit par une dépendance fréquentielle de l'indice de réfraction du matériau. Cette dépendance de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde induit une modification de la vitesse de groupe propre au milieu et doit être incluse dans les lois de propagation de la lumière dans le guide [9].

L'expression de la dispersion du matérielle s'exprime par la relation suivante :

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{cœur}}}{d\lambda^2} \quad (\text{II.4})$$

D'où :

$\lambda$  : Longueur d'onde.

$c$  : vitesse de la lumière.

### II.2.2. La dispersion de guide d'onde $D_g$

La dispersion du guide d'onde est particulièrement importante pour les fibres monomodes ; Le fait que les ondes se propagent dans un guide et non dans un milieu illimité entraîne une dépendance de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde. Cette influence du guidage correspond à une nouvelle contribution à l'évolution spectrale des temps de groupe [21]. La dispersion de guide d'onde liée à la structure géométrique du guide d'onde, elle résulte de la variation de la constante de propagation  $\beta$  avec la fréquence normalisée  $V$  (qui dépend-elle même de la longueur d'onde  $\lambda$ ) ; la dispersion du guide est toujours négative et dépend des paramètres de la fibre [18].

Le paramètre de dispersion du guide est défini par la relation :

$$D_g = -\frac{n_1 \Delta}{c\lambda} \left[ V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \right] \quad [\text{Ps.nm}^{-1}.\text{Km}^{-1}] \quad (\text{II.5})$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (II.6)$$

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

$\Delta$  : est la différence d'indice.

Et :

$$V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \approx 0.08 + 0.5439(2.834 - V^2) \quad (II.7)$$

$V$  : La fréquence spatiale normalisée

En combinant les équations ( $D_m$ ) et ( $D_g$ ). La dispersion chromatique s'écrit sous la forme suivante :

$$D_c = -\frac{\Delta n_1}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \quad (II.8)$$

### II.3. Dispersion de mode de polarisation (PMD)

La dispersion de polarisation ou PMD (Polarisation Mode Dispersion) est un autre type de dispersion. La vitesse de transfert de données (bande passante) dans la fibre optique diminue par la dispersion de polarisation ; l'origine de la PMD vient du fait que le mode fondamental d'une fibre optique monomode (LP01) est une combinaison de deux modes électromagnétiques dégénérés ( $LP_{01}^x$  et  $LP_{01}^y$ ) identifiés par deux directions de polarisation orthogonales qui ne se propagent pas à la même vitesse de groupe dans la fibre si celle-ci présente une biréfringence résiduelle de forme ou de contrainte. Cette variation de vitesse provoque un déphasage entre les deux composantes du mode fondamental et par conséquent, introduit un phénomène de dispersion ; la dispersion de polarisation [5].

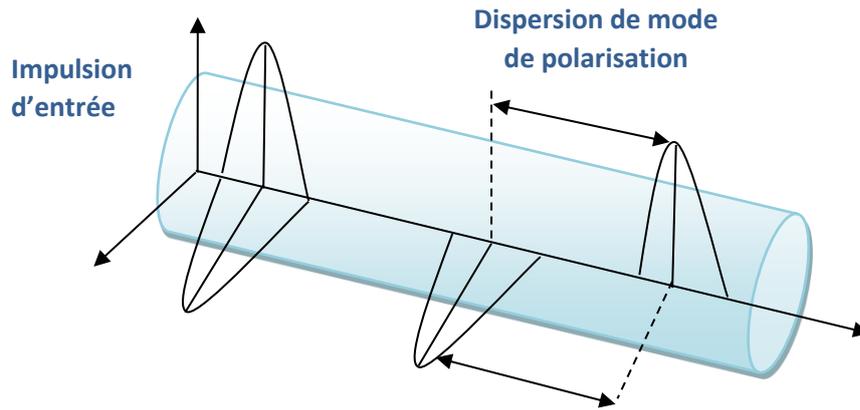


Figure. II.4. Dispersion de mode de polarisation (PMD).

Considérons le cas idéal de symétrie parfaite, la biréfringence de phase ou modale est donnée par :

$$B = |n_x - n_y| \quad (II.9)$$

$n_x$  et  $n_y$  sont les indices de réfraction du cœur de la fibre respectivement suivant l'axe lent, et l'axe rapide.

La longueur de battement  $L_B$  est la longueur de propagation dans laquelle les états de polarisation sont identiques dont la différence de phase entre les deux polarisations orthogonales soit de  $2\pi$ .

$$L_B = \frac{\lambda}{B} \quad (II.10)$$

En outre, plus la biréfringence est élevée, plus que la longueur de battement est petite. Ce type de dispersion est moins facile à maîtriser car il varie d'une façon aléatoire avec le temps. Une façon d'éliminer la PMD est l'exploitation des fibres à maintien de polarisation à cœur elliptique ; à biréfringence de contrainte (Bow-tie et Panda). Ces fibres présentent la particularité d'avoir deux axes orthogonaux de propagation qui ne sont pas uniformes, l'un étant plus rapide que l'autre. Ainsi, la lumière linéairement polarisée suivant chacun des deux axes, se propage à une vitesse différente sur chacun d'eux, conduisant alors à une biréfringence linéaire [23].

### III. Techniques de compensation de dispersion

De nombreuses techniques peuvent être utilisées pour compenser la dispersion. Chacun d'eux a ses propres avantages et inconvénients. Les techniques les plus couramment mises en œuvre en situation pratique sont discuté en détail.

#### III.1. Technique compensation de dispersion par des fibres compensatrice (DCF)

Les fibres à compensation de dispersion sont des fibres à dispersion négatives qui sont insérées dans la liaison optique pour compenser la dispersion accumulée. Un module de compensation de dispersion est donc compensé par une fibre de longueur prédéterminée et de dispersion égale et de signe opposé à celle de la fibre de transmission.

Donc il est nécessaire de compenser la dispersion accumulée dans les fibres tout le long de la ligne de transmission par des fibres spécifiquement allouées à cela, comme la fibre dite « à compensation de dispersion », ou DCF.

En outre plutôt que de compenser en une seule fois la dispersion accumulée dans tout le système au niveau du récepteur, il est nécessaire de répartir la compensation de la dispersion tout le long du système afin de minimiser les interactions entre la dispersion et les effets non-linéaires le long de la ligne. C'est le principe de la gestion de la dispersion. Pour cela, il suffit de choisir une fibre dont  $D_{DCF}$  et  $L_{DCF}$  compensent  $D_{SMF}$  et  $L_{SMF}$  du tronçon de fibre de la ligne de transmission telle que [21].

$$D_{SMF} \cdot L_{SMF} = -D_{DCF} \cdot L_{DCF} \quad (II. 11)$$

Où  $D_{SMF}$ ;  $D_{DCF}$ ;  $L_{SMF}$ ;  $L_{DCF}$  sont respectivement les paramètres de dispersion et les longueurs de fibre monomode et la fibre compensatrice de la dispersion.

Dans la technique des fibres à compensation de dispersion, nous utilisons une fibre ayant une dispersion négative élevée ainsi qu'une fibre standard. La quantité de lumière dispersée par une fibre normale est réduite ou même annulée en utilisant une fibre à compensation de dispersion ayant une très grande valeur de dispersion de signe opposé par rapport à celle d'une fibre standard.

Trois sortes de compensation de dispersion sont possibles en fonction de la position DCF, la pré-DCF la post-DCF et la symétrique (pré post-DCF).

- **Pré-compensation** : dans ce type de technique de compensation, la fibre de compensation de dispersion à dispersion négative est placée avant la fibre monomode standard (SMF) à dispersion positive.

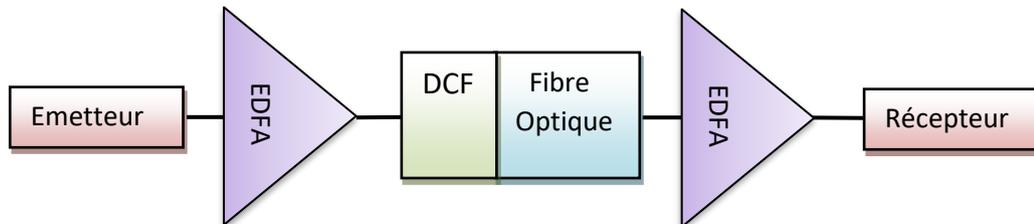


Figure. II.5. Pré-compensation DCF.

- **Poste-compensation** : C'est l'inverse dans ce type de technique de compensation, la fibre de compensation de dispersion à dispersion négative est placée après la fibre monomode standard (SMF) à dispersion positive.

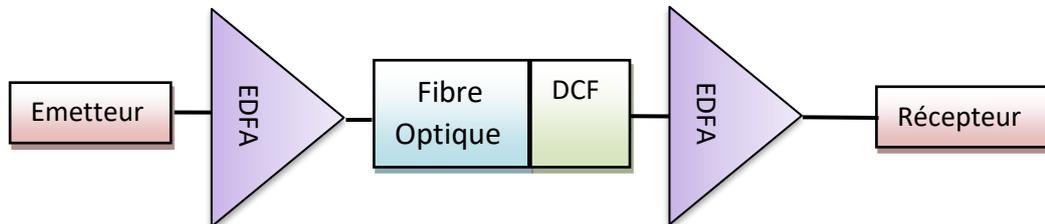


Figure. II.6. Post-compensation DCF.

- **Pré Post-Compensation** : Dans cette technique de compensation, la fibre de dispersion compensant la dispersion négative est placée avant ainsi qu'après la fibre monomode standard (SMF) pour compenser la dispersion positive de la fibre standard.

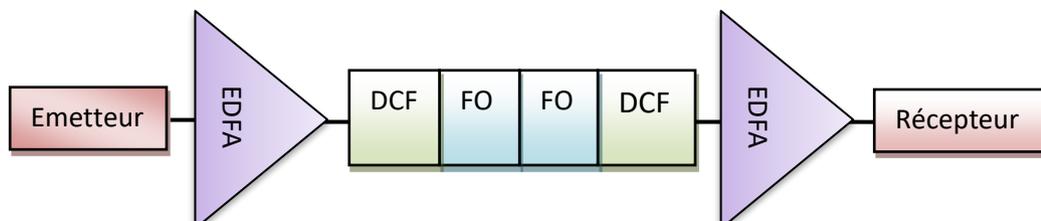


Figure. II.7. Pré poste-compensation DCF.

### III.1.1. Avantages de DCF

- L'avantage majeur de cette technique est son caractère large bande, d'autant plus qu'il est possible, de concevoir une DCF compensant également la pente de dispersion
- Ils peuvent être facilement intégrés avec une bonne fiabilité.
- Le DCF fournit une compensation continue sur une large gamme de longueurs d'onde.
- Le module DCF devrait avoir une faible perte d'insertion, une faible dispersion en mode de polarisation et une faible non-linéarité optique.
- En plus de ces caractéristiques, la fibre DCF devrait avoir un coefficient de dispersion chromatique élevé pour minimiser la taille d'un module DCF.

### III.2. Technique des fibres a réseau de Bragg

#### III.2.1. Les réseaux de Bragg [26]

Pour photo-inscrire un réseau de Bragg dans une fibre optique, on doit utiliser un verre photosensible. La photosensibilité est un phénomène découvert en 1978 par K. Hill, il résulte de l'exposition de la fibre optique aux rayonnements ultraviolets d'un laser, ce qui induit une modification de l'indice de réfraction au cœur de la fibre.

En 1989, G. Meltz et Al ont décrit pour la première fois une méthode de photo-inscription qui allait ouvrir la voie au développement des réseaux de Bragg pour des applications en télécommunications. Cette technique consiste à appliquer un champ de franges ultraviolet transversal à l'axe de propagation de la fibre. On apporte donc, une modification permanente périodique (ou aperiodique) de l'indice de réfraction dans le cœur de la fibre. Le réglage de l'interfrange permet de fixer la période du réseau afin d'ajuster la longueur d'onde de Bragg.

Une autre avancée significative a été effectuée lorsque P. J. Lemaire *et al* qui ont proposé de faire diffuser de l'hydrogène sous haute pression dans le cœur de la fibre. Ce procédé permet d'améliorer jusqu'à deux ordres de grandeur la photosensibilité des fibres optiques de télécommunications. La photosensibilisation permet d'une part d'inscrire des réseaux de Bragg dans des fibres peu photosensibles telles que la fibre monomode standard SMF 28 de CORNING, largement employée dans les réseaux de télécommunication, et d'autre part d'accélérer la cinétique de photo-inscription afin de diminuer les temps de fabrication.

Depuis qu'ils ont été lancés sur le marché en 1995, les réseaux de Bragg fibrés et leur utilisation dans des produits commerciaux ont connu une croissance remarquable, en particulier dans le domaine des télécommunications et des capteurs à fibres optiques (CFO).

Un réseau de Bragg (Fiber Bragg Grating : FBG) résulte d'une perturbation périodique (ou aperiodique) de l'indice effectif de réfraction le long d'un guide d'onde, voire dans le cœur d'une fibre optique en silice, d'une fibre optique dopée avec une terre rare (Erbium, Ytterbium, ...), ou d'un semi-conducteur. Cette variation d'indice va agir sur la lumière parcourant le réseau.

