

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université –Ain T'émouchent-Belhadj Bouchaib

Faculté de Science et Technologie



**Département :** Electronique & Télécommunication

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

**En :** Télécommunication

**Spécialité :** Réseau et Télécommunication

**Par :** BOUBOSSELA Wafaa & BOUANANI Nada fatima zohra

**Thème**

**Analyse comparative des performances des systèmes WDM avec compensation de dispersion pour des transmissions longue distance à 8×10 Gbps et 8×20 Gbps en modulation NRZ**

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

Dr : Boukhobza Abdelkader	MCA	Univ. Ain T'émouchent	Président
Dr :Hadj Abdelkader Benghenia	MCB	Univ. Ain T'émouchent	Encadrant
Dr :Mohammed Debbal	MCA	Univ. Ain T'émouchent	Examinateur

*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 Encadrant

**Mr .HADJ Abdelkader BENGHENIA**  
**(Professeur, Université de Ain T'émouchent)**

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 estime.

A notre encadrant de stage

**Mr. Matallah Amine**

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

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

Remerciements .....	i
Liste des figures .....	ii
Liste des tableaux.....	iii
Liste des Acronymes .....	iv
Introduction générale .....	v
<b>Chapitre 1 : Fondements Technologies des Fibre Optiques .....</b>	<b>1</b>
<b>I.1 Introduction :.....</b>	<b>1</b>
<b>I.2 Présentation générale des fibres optique : .....</b>	<b>1</b>
<b>I.2.1 Définition de la fibre optique :.....</b>	<b>1</b>
<b>I.2.2 Classification des fibres optiques : [31].....</b>	<b>2</b>
<b>I.2.3 Limitations de la transmission optique :.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.4 Techniques de modulation :.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.5 Avantages et inconvénients des fibres optiques : .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.6 Applications des fibres optiques :.....</b>	<b>11</b>
<b>I.3 Emetteur optique :.....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.1 Emetteur à LED : .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.2 Emetteur de diodes LASER : .....</b>	<b>13</b>
<b>I.4 Le modulateur de Match-Zehnde (MMZ) : .....</b>	<b>13</b>
<b>I.5 Récepteur optique : .....</b>	<b>13</b>
<b>I.6 L'amplificateur optique :.....</b>	<b>14</b>
<b>I.7 Système WDM : .....</b>	<b>14</b>
<b>I.8 Conclusion : .....</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre II : Approches de Compensation de la Dispersion dans les Fibres Optiques .....</b>	<b>15</b>
<b>I .Introduction :.....</b>	<b>16</b>
<b>II.2. Les différentes formes de dispersion optique :.....</b>	<b>16</b>
<b>II.2.1. Dispersion modale (ou intermodale) :.....</b>	<b>16</b>
<b>II.2.2. Dispersion chromatique : .....</b>	<b>16</b>
<b>II.2.3. Dispersion des modes de polarisation (PMD) :.....</b>	<b>17</b>
<b>II.3. Techniques de compensation de dispersion :.....</b>	<b>18</b>
<b>II.3.1. Technique compensation de dispersion par des fibres compensatrice (DCF) : .....</b>	<b>18</b>
<b>II.3.2. Compensation par réseaux de Bragg inscrits dans les fibres : .....</b>	<b>19</b>
<b>II.4. Les type de réseaux de Bragg : .....</b>	<b>21</b>
<b>II.4.1-Réseau de Bragg uniforme : .....</b>	<b>22</b>
<b>II.4.2- Réseau de Bragg « tilted » ou « blazed » : .....</b>	<b>22</b>
<b>II.4.3-Réseau de Bragg à pas variable ou « chirped » :.....</b>	<b>22</b>