Il existe deux techniques différentes pour fabriquer les réseaux de Bragg :

**La méthode interférométrique** : Le faisceau laser est séparé en deux faisceaux qui interfèrent au niveau de la fibre afin de générer une variation périodique et permanente de l'indice de réfraction. Les franges d'interférences sont très sensibles à l'alignement optique et aux vibrations. Cette méthode est extrêmement flexible pour photo-inscrire différentes structures de réseaux de Bragg.

**La méthode du masque de phase** : Le faisceau laser passe à travers un réseau de diffraction, les ondes diffractées interfèrent pour générer le profil en intensité souhaité sur la fibre. C'est une méthode stable, facile à mettre en œuvre et largement utilisée pour la production de masse.

### III.2.2. Les fibres à réseaux de Bragg

Une fibre à réseau de Bragg est une microstructure de quelques millimètres, qui peut être inscrite dans le cœur d'une fibre de type télécommunication standard monomode SMF-28. La réflexion de la lumière se fait en illuminant transversalement la fibre à l'aide d'un faisceau laser UV et l'inscription produit une figure d'interférence dans le cœur, ce qui induira un changement permanent des caractéristiques physiques de la matrice de silice. Ce changement consiste en une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur qui crée une structure résonnante [25]

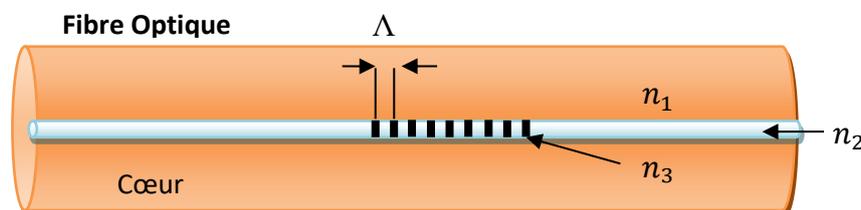


Figure. II.8. Structure de fibre de Bragg.

### III.2.3. Principe de fonctionnement des fibres à réseau de Bragg

La fibre à réseau de Bragg agira comme un filtre sélectif de longueur d'onde à bande étroite. Cela signifie que si la lumière d'une source à bande large parcourt la fibre optique, seule la lumière sur une largeur spectrale très étroite, centrée sur la longueur d'onde du réseau de Bragg sera réfléchi. La lumière restante poursuivra son chemin le long de la fibre jusqu'au prochain réseau de Bragg sans avoir perdu de ses propriétés. La longueur d'onde du réseau de Bragg est essentiellement définie par la période de la microstructure et de l'indice de réfraction du cœur. Le réseau de Bragg est une structure symétrique, ainsi il reflétera toujours la lumière selon la longueur d'onde peu importe d'où provient la lumière [25].

Le pas du réseau est fixé par les paramètres géométriques des dispositifs de photo-inscription et les variations de l'indice par l'amplitude du signal UV sur la fibre. En fonction du pas du réseau et de l'indice effectif de la fibre  $n_{eff}$ , la longueur d'onde de Bragg du réseau s'écrit [26]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (\text{II.12})$$

Où  $n_{eff}$  est l'indice de réfraction effectif et  $\Lambda$  est la période de réseau. Ceci est la condition de résonance de Bragg. A partir de l'équation (II.12), on remarque que la longueur d'onde de Bragg dépend de l'indice de réfraction et de la période de réseau.

Une petite quantité de lumière incidente est réfléchi à chaque changement périodique de l'indice de réfraction. La totalité des ondes lumineuses réfléchies sont combinées dans une à une longueur d'onde particulière. La longueur d'onde à laquelle la réflexion a lieu est appelée 'la longueur d'onde de Bragg'. Seules les longueurs d'onde autour de la longueur d'onde de Bragg sont fortement réfléchies ou transmises. La réflectivité de la lumière incidente atteint un pic à la longueur de Bragg. Pour les autres, la structure est pratiquement transparente. Le réseau de Bragg dans la fibre est donc un réflecteur ou un transmetteur sélectif en longueur d'onde. Toute modification du pas du réseau ou de l'indice effectif de la fibre entraîne un décalage du spectre réfléchi et transmis [26].

Parmi les propriétés de ce réseau ; c'est qu'il permet de comprimer une impulsion déformée, comme il est montré sur la figure (II.9).

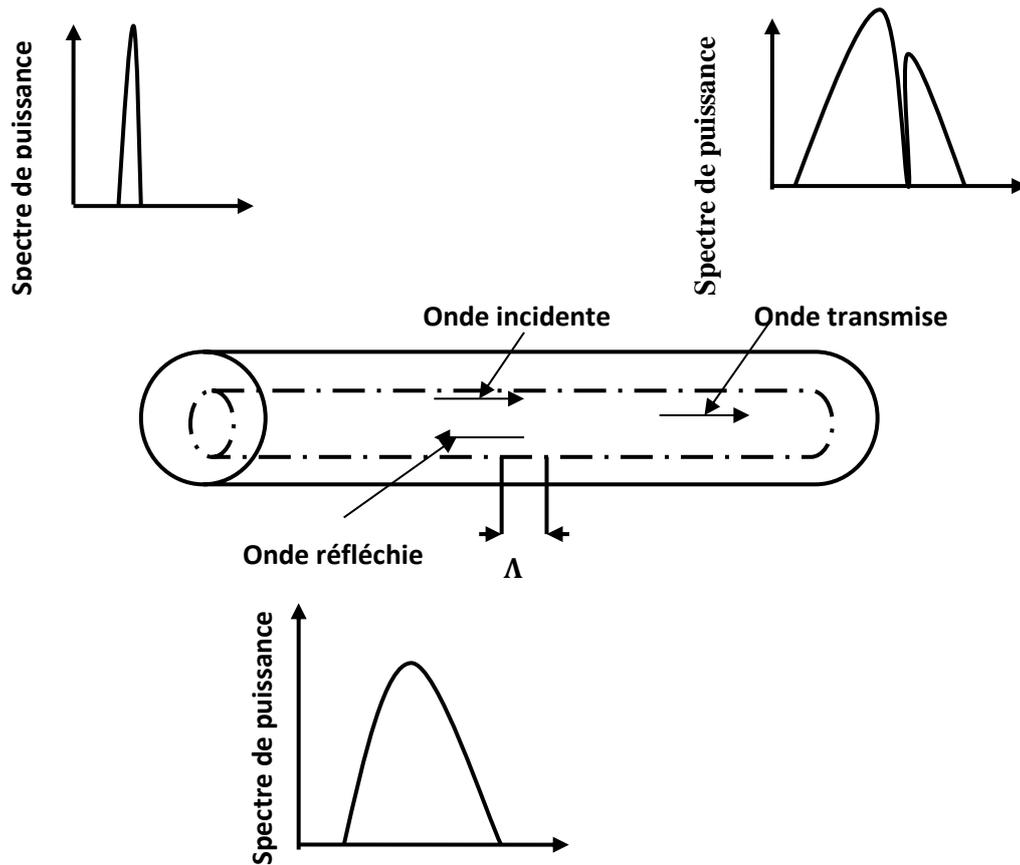


Figure. II.9. Schéma illustrant les propriétés d'un réseau de Bragg.

Pour un réseau de Bragg uniforme, l'indice de réfraction effectif  $n_{eff}$  et la période de Bragg  $\Lambda$  sont constants.

Ce type de fibre présente beaucoup d'applications dans l'émission laser, les systèmes de communication et la détection. Par exemple, les fibres de Bragg peuvent être utilisées comme un multiplexeur et un démultiplexeur dans les systèmes à multiplexage en longueurs d'onde (WDM). Ils peuvent aussi être utilisés comme compensateurs de la dispersion dans les systèmes des communications.

Trois techniques de compensation de dispersion sont également utilisées pour compenser la dispersion, en fonction de la position de FBG.

- **Pré-compensation FBG** : le FBG est placé avant la fibre optique.

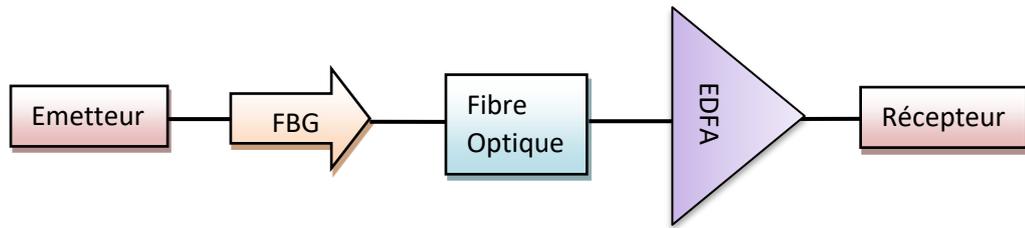


Figure. II.10. Pré-compensation FBG.

- **Post-compensation FBG** : le FBG est placé à la fin de l'étendue de la fibre.

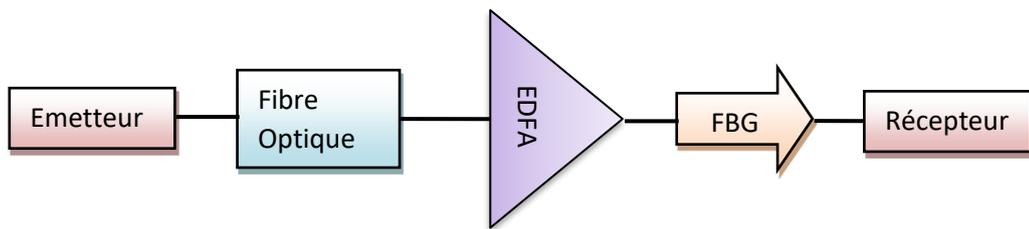


Figure. II.11. Poste-compensation FBG.

- **Pré Post-compensation FBG** : le FBG est placé avant la fibre et après le dernier amplificateur.

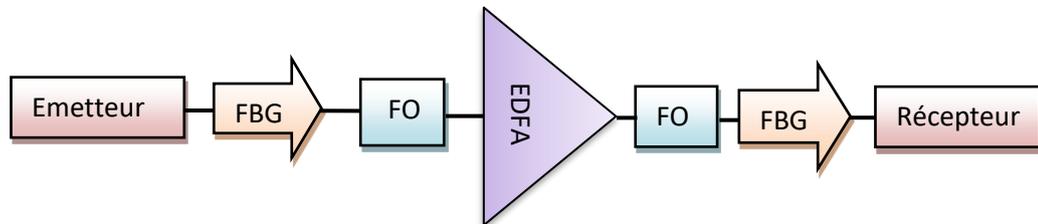


Figure. II.12. Pré poste-compensation FBG.

### III.2.4. Avantages de la fibre à réseau de Bragg

La fibre à réseau de Bragg présente comme avantages :

Une relative simplicité de fabrication de la structure, de petite taille, peu coûteux, en présentant une bonne immunité aux rayonnements EM, des pertes d'insertion réduites, une large sélectivité spectrale, et une adaptation complète avec les différentes fibres monomodes de communications [27].

### IV. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté du phénomène de dispersion ainsi que sa compensation qui représente un inconvénient majeur dans les systèmes de télécommunications optiques. La dispersion chromatique produit un élargissement temporel des impulsions au cours de leur propagation dans la fibre optique provoquant ainsi leur chevauchement à la sortie de la fibre optique, et par conséquent une distorsion du signal portant l'information.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à l'utilisation des filtres compensatrices et des fibres à réseau de Bragg dans la compensation de la dispersion.

# Chapitre III :

## Résultats

### I. Introduction

Le problème majeur de la transmission à longue distance est la dispersion qui doit être réduite sinon elle dégrade les performances du système. Après une certaine distance de propagation, l'élargissement des impulsions provoque un nombre important d'erreurs à la fin de réception et par conséquent l'information peut être dégradée. Parmi les alternatives, les fibres compensatrices de dispersion (DCF) et les fibres à réseaux de Bragg (FBG) constituent une bonne alternative afin de compenser la dispersion accumulée dans la fibre.

Le présent chapitre a pour objectif d'étudier les techniques de compensation de dispersion chromatique dans une liaison de transmission numérique par fibre optique à un débit variant de 10Gb/s à 60 Gb/s. Ce travail, a été effectué à l'aide du logiciel de simulation « Optisystem 7.0 », qui est un outil performant permettant de réaliser et simuler des chaînes de transmissions optiques.

Nous allons tout d'abord commencer par une chaîne de transmission basique sans compensation. Ensuite nous ajouterons au fur et à mesure des blocs supplémentaires pour améliorer la qualité de la transmission. Dans un premier temps nous allons utiliser la technique DCF avec la fibre monomode standard (SMF), ensuite nous utiliserons la méthode de compensation avec FBG. On abordera ensuite la compensation de dispersion chromatique dans les liaisons optiques hauts débits.

### II. Chaîne de transmission de base

La figure (III.1) ci-dessous représente une chaîne de transmission optique simple sans compensation de dispersion. Ce schéma décrit les composants utilisés pour l'analyse de l'effet de la dispersion. La performance de la liaison optique est estimée via deux critères, le facteur de qualité Q et le taux d'erreur binaire BER. Sachant que, pour maintenir une bonne qualité de transmission dans le domaine des télécommunications on doit avoir un facteur Q supérieur à 6 ce qui correspond à un taux d'erreurs binaire BER inférieur à  $10^{-9}$ .

Cette chaîne de base est composée essentiellement de trois sections : un émetteur, fibre optique et un récepteur.

Un Laser modulé avec un générateur NRZ et un modulateur Mach Zehnder joue le rôle d'émetteur. Un photodétecteur de type PIN est utilisé comme récepteur pour effectuer l'opération inverse de l'émetteur optique. Il est connecté à un filtre électrique passe-bas avec

une fréquence de coupure 0.75 fois la fréquence de rythme. Pour illustrer les résultats nous utiliserons un analyseur de BER.

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont donnés dans le tableau III.1 ci-dessous.

Paramètres	Valeurs	Unité
Débit	10 to 60	Gbps
Longueur de SMF	100	Km
Puissance	10	dBm
Fréquence	193.1	THz

Tableau.III.1. Paramètres de simulation.

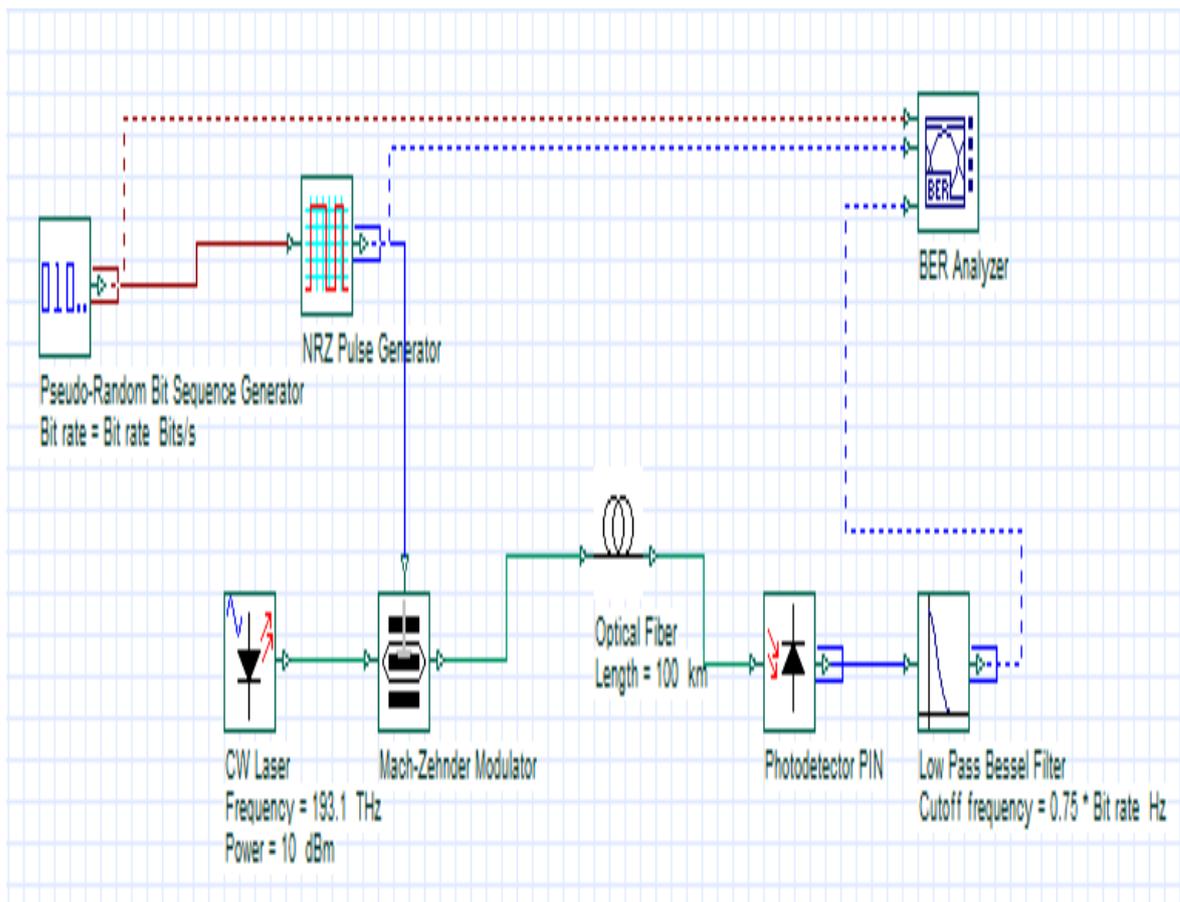


Figure. III.1. Chaîne de transmission de base.

Les diagrammes de l'œil correspondant à différents débits (10, 20, 40,60 Gbps) pour une distance de 100 Km sont représentés sur les figures suivantes :

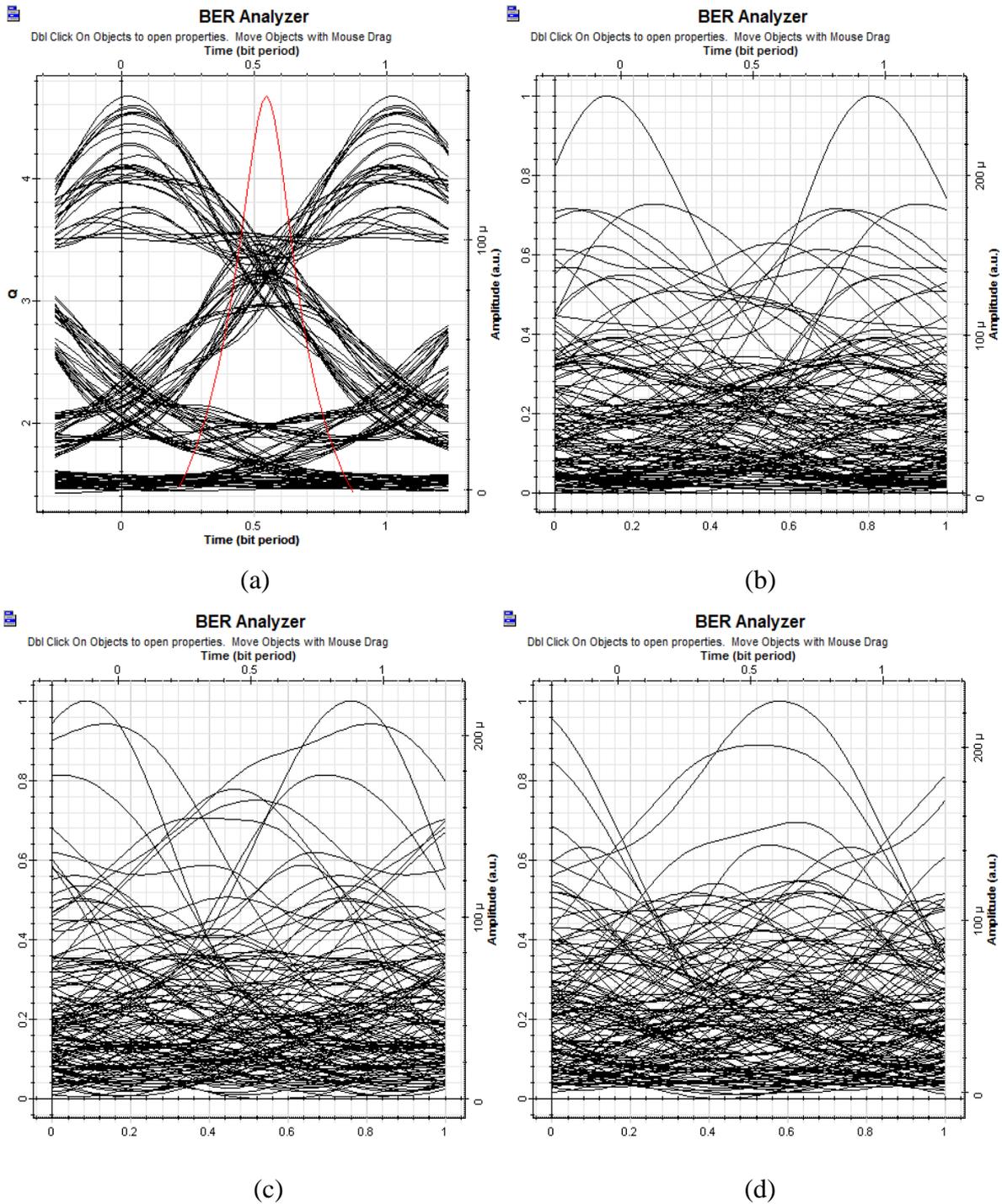


Figure.III.2. Les diagrammes de l'œil (a) pour 10Gbps, (b) pour 20Gbps, (c) pour 40Gbps et (d) pour 60Gbps.

On peut remarquer sur ces diagrammes une hauteur de l'œil et un facteur Q très petits ayant pour origine une dispersion très élevée. On peut observer également que le débit a une

relation inversement proportionnelle avec la qualité de transmission : plus le débit est grand plus la qualité du signal reçu est faible.

### **III. Fibres compensatrices de dispersion chromatique (DCF)**

Dans cette section on va présenter les résultats obtenus en utilisant les fibres compensatrices de dispersion (DCF) et des amplificateurs optiques (fibres amplificatrices) afin de compenser les pertes dues à l'atténuation (un amplificateur avec un gain de 20dB après le SMF et un autre avec un gain de 12.8dB après le DCF). La fibre optique utilisée de type SMF a une longueur de 100 km avec une dispersion chromatique de 17 ps/nm/km. Par conséquent, la dispersion cumulée totale est de  $17 \times 100 = 1760$  ps/nm. Cette dispersion peut être compensée en utilisant une fibre compensatrice de dispersion chromatique de type DCF de longueur de 21.25 km et ayant une dispersion de -80 ps/km/nm.

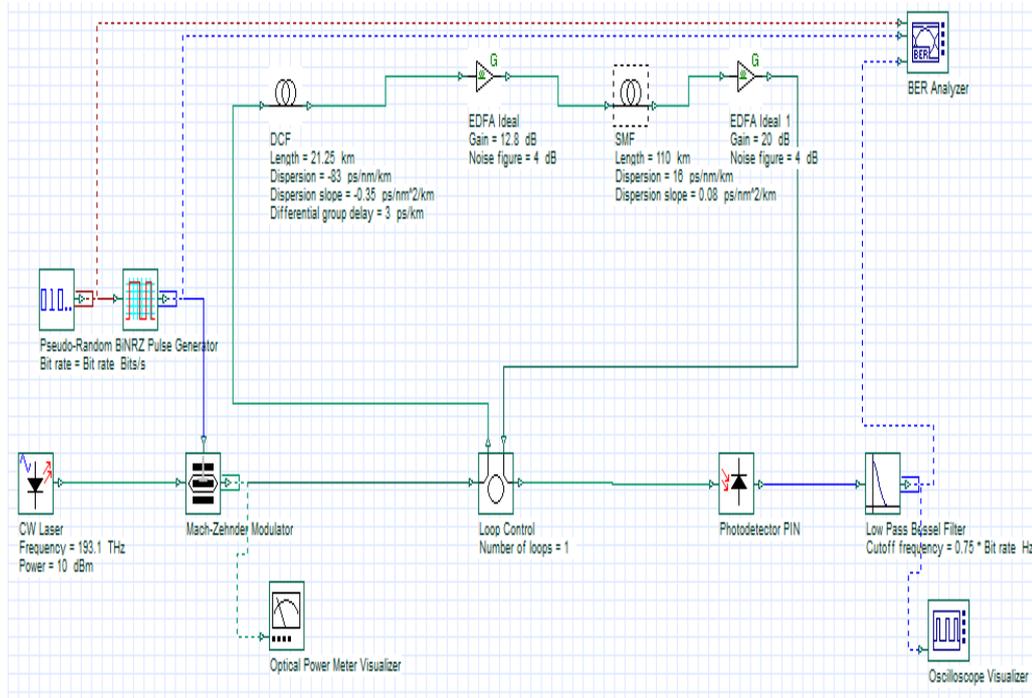
Le tableau ci-dessous rassemble les différents paramètres

<b>CW Laser</b>	
Fréquence	193.1 THz
Puissance	10 dBm
<b>SMF</b>	
Longueur d'onde utilisé	1550 nm
Pente de dispersion	0.08 ps/nm/Km
<b>DCF</b>	
Longueur d'onde de référence	1550 nm
Longueur	21.25 km
Pente de dispersion	-0.35 ps/nm <sup>2</sup> /km
<b>EDFA</b>	
Paramètre de bruit	4 dB
Bande passante du bruit	13 THz