II.4.4-Réseau de Bragg apodisé :	22
II.4.5-Réseau de Bragg échantillonné :	22
II.4.6- Réseau de Bragg à saut de phase :	23
II.5.Application des réseaux de Bragg en télécommunication :	23
II.5.1-Filtrage et multiplexage :	23
II.5.2-Compensation de la dispersion chromatique :	23
II.5.3- Senseurs :	24
II.6.La théorie des modes couplés :	24
II.7. Conclusion :	24
Chapitre III :	26
Simulation et résultats.	26
III.1. Introduction :	27
III.2. Présentation du logiciel OptiSystem :	27
III.2.1 Interface du logiciel OptiSystem :	28
III.3 Paramètres de performance	29
III.3.1 Taux d'erreurs binaires (BER).....	29
III.3.2 Facteur de qualité Q	29
III.3.3 Diagramme de l'œil.....	29
III.4 Travail de simulation.....	29
III.4.1 Système optique étudié – Monocanal avec compensation DCF .....	29
III.4.2 Système WDM à 8 canaux avec compensation hybride DCF–FBG .....	31
III.5 Les résultat de simulation.....	32
III.5.1 Influence de la puissance sur le facteur Q.....	32
III.5.2 Évaluation comparative de la qualité de transmission en fonction de la distance pour un système WDM à 8 canaux avec pré-compensation et compensation symétrique à 10 Gbps et 20 Gbps.....	34
III.5.3 Évolution du facteur Q maximal selon la distance, le débit binaire et le schéma de compensation de dispersion .....	38
III.5.4 Comparaison des techniques de compensation de dispersion entre différentes études .....	43
III.6 Conclusion.....	43
Conclusion générale .....	45
Références bibliographique .....	47
Bibliographie .....	48

## Liste des figures

Figure .I.1 Schéma d'un câble à fibre optique .....	2
Figure I.2. Schéma fibre multimode à saut d'indice .....	3
Figure I.3 Schéma fibre multimode à gradient d'indice .....	3
Figure I.4 Schéma fibre monomode .....	4
Figure I.5 : Schéma modulation AM .....	6
Figure I.6 : Schéma de modulation externe .....	9
Figure I.7 : Structure d'un émetteur optique. ....	12
<u>Figure I.8 : Schéma simplifié d'une LED. ....</u>	12
Figure. I.9.Récepteur optique. ....	14
Figure I.10 : Schéma de système WDM.....	15
Figure II.1 : Dispersion modale. ....	16
Figure II.2 : Dispersion chromatique. ....	17
Figure II.3 : dispersion PMD .....	17
Figure II.4 : Technique compensation de dispersion .....	19
Figure II.5 : réseaux de Bragg .....	20
Figure II.6 : Fonctionnement des fibres à réseau de Bragg .....	20
Figure II.7 : Pré-compensation FBG. ....	21
Figure II.8 : Poste-compensation FBG. ....	21
Figure II.9 : Pré poste-compensation FBG.....	21
<u>Figure III.1 : La bibliothèque de logiciel Optisystem.....</u>	28
Figure III.2 : Editeur de Layout.....	28
Figure III.3: Schéma de simulation – Post-compensation de dispersion .....	30
FigureIII.4 : Schéma de simulation – Pré-compensation de dispersion .....	30
Figure III.5 : Schéma de simulation – Compensation de dispersion symétrique . ....	31
Figure III.6 : Schéma du système WDM à 8 canaux avec compensation hybride DCF-FBG	32
Figure.III.7 : Schéma du système WDM à 8 canaux avec compensation hybride DCF-FBG .....	Error! Bookmark not defined.
Figure.III.8 : Facteur Q en fonction de la puissance du signal à 20 Gbps.....	33
Figure.III.9 : Comparaison du facteur Q et du BER en fonction de la distance de transmission pour un système WDM à 8 canaux à 10 Gbps en pré-compensation : DCF seul vs DCF + FBG .....	34
Figure.III.10 : Comparaison du facteur Q et du BER en fonction de la distance de transmission pour un système WDM à 8 canaux à 20 Gbps en pré-compensation : DCF seul vs DCF + FBG.....	35

<b>Figure.III.11 : Comparaison du facteur Q et du BER en fonction de la distance de transmission pour un système WDM à 8 canaux à 10 Gbps en compensation symétrique: DCF seul vs DCF + FBG .....</b>	<b>36</b>
<b>Figure.III.12 : Comparaison du facteur Q et du BER en fonction de la distance de transmission pour un système WDM à 8 canaux à 20 Gbps en compensation symétrique: DCF seul vs DCF + FBG .....</b>	<b>37</b>
<b>Figure.III.13 : Diagrammes de l'œil à 150 km pour un système WDM à 8 canaux – Comparaison entre DCF seul et DCF + FBG à 10 Gbps et 20 Gbps (Pré-compensation) .....</b>	<b>41</b>
<b>Figure.III.14 Diagrammes de l'œil à 150 km pour un système WDM à 8 canaux – Comparaison entre DCF seul et DCF + FBG à 10 Gbps et 20 Gbps (Sym-compensation )</b>	<b>42</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1 Comparaison entre les différents types de la fibre optique [4] .....</b>	<b>20</b>
<b>Tableau. III.1. Résumé des valeurs maximales du facteur Q pour les schémas de compensation de dispersion selon différentes distances de transmission et débits binaires.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure.III.2 : Comparaison des techniques de compensation utilisées dans diverses études .....</b>	<b>43</b>