**Tableau. III.2. Paramètres de simulation avec DCF.**

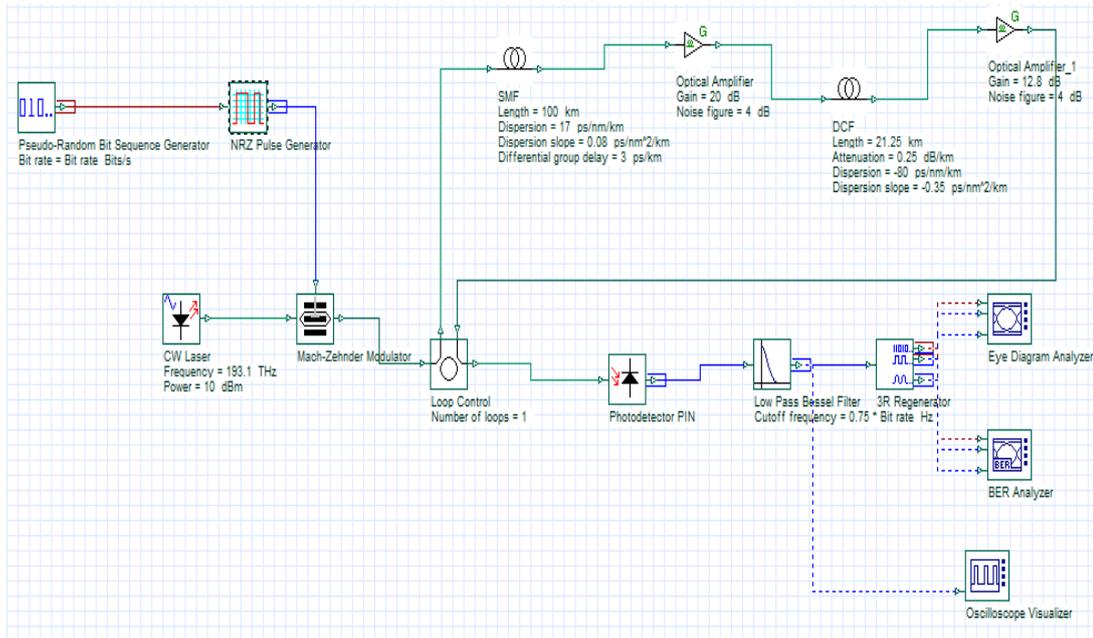
Trois techniques de compensation seront étudiées selon la position du DCF :

- a. Pré-DCF**, où la DCF est placée avant le SMF pour compenser la dispersion positive de la fibre standard. La figure (III.3) montre une chaîne de simulation du Pré-DCF.



**Figure.III.3. Chaîne de simulation du Pré-DCF.**

- b. Post-DCF** où la DCF de dispersion négative est placée après le SMF pour compenser la dispersion positive de la fibre standard comme le montre la figure (III.4).



**Figure.III.4. Chaîne de simulation du Post-DCF.**

c. **Pré-post DCF** où la DCF est placée avant et après le SMF pour compenser la dispersion positive de la fibre standard. La figure III.5 montre une chaîne de simulation du Pré-post DCF.

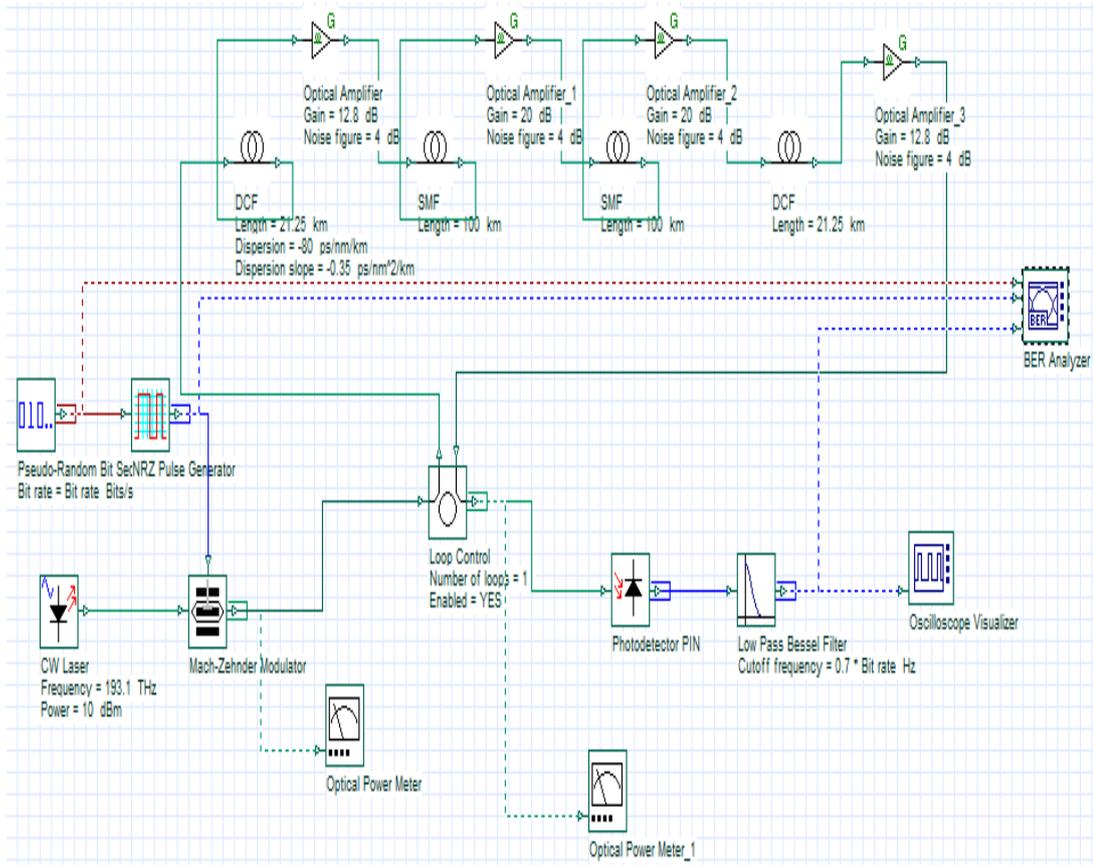
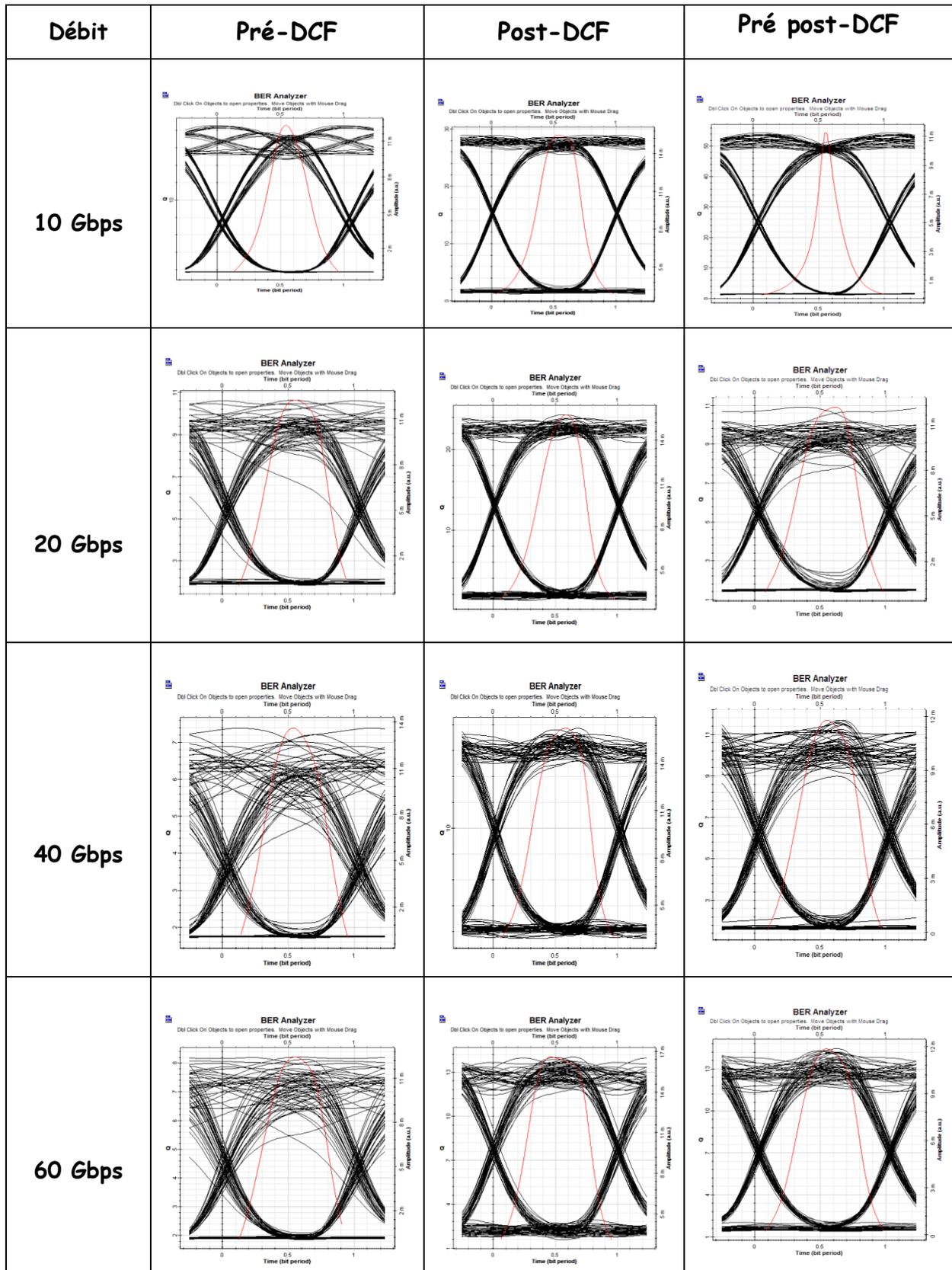


Figure.III.5. Chaîne de simulation du Pré-post DCF.

## Chapitre III : Résultats



**Tableau. III.3. Diagrammes de l'œil pour Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF avec les différents débits binaires.**

Débit	Facteur de qualité Q	BER	Hauteur de l'œil
10 Gbps	17.0908	5.27256e-066	0.00553784
20 Gbps	7.354334	7.23807 e-014	0.00396824
40 Gbps	6.21446	2.08151 e-010	0.0032922
60 Gbps	2.2386	0.01223776	-0.00146043

Tableau. III.4. Analyse de Pré-DCF.

Débit	Facteur de qualité Q	BER	Hauteur de l'œil
10 Gbps	28.9437	1.46433 e-184	0.0103607
20 Gbps	24.2884	1.20328 e-130	0.010048
40 Gbps	17.7296	1.12758 e-070	0.00961787
60 Gbps	14.0346	4.38284 e-045	0.00905976

Tableau. III.5. Analyse de Post-DCF.

Débit	Facteur de qualité Q	BER	Hauteur de l'œil
10 Gbps	54.3823	0	0.00949731
20 Gbps	10.9209	3.9945 e-028	0.00714474
40 Gbps	11.6764	6.98601 e-032	0.00734049
60 Gbps	14.4475	1.02682 e-047	0.00802616

Tableau.III.6. Analyse de Pré post-DCF.

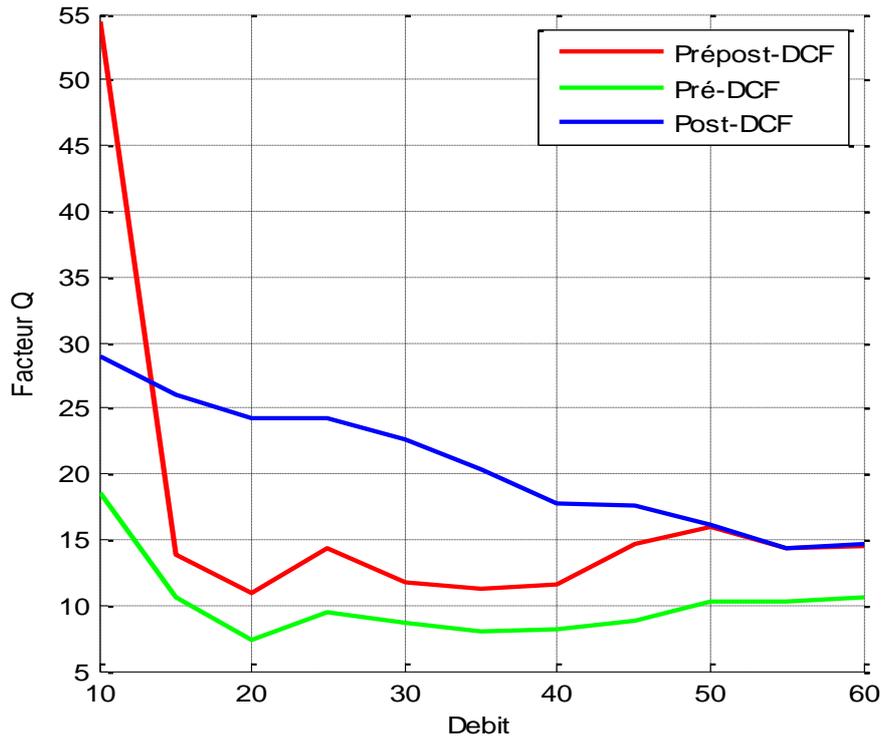


Figure.III.6. Facteur de qualité en fonction du débit pour Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF.

### Résultats et discussions :

Trois chaînes de transmission (Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF) pour des débits variant de 10 à 60Gbps ont été mises en œuvre, et analysées. Les diagrammes de l'œil correspondants sont présentés dans le tableau (III.3).