## Liste des Acronymes

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

**DBR:** Distributed Bragg Reflector.

**DC :** Dispersion chromatique.

**DCF:** Dispersion-Compensating Fiber.

**DEMUX :** Demultiplexer.

**DFB :** Distributed Feedback.

**Dg:** Dispersion de guide.

**DL :** Diode LASER.

**Dm :** Dispersion de matériel.

**Dmod :** Dispersion modale.

**EDFA:** Erbium Doped Fiber Amplifier.

**FBG:** Fiber Bragg Grating.

**FO :** Fibre optique.

**FP :** Fabry-Pérot.

**FPB :** Filtre Passe Bas.

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

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

**LPF:** Low Pass Filter.

**MMF:** Multimode Fiber.

**MMZ:** Modulator Mach-Zehnder.

**MUX :** Multiplexer.

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

**ON :** Ouverture Numérique.

**PE :** Puissance d'entrée.

**PIN:** Positive Intrinsic Negative.

**PMD:** Polarization Mode Dispersion.

**PRBS:** Pseudo Random Binary Sequence.

**PS:** Puissance de sortie.

**SI :** Saut d'indice.

**SMF:** Single-Mode Fiber.

**WDM :** WaveLength Division Multiplexing (Multiplexage en Longueur D'onde).

# Introduction générale

L'évolution constante des technologies de l'information et des communications a entraîné une croissance exponentielle des besoins en matière de capacité de transmission, de fiabilité et de débit. Pour répondre à ces exigences, la fibre optique s'est imposée comme le support de transmission de référence, grâce à ses nombreux avantages tels qu'une bande passante très élevée, une atténuation faible, une grande légèreté et une insensibilité aux interférences électromagnétiques. Cependant, malgré ses atouts, la fibre optique est soumise à certaines limitations physiques, en particulier la dispersion chromatique, qui provoque un élargissement des impulsions lumineuses, engendrant un recouvrement des symboles et une dégradation du signal.

Face à ce problème, plusieurs techniques de compensation de la dispersion ont été développées afin d'améliorer la qualité de transmission sur de longues distances et à hauts débits. Parmi ces techniques, deux approches se démarquent : l'utilisation de fibres à dispersion compensée (DCF) et l'intégration de réseaux de Bragg en fibre (FBG). Ces deux technologies permettent de corriger efficacement les effets de dispersion et d'optimiser la transmission optique, en particulier dans les systèmes multiplexés en longueur d'onde (WDM).

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux. Le premier chapitre est consacré aux fondements technologiques des fibres optiques. Il présente les types de fibres (monomode et multimode), les effets physiques qui affectent la transmission (effets linéaires et non linéaires), les techniques de modulation (directe et externe), ainsi que les composants clés des systèmes de communication optique tels que les émetteurs, les modulateurs Mach-Zehnder, les amplificateurs optiques, les récepteurs et les architectures WDM. Le deuxième chapitre explore en détail les phénomènes de dispersion optique et les techniques de compensation associées. Il met l'accent sur les principes de fonctionnement des DCF et des FBG, leurs configurations possibles (pré-, post- et symétrique), ainsi que les différentes structures de réseaux de Bragg et leurs applications en télécommunication. Enfin, le troisième chapitre présente les simulations réalisées à l'aide du logiciel OptiSystem. Divers scénarios sont étudiés, notamment pour des systèmes monocanal et WDM à 10 et 20 Gbps, en testant différentes configurations de compensation. Les résultats obtenus montrent que la solution hybride DCF-FBG en mode symétrique permet d'obtenir les meilleures

## Introduction générale

---

performances, avec un facteur Q élevé et un taux d'erreur binaire (BER) réduit, même à haut débit sur de longues distances.

Ce travail met ainsi en évidence l'importance des solutions hybrides dans la compensation de la dispersion chromatique, et leur capacité à assurer des transmissions optiques plus efficaces, robustes et adaptées aux réseaux de nouvelle génération.

**Chapitre 1 :**  
**Fondements**  
**Technologies des**  
**Fibre Optiques**

### I.1 Introduction :

Depuis son invention dans les années soixante, la fibre optique, composée de verre hautement transparent, a transformé le domaine des télécommunications. La transmission de l'information ne se fait plus par voie électrique, mais plutôt par le biais de la lumière. Les fibres optiques sont principalement utilisées pour acheminer la lumière d'un bout à l'autre de la fibre et sont couramment employées dans les télécommunications par fibre optique. Elles offrent une transmission sur de plus grandes distances et des débits de données (bandwidth) supérieurs aux câbles électriques. On privilégie l'utilisation de fibres aux fils métalliques, car les signaux qui les traversent sont moins sujets à la déperdition. De plus, les fibres sont imperméables aux interférences électromagnétiques, un inconvénient majeur rencontré avec les fils métalliques. . Les fibres trouvent aussi leur application dans l'éclairage et l'imagerie, étant généralement regroupées en faisceaux pour permettre le transport de lumière ou d'images hors de lieux restreints, comme c'est le cas avec un fibroscope. On utilise également des fibres spécifiquement élaborées pour diverses autres applications, y compris les capteurs à fibre optique et les lasers à fibre.

Ainsi, la fibre optique est une avancée technologique plutôt récente qui a rapidement gagné en importance dans le domaine des télécommunications grâce à sa capacité à transmettre une multitude d'informations sur de vastes distances comparativement aux autres moyens (câble coaxial, radio, etc.).

Toutefois, à l'instar de tout médium de communication, la fibre optique n'est pas exempte d'anomalies de transmission qui se manifestent par des effets linéaires et non linéaires affectant la diffusion du signal à travers la fibre optique.

### I.2 Présentation générale des fibres optique :

#### I.2.1 Définition de la fibre optique :

La fibre optique est un fil de verre transparent très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle a un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux. 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 [29]

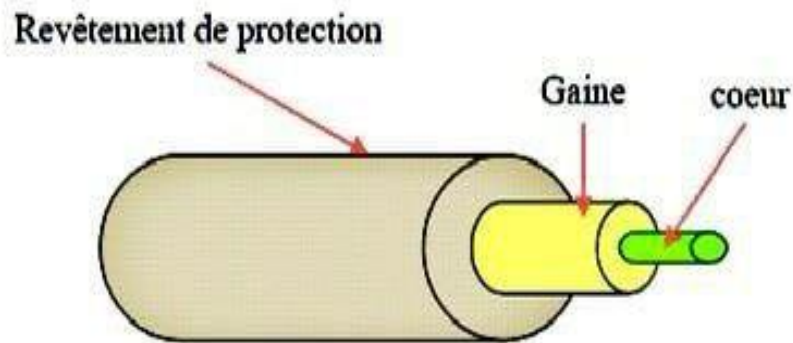


Figure .I.1 Schéma d'un câble à fibre optique

Le diamètre du cœur est de quelque dizaine de micromètre et celui de la gaine est de quelque centaine de micromètre, la fibre toute seule est très fragile et pour la protéger contre les facteurs externes (humidité, attaque chimique) elle est revêtue par le plastique puis par le nylon .[30]

### I.2.2 Classification des fibres optiques : [28]

#### I.2.2.1 Fibres optiques multimodes :

Fibres optiques sont classées en deux catégories selon leur diamètre et la longueur d'onde utilisée Fibres optiques multi modes (MMF : Multi Mode Fiber)

Ce sont les premières à avoir été découvertes et mises en place. Comme leur nom l'indique, ces fibres peuvent transporter plusieurs modes, à savoir plusieurs trajets lumineux où les propagations différentes sont possibles au cœur de la fibre. Le diamètre du cœur des fibres multi modes est de l'ordre de 50-62.5 $\mu\text{m}$  pour les fibres de silice et de 0.5 à 1mm pour les fibres en plastique. Elles sont utilisées uniquement pour des bas débits et de courtes distances.