Les tableaux III.4, III.5 et III.6 présentent les facteurs de qualité Q, les valeurs de BER ainsi que les hauteurs de l'œil pour chaque technique. La figure.III.6 donne le facteur de qualité en fonction du débit pour les différentes techniques. Ces résultats peuvent s'interpréter de la manière suivante :

- Pour Pré-DCF, les hauteurs de l'œil sont basses et étroites et les lignes sont séparées les unes des autres. Le facteur de qualité Q est très faible ( $Q=18.5686$  à 10 Gbps), ce qui correspond à une dispersion élevée.
- Pour Post-DCF on remarque que les résultats sont meilleurs que le premier cas de Pré-DCF, les diagrammes de l'œil sont plus ouverts que dans Prés-DCF, les lignes convergent les unes aux autres. Le facteur de qualité est élevé mais avec un petit pourcentage de dispersion.
- Pour Pré post-DCF nous avons une bonne ouverture du diagramme de l'œil à 10Gbps avec un facteur de qualité de 54.3823 puis elle dégrade rapidement avec

l'augmentation du débit ( $Q=10.9209$  à 20Gbps). Après cette dégradation les diagrammes de l'œil restent ouverts mais pas autant que le Post-DCF.

Finalement on peut conclure que la dispersion chromatique et d'autres effets non-linéaires peuvent être atténués en utilisant la fibre compensatrice de dispersion (DCF). Les résultats obtenus montrent que le Post DCF est une bonne technique de compensation.

#### IV. Fibres à réseau de Bragg (FBG)

Dans cette partie nous allons présenter les résultats de simulation obtenus en utilisant les fibres à réseau de Bragg (Fiber Bragg Grating) comme techniques de compensation chromatique. Les paramètres de simulation utilisés sont présentés dans le tableau III.7.

CW Laser	
Fréquence	193.1 THz
Puissance	10 dBm
SMF	
Longueur d'onde utilisé	1550 nm
Longueur	150 km
EDFA	
Paramètre de bruit	2 dB
FBG	
Fréquence	193.1 THz
Longueur d'onde	1 THz

Tableau. III.7. Paramètres de simulation avec FBG.

Trois techniques de compensation de la dispersion sont également utilisées pour compenser la dispersion, en fonction de la position des fibres FBG.

**a. Pré-FBG**

Le FBG est placé à l'entrée de la liaison optique et avant l'amplificateur, comme cela indiqué sur la figure III.7. Si l'on considère une fibre SMF28 de 150 km, qui présente une dispersion positive de 17 Ps/nm/km ; on peut atteindre une dispersion négative de -2550 Ps/nm.

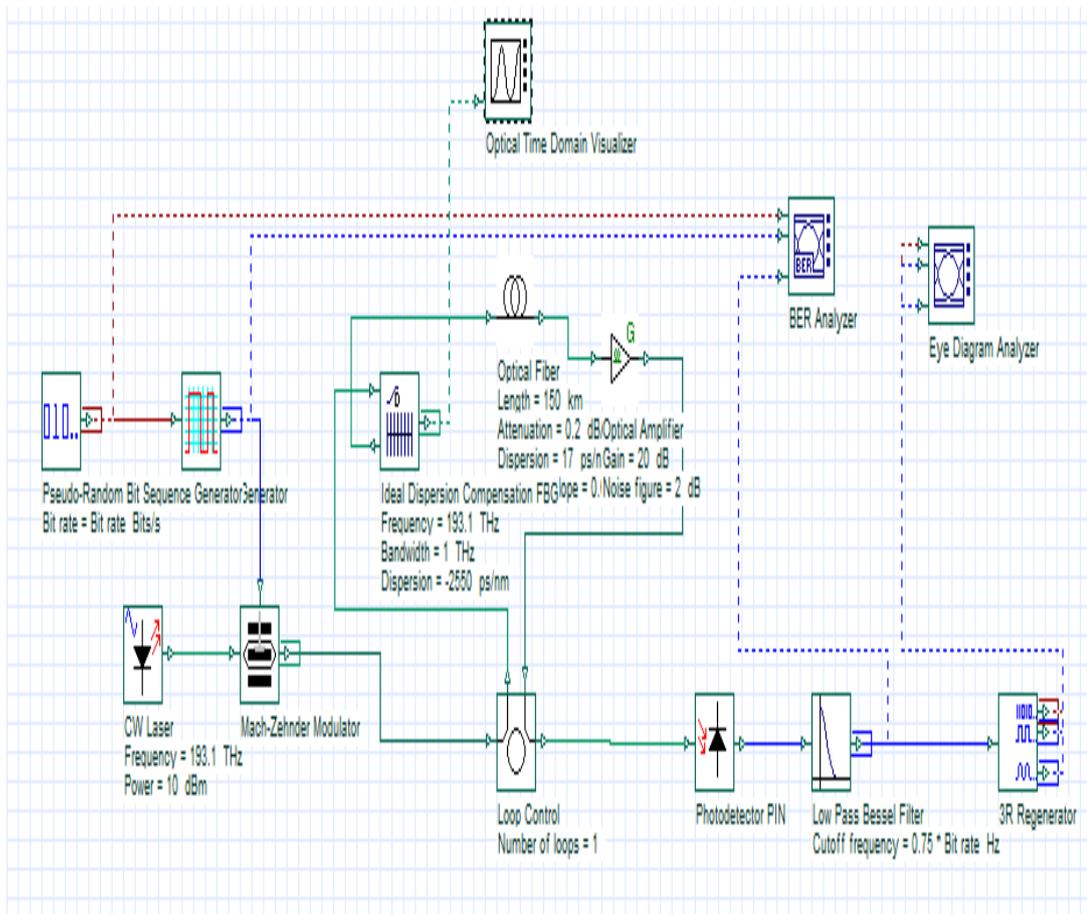


Figure.III.7. Synoptique de chaîne de transmission Pré-FBG.

**b. Post-FBG**

Le FBG est placé au dernier point de la liaison optique, comme indiqué sur la figure III.8.

Si on considère une fibre de transmission SMF28 de 150 km, qui présente une dispersion positive de 17 Ps/nm/km ; donc on peut atteindre une dispersion négative de -2550 Ps/nm/km.

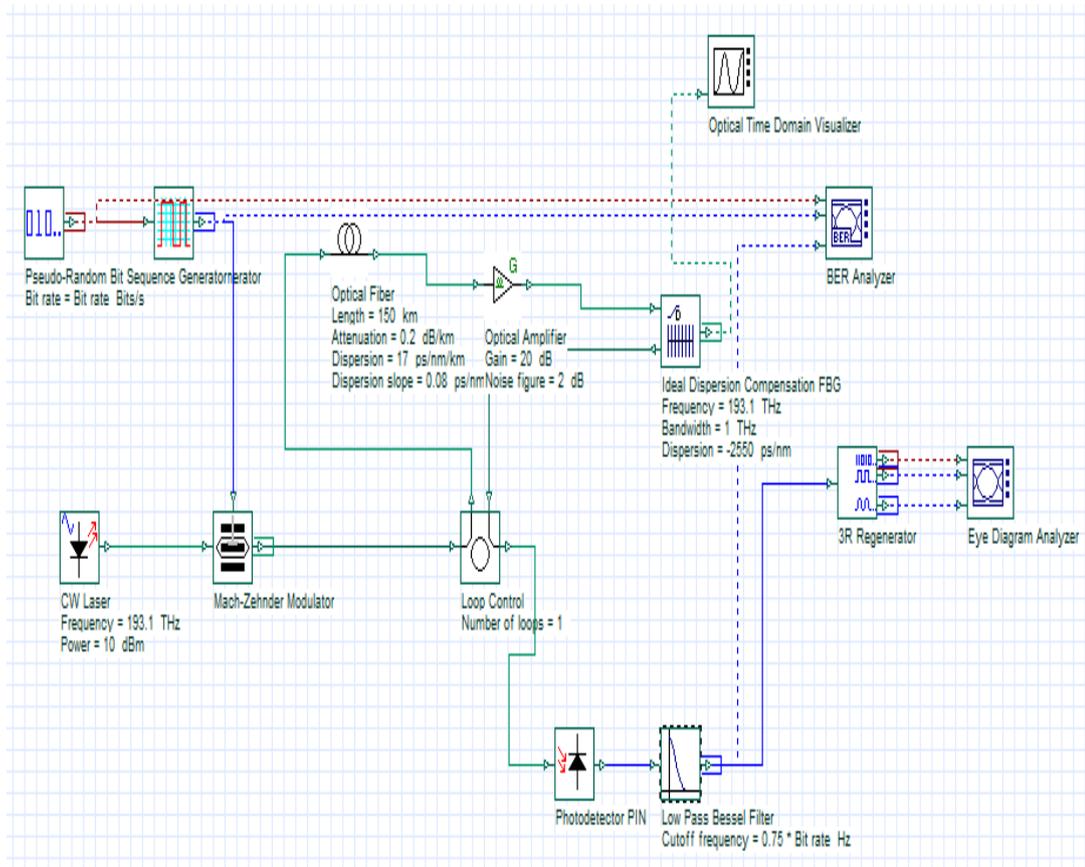


Figure.III.8. Chaîne de simulation Post FBG.

### c. Pré- Post FBG

Le premier FBG est placé à l'entrée de la liaison et le deuxième FBG est placé à la sortie de la liaison optique. La position de la fibre suit la séquence FBG, SMF, SMF, FBG comme indiqué à la figure III.9. La fibre de compensation de dispersion négative est placée avant le premier SMF et après le deuxième SMF pour compenser la dispersion positive de la fibre standard. Les paramètres utilisés pour les deux SMF de cette simulation sont : une longueur de 150 km et une dispersion de 17 ps/nm/km pour chacun. Par conséquent, la dispersion cumulée totale est de  $17 \times 150 = 2550 \text{ ps/nm}$ . Cette dispersion peut être compensée en utilisant deux FBG avec une dispersion de  $-2550 \text{ ps/nm/km}$ .

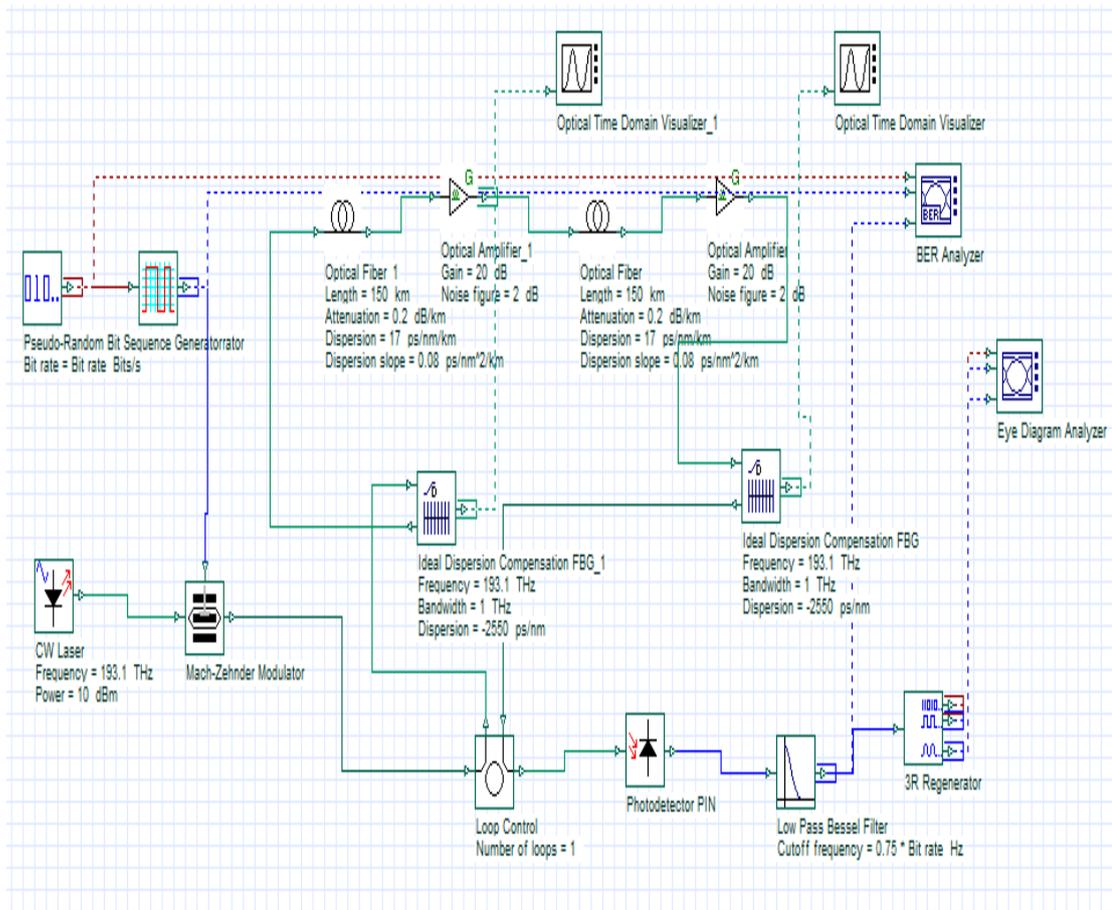


Figure.III.9. Chaîne de simulation Pré-post FBG.

### Résultats et discussions

Dans les trois configurations étudiées (pré-configuration, post-configuration et pré post configuration) la puissance d'entrée est de l'ordre de 10 dBm pour un débit variant entre 10 et 60 Gbps. Les caractéristiques des diagrammes de l'œil sont présentées dans le tableau III.8.

De plus, les valeurs de facteur de qualité Q, les hauteurs de l'œil et les valeurs de BER sont reportés dans un tableau. La pré-configuration est affichée dans le tableau III.9, tandis que les résultats de post-configuration sont présentés dans le tableau III.10 et les résultats de la configuration de mélange (pré-post) sont également présentés dans le tableau III.11.

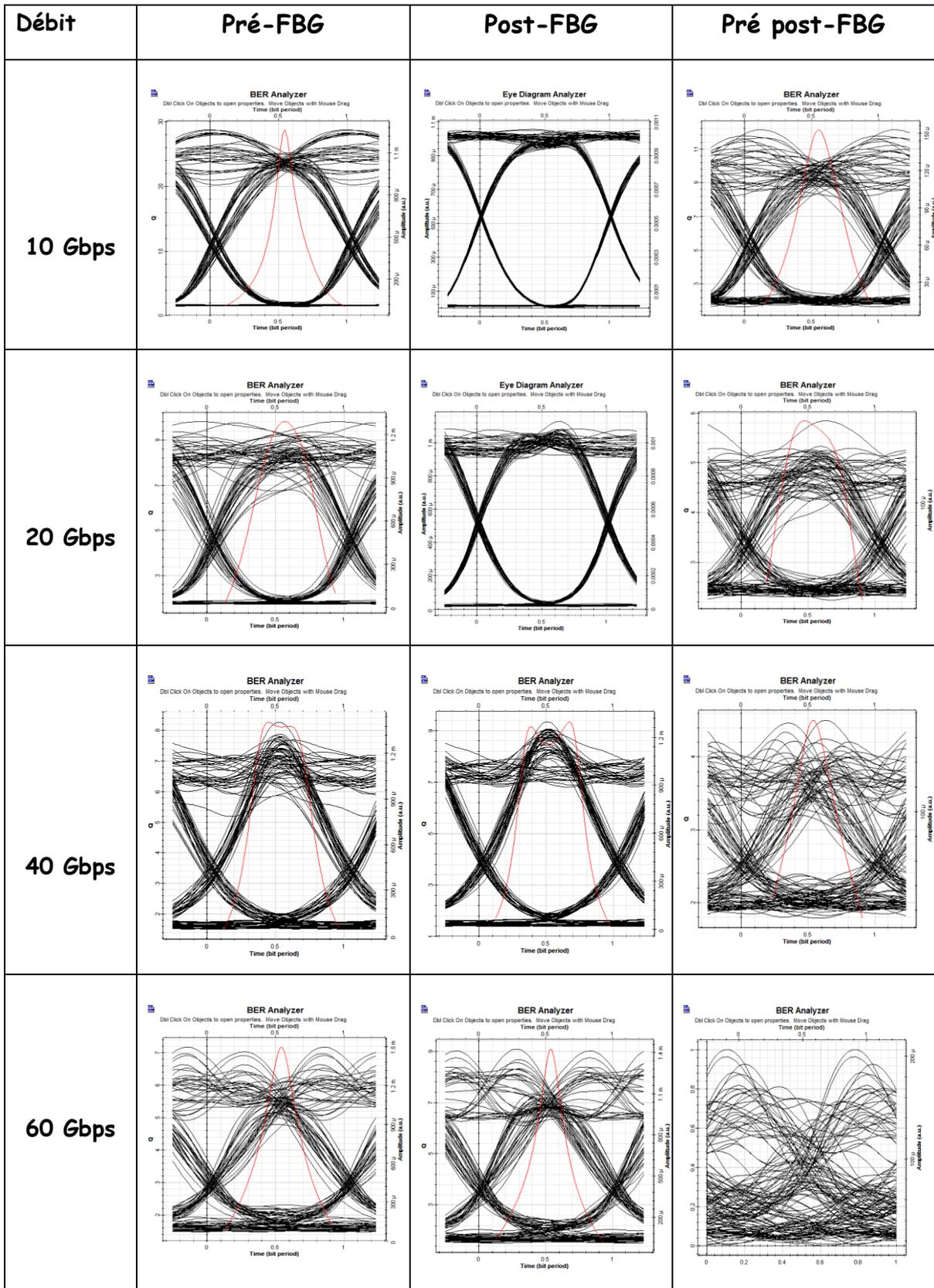


Tableau. III.8. Diagrammes de l'œil pour Pré-FBG, Post-FBG, Pré post-FBG avec des différents débits binaires.

Débit	Facteur de qualité	BER	Hauteur de l'œil
10 Gbps	34.3447	5.50443e-259	0.000891668
20 Gbps	27.7406	9.19671e-170	0.000871577
40 Gbps	9.33777	4.7194e-021	0.000688908
60 Gbps	9.07502	5.65207e-020	0.000624805

Tableau. III.9. Résultats de la simulation de compensation Post-FBG.

Débit	Facteur de qualité	BER	Hauteur de l'œil
10 Gbps	12.1236	3.34144e-034	7.62505e-005
20 Gbps	5.84152	2.17242e-009	4.93272e-005
40 Gbps	4.50226	3.12845e-006	3.17353e-005
60 Gbps	2.54891	0.00424186	-1.78379e-005

Tableau. III.10. Résultats de la simulation de compensation Pré post-FBG.

Débit	Facteur de qualité	BER	Hauteur de l'œil
10 Gbps	28.7391	4.88898e-182	0.00090.5641
20 Gbps	9.80527	3.81989e-023	0.000697956
40 Gbps	8.26149	6.24843e-017	0.000358583
60 Gbps	7.16896	3.69836e-013	0.000536515

Tableau. III.11. Résultats de la simulation de compensation Pré-FBG.

A partir de ces résultats, les composants de compensation pré, post et pré post amélioreront le facteur de qualité Q et le BER en compensant la dispersion.

Le compensateur FBG fonctionne bien pour réduire la dispersion dans la communication par fibre optique. Comme on peut l'observer d'après les résultats obtenus, le diagramme de l'œil pour la compensation post-FBG à 10 Gbps est plus ouvert ce qui représente le niveau de distorsion le plus faible qui dénote un facteur de qualité Q élevé.

Un taux d'erreur binaire (BER) très faible et une hauteur de l'œil élevé indiquant que le signal reçu est de meilleure qualité et sera lisible par rapport à la compensation pré-FBG et la compensation pré post-FBG où le diagramme de l'œil étroit et l'interférence entre les impulsions augmente, donc le facteur de qualité est faible et le taux d'erreur sur les bits est élevé.

Les résultats montrent que la qualité du signal reçu est d'autant plus faible que le débit est grand. Ceci se traduit par la diminution successive du facteur de qualité à la réception.

Parmi ces trois méthodes, la technique de compensation post-FBG donne de meilleurs résultats que les techniques de pré-FBG et pré post-FBG compensation (Figure.III.10)

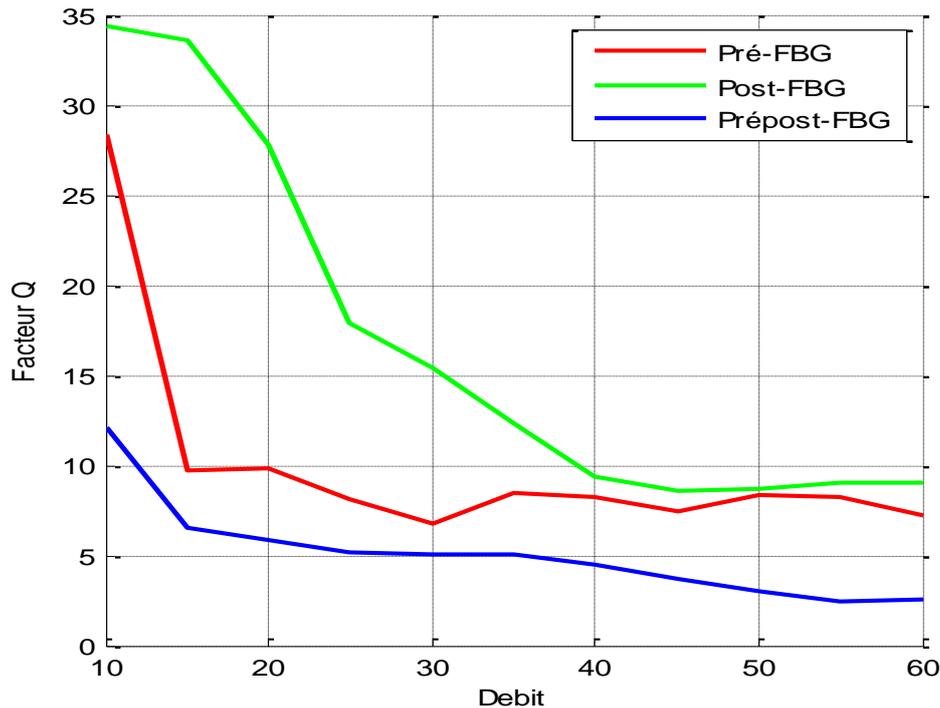


Figure.III.10. Facteur de qualité Q en fonction de débit pour Pré-FBG, Post-FBG, Pré post-FBG.

## V. Compensation de dispersion chromatique dans les liaisons optiques hauts débits

Auparavant, nous avons vu que la compensation de dispersion en utilisant des fibres à réseaux de Bragg donne de bons résultats sur un seul canal. Maintenant nous allons utiliser cette technique dans les systèmes WDM qui ont la capacité de transmettre simultanément des signaux multiples ayant des longueurs d'onde différentes.

Un système WDM utilise un multiplexeur à l'émetteur pour assembler les signaux et un démultiplexeur au récepteur pour les séparer.

Le modèle proposé dans notre travail est composé de seize émetteurs, dont chacun se compose d'un pseudo-générateur aléatoire (PRBS) suivi d'un générateur d'impulsions NRZ, d'un laser CW continu ayant une puissance de 10 dBm suivis d'un modulateur Mach Zender. Le canal de transmission est une fibre optique monomode standard (SMF) de 100 km avec une atténuation de 0.2 dB/km et une dispersion chromatique de 17ps/nm/km.

La section de réception se compose d'un réseau FBG pour compenser la dispersion, d'une photodiode PIN ayant une sensibilité de 1A/W. On utilise aussi un filtre de Bessel à une

fréquence particulière, puis un analyseur de BER pour l'analyse du facteur de qualité Q, du taux d'erreur binaire BER et les diagrammes de l'œil.

Chaque canal utilise un laser à différentes fréquences allant de 193,1 à 194,6 THz avec un espacement en fréquence de  $\Delta\nu = 100$  GHz.

Dans notre étude, on s'intéresse seulement quatre canaux (le premier, le quatrième le huitième, et le douzième canal) comme échantillons en variant le débit entre 10 et 60 Gbps.

Trois critères de qualité ont été utilisés : le facteur de qualité Q, le taux d'erreur binaire BER et la hauteur de l'œil.

### V.1. Simulation d'un système WDM sans fibres à réseaux de Bragg

Dans cette partie nous allons évaluer les performances d'un système WDM sans utiliser les fibres de Bragg. La figure ci-dessous montre le schéma en bloc d'un système WDM sans fibres à réseaux de Bragg.

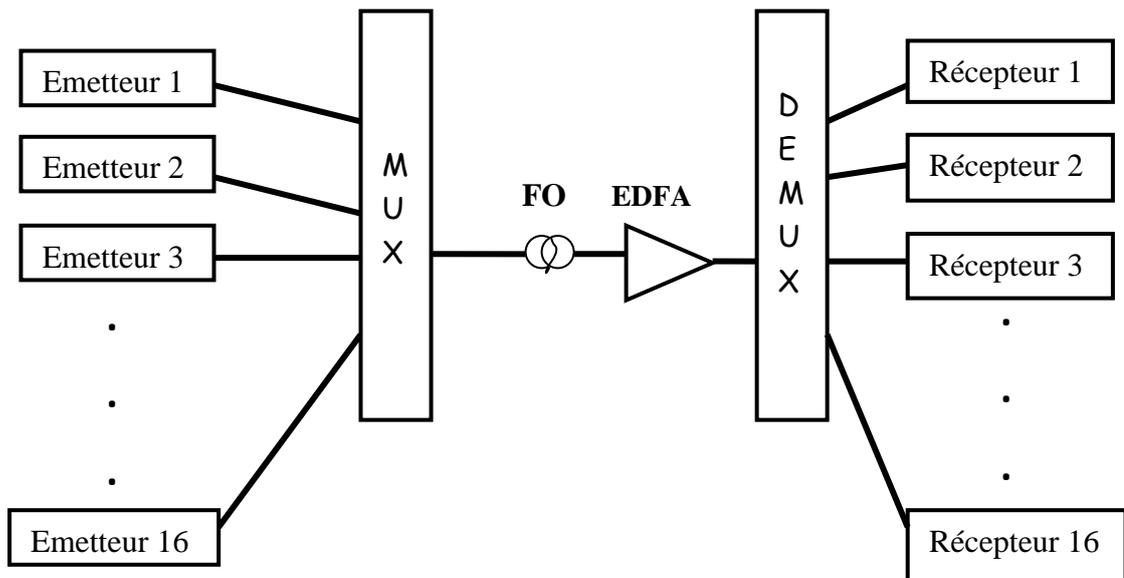


Figure. III.11. Système WDM à 16 canaux sans fibres à réseaux de Bragg.