Pour les fibres optiques multi modes on trouve deux grandes catégories :

### I.2.2.1.1 à saut d'indice :

Les fibres à saut d'indice : (débit limité à 50 Mb/s), dans lesquelles l'indice de réfraction du cœur est homogène dans toutes les directions

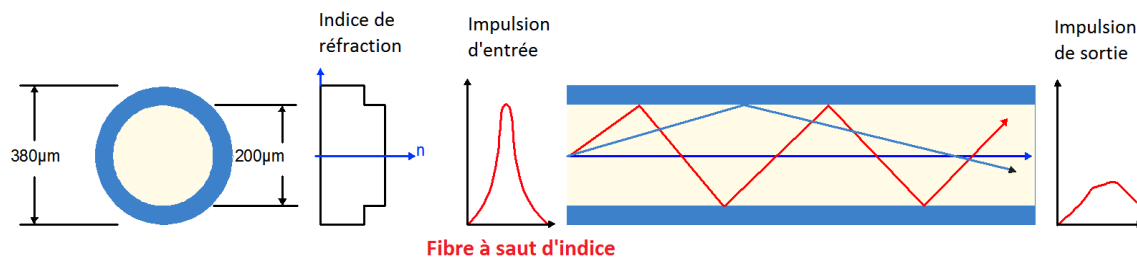


Figure I.2. Schéma fibre multimode à saut d'indice

Débit : environ 100 Mbit/s

Portée maximale : environ 2 Km

Affaiblissement : 10 dB/Km

### I.2.2.1.2 à gradient d'indice :

Les fibres à gradient d'indice : (débit limité à 1 Gb/s), dans lesquelles l'indice de réfraction du cœur décroît transversalement à partir de l'axe longitudinal.

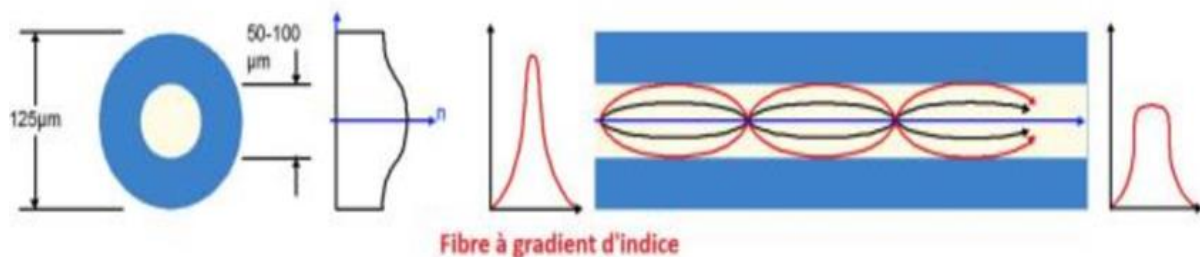


Figure I.3 Schéma fibre multimode à gradient d'indice

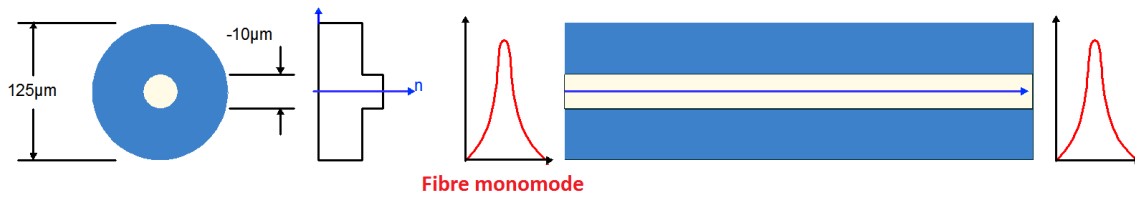
Débit : environ 1 Gbit/s

Portée maximale : environ 80 à 100 Km

Affaiblissement : 10 dB/Km

### I.2.2.2 Fibre optique monomode :

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 Schéma fibre monomode**

La fibre monomode est utilisée pour les communications longue distance. La transmission des données y est assurée par des lasers émettant des longueurs d'onde de 1300 à 1550 nanomètres et par des amplificateurs optiques situés à intervalles réguliers.

**Débit : environ 100 Gbit/s**

**Portée maximale : environ 100 Km**

**Affaiblissement : 0,5 dB/Km**

Le tableau ci-dessous résume la comparaison entre les diverses sortes de fibres.