Les figures ci-dessous représentent les diagrammes de l'œil pour les différents canaux avec des différents débits d'un système WDM sans fibres à réseaux de Bragg.

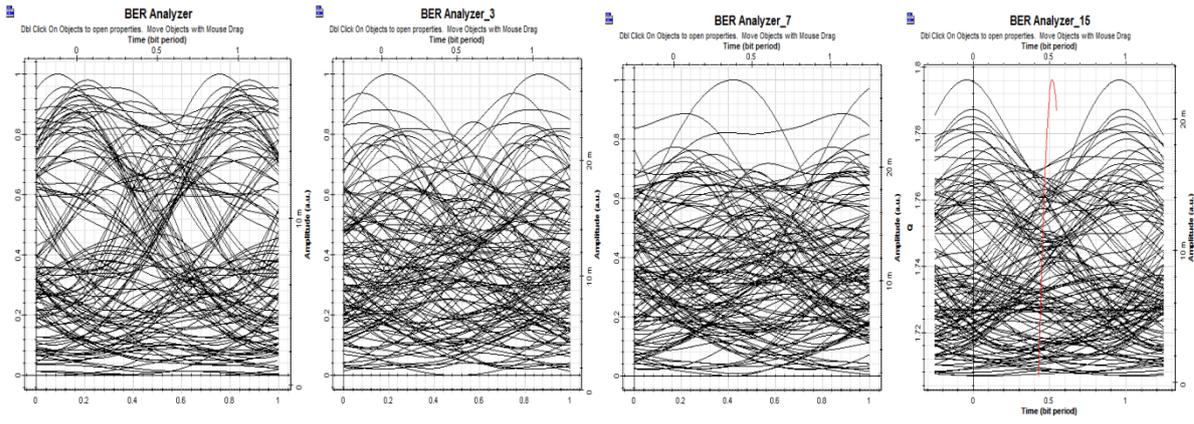


Figure. III.12. Diagrammes de l'œil a un débit de 10Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.

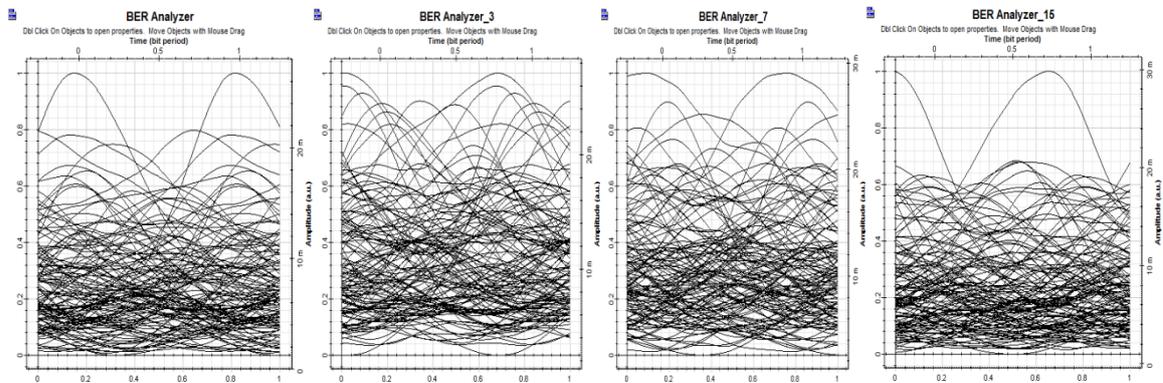


Figure. III.13. Diagrammes de l'œil a un débit de 20Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.

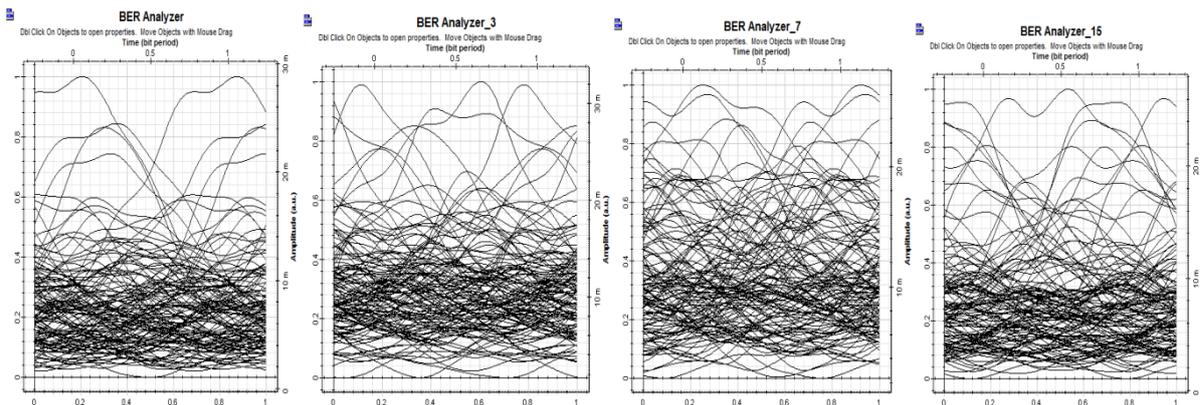


Figure. III.14. Diagrammes de l'œil a un débit de 40Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.

V.2. Simulation d'un système WDM avec les fibres à réseaux de Bragg

Dans cette partie on va ajouter une fibre à réseaux de Bragg après le démultiplexeur pour chaque canal afin d'améliorer les performances du système. La figure III.15 présente un Système WDM à 16 canaux.

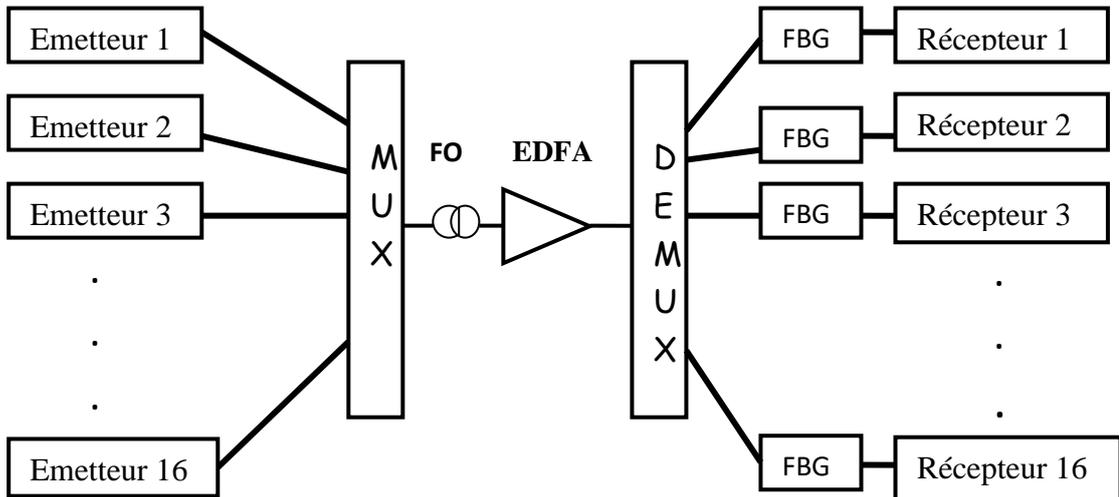


Figure.III.15 Système WDM à 16 canaux avec les fibres à réseaux de Bragg.

Les figures illustrées ci-dessous montrent les diagrammes de l'œil pour les différentes simulations. Aussi les tableaux III.12, III.13, III.14 et III.15 présentent les résultats de la simulation. Les tableaux montrent le facteur de qualité Q, le taux d'erreur binaire BER et la hauteur de l'œil pour les quatre différents canaux (canal 1, canal 4, canal 8 et canal 12) de notre système WDM à 16 canaux.

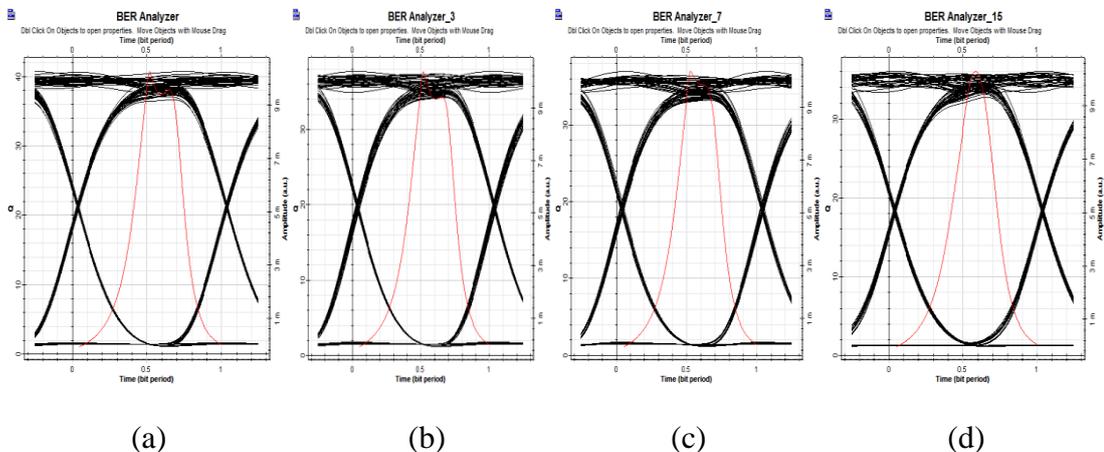
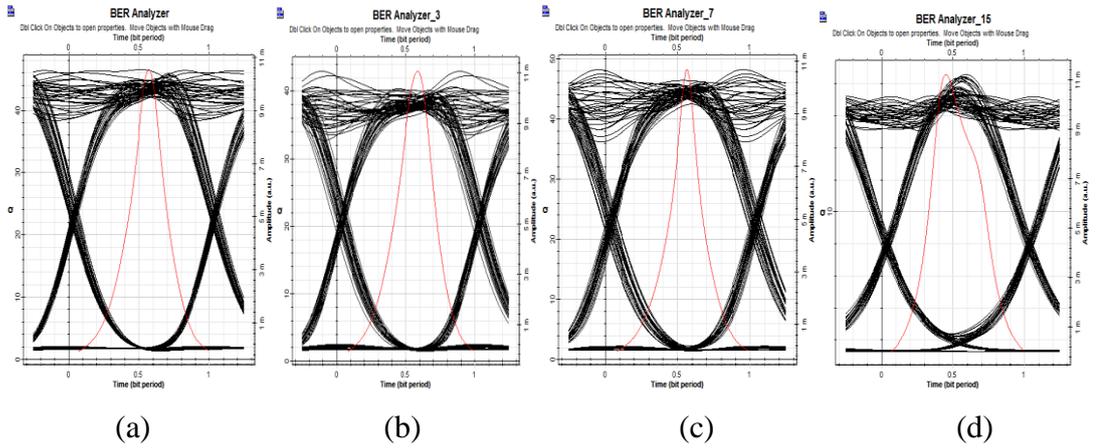
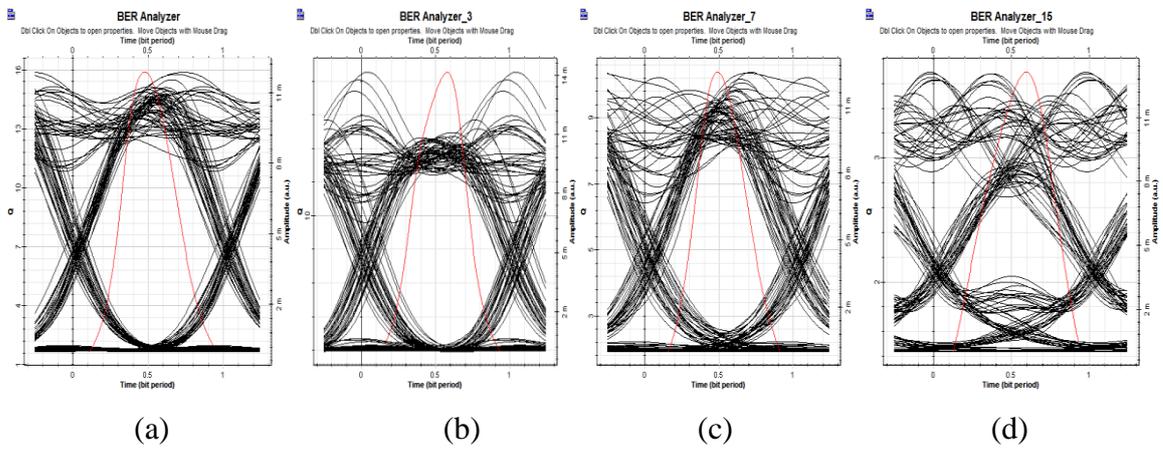


Figure. III.16. Diagrammes de l'œil a un débit de 10 Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.