Structure	Avantage	Inconvénients	Applications pratique
Multimode à saut indice	-grande ouverture numérique -connexion facile -faible prix -facilité de mis en œuvre	Pertes, dispersion et distorsion élevées du signal	Communications courtes distances, réseaux locaux
Multimode à gradient indice	Bande passante raisonnable et bonne qualité de transmission	Difficile à mettre en œuvre	Communications courtes et moyennes distances
Monomode	Bande passante très grande, dispersion très faible	Prix très élevé	Communications longues distance

**Tableau I.1 Comparaison entre les différents types de la fibre optique**

### I.2.3 Limitations de la transmission optique : [2] [3] [4] [5]

#### I.2.3.1 Effets linéaires :

Les effets linéaires englobent tous les effets qui ne nécessitent pas d'interactions entre les faisceaux (ou signaux) transmis. Par conséquent, le principe de superposition est applicable (l'intensité totale correspond à la somme de l'intensité de chaque faisceau). Puisque les effets linéaires sont intrinsèquement liés à la distance de propagation, leur importance augmente

proportionnellement avec l'accroissement des distances de transmission. Soit ils changent l'intensité des impulsions (atténuation) soit leur forme (dispersion).

### I.2.3.2 Effets non linéaires : [1] [3] [4] [5]

Une onde lumineuse à haute intensité voyageant à travers une fibre optique monomode. Peut produire un vaste éventail d'effets non linéaires, dont nous pouvons mentionner :

✓ L'effet Kerr

✓ L'effet Brillouin

✓ L'effet Raman.

#### ✓ L'effet Kerr :

L'effet Kerr optique est défini comme la dépendance de l'indice de réfraction d'un milieu transparent vis-à-vis de l'intensité du champ optique. On considère généralement qu'à l'intérieur d'une fibre optique, le changement d'indice se produit de manière instantanée (avec un temps de réponse approximativement de 10<sup>-10</sup> s). Il est issu de la distorsion, par le biais du champ optique, de la distribution des charges électroniques des molécules de silice. Le rapport suivant définit alors l'indice de réfraction non-linéaire  $n_{NL}$  :

$$n_{NL} = n(\lambda, I(t)) = n(\lambda) + n_2 I(t)$$

$n(\lambda)$  : l'indice de réfraction linéaire des matériaux.

$I(t)$  : l'intensité instantanée du champ optique appliqué en W.m<sup>-2</sup>

$n_2$  : le coefficient non-linéaire de réfraction

#### ✓ L'effet Brillouin :

Sous l'influence de la température, les molécules présentes dans le milieu sont soumises à une agitation thermique et effectuent des mouvements mineurs autour de leur position d'équilibre. Les phonons interagissent entre eux et modifient l'indice de réfraction du milieu, engendrant des ondes acoustiques de très basse amplitude. Ainsi, lorsqu'une onde électromagnétique se déplace, elle se répand dans toutes les directions.

#### ✓ Effet Raman :

Quand une onde pompe (photons incidents) pénètre un matériau, elle est annihilée. Certains de ces photons transfèrent une portion de leur énergie à un phonon, particule liée à la vibration qui se manifeste dans le matériau, présentant une fréquence spécifique  $\delta\nu$ . Ces derniers, lorsqu'ils sont diffusés avec une énergie réduite, donnent lieu à une onde nommée (onde Stokes), de fréquence :

$$V_s = V_p - \delta v$$

$\delta v$  : dépend que du matériau

À l'inverse, lorsque les phonons transmettent leur énergie à des photons qui se propagent sous forme d'une onde (anti-Stokes) de fréquence.