**Figure.III.17. Diagrammes de l'œil a un débit de 20 Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.**



**Figure.III.18. Diagrammes de l'œil a un débit de 40 Gbps pour (a) canal 1, (b) canal 4, (c) canal 8, (d) canal 16.**

Débit	Max Q	Min BER	Hauteur de l'œil
<b>10 Gbps</b>	40.4055	0	0.0089471
<b>20 Gbps</b>	46.541	0	0.00917017
<b>40 Gbps</b>	15.875	3.51979e -057	0.00823448

**Tableau.III.12. Taux d'erreur binaire BER, le facteur de qualité Q en dB et la hauteur de l'œil (canal 1).**

<b>Débit</b>	<b>Max Q</b>	<b>Min BER</b>	<b>Hauteur de l'œil</b>
<b>10 Gbps</b>	37.6696	4.22598e-311	0.00894887
<b>20 Gbps</b>	42.954	0	0.00908584
<b>40 Gbps</b>	18.5294	4.25417e -077	0.00829581

**Tableau.III.13. Taux d'erreur binaire BER, le facteur de qualité Q en dB et la hauteur de l'œil (canal 4).**

<b>Débit</b>	<b>Max Q</b>	<b>Min BER</b>	<b>Hauteur de l'œil</b>
<b>10 Gbps</b>	36.919	6.30325e -299	0.00886483
<b>20 Gbps</b>	48.1987	0	0.00911812
<b>40 Gbps</b>	10.3717	1.49475e -025	0.00713103

**Tableau. III.14. Taux d'erreur binaire BER, le facteur de qualité Q en dB et la hauteur de l'œil (canal 8).**

<b>Débit</b>	<b>Max Q</b>	<b>Min BER</b>	<b>Hauteur de l'œil</b>
<b>10 Gbps</b>	36.0185	1.62112e -284	0.00891474
<b>20 Gbps</b>	18.5742	2.59421e -077	0.0082979
<b>40 Gbps</b>	3.69004	0.000110059	0.00458832

**Tableau. III.15. Taux d'erreur binaire BER, le facteur de qualité Q en dB et la hauteur de l'œil (canal 16).**

### Résultats et discussions

D'après les résultats présentés ci-dessus on peut remarquer qu'en absence de la fibre à réseau de Bragg les signaux subissent beaucoup de distorsions. Après insertion des fibres FBG après chaque démultiplexeur les diagrammes de l'œil présentés par les figures (Figure III.12, Figure III.16, Figure III.17 et Figure III.18) montrent que l'œil est devenu clairement plus ouvert. Les signaux sont reçus dans ce cas avec un minimum de distorsion ce qui confirme que le pourcentage de pertes dans la fibre optique est très faible. Puis elle commence à devenir plus étroite en augmentant le débit.

Aussi, d'après les tableaux (Tableau.III.13, Tableau.III.14, Tableau.III.15, Tableau.III.16) on peut noter que le taux d'erreur binaire est acceptable pour des débits inférieurs à 40Gbps, mais il sera très élevé si le débit augmente au-delà de 40Gbps.

En comparant entre les quatre canaux de ce système en termes de facteur de qualité, on observe que le canal 1 est le meilleur d'entre eux.

## VI. Conclusion

Dans le dernier volet de ce manuscrit, une simulation des différentes liaisons optiques à des différents débits allant de 10Gbps à 60Gbps a été faite. Dans un premier temps on a simulé une simple chaîne de base. Ensuite, nous nous sommes intéressés à la proposition de deux méthodes de compensation de la dispersion chromatique :

- Compensation de dispersion à l'aide d'une fibre compensatrice de dispersion (DCF) en utilisant trois techniques (Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF) où le meilleur résultat a été obtenu en utilisant la technique Post-DCF.
- Compensation de dispersion à l'aide d'une fibre à réseau de Bragg (FBG) en utilisant aussi trois techniques (Pré-FBG, Post-FBG, Pré post-FBG) où le meilleur résultat a été obtenu en utilisant la technique Post-FBG.

On constate que ces deux compensateurs, DCF et FBG, fonctionnent bien. Cependant, le compensateur FBG fonctionne mieux que le format DCF.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la simulation dans les liaisons optiques hauts débits. Nous avons analysé un système WDM à 16 canaux pour différents débits (de 10 à 40Gbps) pour chaque canal. D'abord on a simulé ce système WDM sans compensation, puis on a ajouté des fibres à réseaux de Bragg afin de compenser les distorsions dues aux effets de la dispersion chromatique. Ces simulations montrent clairement l'amélioration des

performances d'un système WDM en présence des réseaux de Bragg ainsi que leurs influences sur le débit binaire.

# Conclusion générale

L'objectif de nos travaux était d'étudier quelques solutions de compensation de la dispersion chromatique dans les liaisons optiques en utilisant le logiciel OptiSystem.

Deux techniques ont été étudiées : la technique utilisant la fibre compensatrice (DCF) et la technique utilisant des fibres à réseaux de Bragg.

Notre choix s'est porté sur le logiciel OptiSystem qui permet des gains de temps et d'argent en évitant les expérimentations itératives sur des démonstrateurs de systèmes. Les différentes simulations nous ont montré les effets de la dispersion chromatique ainsi que les dégradations subies à la sortie de la chaîne de transmission.

Une première solution a été envisagée, et qui consiste à intégrer une fibre compensatrice (DCF) avec trois configurations (Pré-DCF, Post-DCF, Pré post-DCF).

La deuxième solution proposée consiste à remplacer la fibre compensatrice (DCF) par une fibre de Bragg avec trois configurations (Pré-FBG, Post-FBG, Pré post-FBG). Après analyse et évaluation des techniques de compensation de la dispersion par le diagramme de l'œil on a pu constater que les configurations post-DCF et post-FBG sont les plus efficaces. On a pu remarquer également que le FBG présentait de meilleurs résultats en termes de facteur de qualité.

L'étude d'un système WDM à 16 canaux sans compensation puis avec compensation en utilisant des fibres à réseau de Bragg a été également entreprise.

## Références bibliographiques

- [1] Stéphane CALVEZ, « Laser à Fibre pour les Télécommunications Multiplexées en Longueur d'onde », Thèse de Doctorat, Université de Franche Comté, Juin 2002
- [2] Pierre LECOY, « Communications sur fibres optiques », 4<sup>ème</sup> Edition, 2015, Lavoisier, paris.
- [3] Harry J. R. Dutton, “Understanding Optical Communications”, First Edition, September 1998.
- [4] Victor Girondin, « Etude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques - Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe », Thèse de Doctorat, Université Pierre ET Marie Curie, mai 2016.
- [5] GRAINI Leila, « Applications des similaritons dans les systèmes de télécommunications par fibre optique à très haut débit », Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar-Annaba, Avril 2017.
- [6] CARENCO.A., « Composants actifs, Systèmes optiques », Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse, Ecole d'été, Juillet 1991.
- [7] Rachid RADOUANI, « Dérive dans les modulateurs électro-optiques Mach-Zehnder. Analyse physique et résolution », Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, Juin 2006.
- [8] G. P. Agrawal, “Nonlinear Fiber Optics,” Third Edition, Academic Press, Inc, 1995.
- [9] Younes ZOUINE, « contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA, Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, octobre 2005.
- [10] Ziemann, O., Krauser, J., Zamzow, P.E., Daum, W., “POF Handbook - Optical Short Range Transmission Systems”, 2nd edition, 2008, Springer.
- [11] Jérôme LAURENT, « communication optique à très haut débit », examen probatoire CNAM Paris, décembre 2004.
- [12] CASSAN E., « Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples », J3eA Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, EDP Sciences, Vol. 2, 2003.
- [13] <http://www.syscope.net/elec/B33.pdf>
- [14] John M. Senior, " Optical fiber communications: Principles and practice", third edition, Prentice Hall, 2009.
- [15] <http://millysu.e-monsite.com/blog/>
- [16] <http://informafun.free.fr/avantages.htm>
- [17] G. P. Agrawal, “Fiber-Optic Communications Systems”, Third Edition, 2002 by John Wiley & Sons, Inc.

- [18] N. BOUDRIOUA, "Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique vers une compensation électronique de la PMD", Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, octobre 2007.
- [19] P. A. Bélanger, Les fibres optiques : Supplément d'électromagnétisme appliqué, Université Laval, Canada.
- [20] Nick Massa, "Fiber Optic Telecommunication" in Fundamentals of Photonics, Springfield, 2000 University of Connecticut, pp.293.
- [21] Julien MAURY, « Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, novembre 2003.
- [22] Laurent COLOMER, « Les mesures de dispersion chromatique (DC) », Conférences Opto 2005.
- [23] M. OUADAH, « Etude des Fibres Microstructurées Compensatrices de Dispersion Chromatique », Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE, 2017.
- [24] S. BENAMEUR, « La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable », Thèse de Doctorat Cotutelle, Université de LIMOGES et université de SIDI BEL-ABBES, 30 Juin 2015.
- [25] HADJERES Ismail, NOURA Imad, « Etude et simulation de la technique CDMA appliqué aux transmissions optiques utilisant les réseaux de Bragg », Mémoire du Projet de Fin d'Etudes, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana.
- [26] I. FSAIFES, « Encodage et décodage temporel "Tout-optique" à réseau de Bragg pour l'accès multiple », Ecole supérieur de télécommunication, paris, 2007.
- [27] Johannes Skaar, « Synthesis and characterization of fiber Bragg gratings », these de doctorat, Institut of optical research Sweden, 2001.



## **Résumé**

Actuellement, la fibre optique est devenue l'un des supports de transmission la plus utilisé dans les télécommunications optiques Hautes Débits. En outre, lors de la transmission sur des longues distances, la fibre optique présente certains facteurs limitant la propagation telles que la dispersion chromatique et les pertes dues à l'atténuation.

L'objectif de notre travail consiste à proposer des solutions afin de compenser l'effet de la dispersion chromatique à la longueur d'onde  $\lambda=1.55\mu\text{m}$  dans les systèmes de multiplexage WDM en utilisant deux techniques différentes. La première technique utilise des fibres compensatrices de dispersion chromatique, tandis que la seconde met en œuvre des fibres à réseaux de Bragg. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel Optisystem.

L'analyse des résultats obtenus a été réalisée à partir du diagramme de l'œil, du facteur de qualité ainsi que du taux d'erreur binaire. Nous avons constaté que l'utilisation des fibres à réseaux de Bragg constitue une bonne alternative de compensation de dispersion chromatique dans les systèmes de multiplexage WDM.

**Mots clés :** Dispersion chromatique, Fibre monomode (SMF), Fibre compensatrice (DCF), Réseau de Bragg (FBG).

## **Abstract**

Currently, optical fiber has become one of the most used transmission media in high-speed optical telecommunications. In addition, during transmission over long distances, the optical fiber has certain factors limiting the propagation such as chromatic dispersion and losses.

The goal of our work is to compensate for the effect of chromatic dispersion at wavelength " $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ " in WDM multiplexing systems using two different techniques. The first technique uses chromatic dispersion compensating fibers and the second technique relies on the use of Bragg grating fibers using Optisystem simulation software.

Comparing the results obtained such as the eye diagram, quality factor as well as the bit error rate, we found that the use of Bragg grating fiber is the best choice to

compensate the effect of chromatic dispersion caused by single-mode fiber in WDM multiplex systems.

**Keywords:** Chromatic dispersion (DC), Single Mode Fiber (SMF), Dispersion compensation Fiber (DCF), Fiber Bragg Grating (FBG).

### ملخص

حالياً، أصبحت الألياف الضوئية واحدة من وسائل النقل الأكثر استخداماً في الاتصالات البصرية عالية التدفق. بالإضافة إلى ذلك، أثناء الإرسال عبر المسافات الطويلة، فإن الألياف البصرية لها بعض العوامل التي تحد من الانتشار مثل التشتت اللوني والخسائر. الهدف من عملنا هذا هو التعويض عن تأثير التشتت اللوني في الطول الموجي " $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ " في أنظمة تعدد الإرسال WDM باستخدام تقنيتين مختلفتين. تعتمد التقنية الأولى على ألياف تعويض التشتت اللوني (DCF)، أما التقنية الثانية فتعتمد على استخدام ألياف شبكة براغ (FBG) وذلك اعتماداً على برنامج المحاكاة .

### OPTISYSM

بمقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال مخطط العين، عامل الجودة، وكذلك معدل الخطأ (BER) ، وجدنا أن استخدام ألياف شبكة براغ هو الخيار الأفضل للتعويض عن تأثير التشتت اللوني الناجم عن الألياف الأحادية الوضع في أنظمة تعدد الإرسال WDM .

**الكلمات المفتاحية:** الاتصال البصري، الألياف أحادية الوضع (SMF) ، الألياف التعويضية (DCF) ، التشتت اللوني، ألياف شبكة براغ (FBG) .