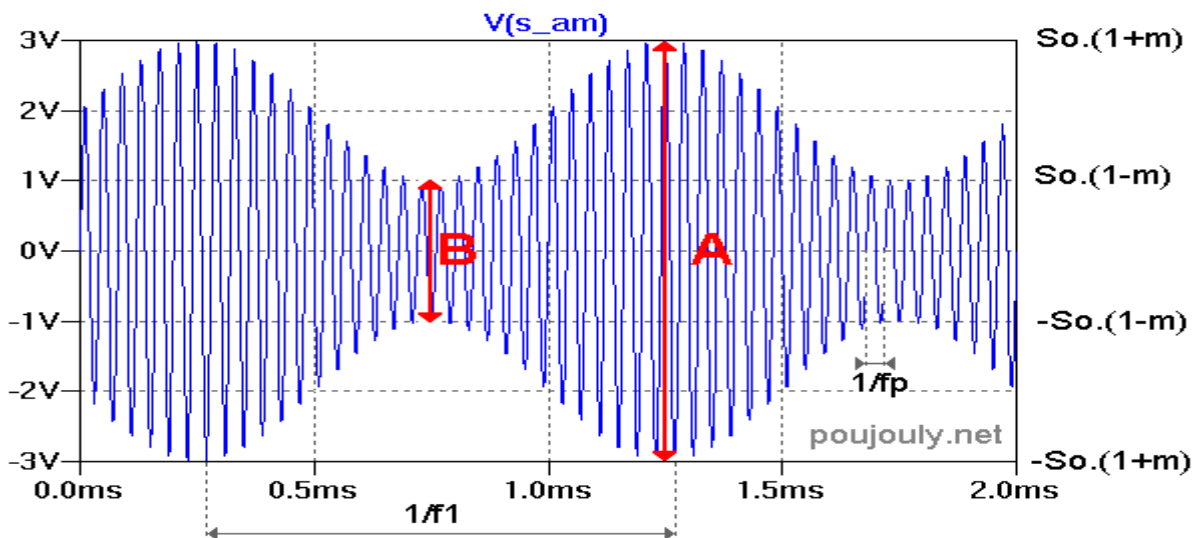
$$V_a = V_p + \delta v$$

### I.2.4 Techniques de modulation :

#### I.2.4.1 Modulation direct : [6] [7]

##### I.2.4.1.1 Modulation d'amplitude AM :

La modulation d'amplitude est le processus de modification de l'amplitude du signal de porteuse analogique proportionnellement à l'amplitude du signal d'information analogique. En AM, l'amplitude ( $v$ ) du signal de porteuse varie proportionnellement au signal d'information, tandis que la fréquence ( $f$ ) et la phase ( $\phi$ ) du signal de porteuse restent inchangées. L'amplitude de la porteuse est simplement modifiée en fonction de l'amplitude du signal d'information. Lorsque l'amplitude du signal d'information est augmentée, l'amplitude du signal de la porteuse est également augmentée et inversement [3]. En modulation d'amplitude (AM), le signal d'information fait varier l'amplitude de l'onde sinusoïdale de la porteuse. La valeur instantanée de l'amplitude de la porteuse change en fonction des variations d'amplitude et de fréquence du signal modulant. Une ligne imaginaire appelée enveloppe relie les images positifs et négatifs de la forme d'onde de la porteuse.



**Figure I.5 : Schéma modulation AM**

Dans le mode AM, il est crucial que l'amplitude maximale du signal modulant soit inférieure à celle de la porteuse.

Avec

$V_C$  : Amplitude maximale de la porteuse.

$V_m$  : Valeur maximale du signal de modulation.

La déformation se produit lorsque l'amplitude du signal de modulation dépasse celle de la porteuse.

### **I.2.4.1.2 Composants utilisés :**

#### **A) Éléments Essentiels : Oscillateur**

##### **1 Création du Signal**

Le signal porteur est produit par l'oscillateur. On le définit comme  $AC \cos(2\pi fct)$ .

##### **2 Différents types d'oscillateurs.**

On utilise fréquemment des oscillateurs à quartz. On peut également opter pour les oscillateurs LC.

##### **3 Stabilité**

Il est crucial de maintenir la stabilité de la fréquence. Elle garantit un transfert sûr.

#### **B) Éléments Essentiels : Mélangeur**

##### **1 Fonction du Mélangeur**

Le mixeur fusionne les signaux porteurs et modulateurs. C'est une étape essentielle.

##### **2 Variétés de mélangeurs**

Les mélangeurs à diodes sont fréquemment utilisés. Des transistors sont employés par les mélangeurs actifs.

##### **3 Attributs**

La linéarité est un trait essentiel. Il est également crucial d'assurer une bonne isolation.

#### **C) Éléments Essentiels : Amplificateur**

##### **1 Nécessité d'une amplification**

L'amplification accroît la puissance. Cela garantit une transmission efficace.

##### **2 Variétés d'amplificateurs**

On utilise des amplificateurs de classe A, B, C et D. La décision se base sur les exigences.

##### **3 Efficacité et Linéarité**

Il faut trouver un terrain d'entente. Il faut tenir compte de l'efficacité et de la linéarité.

### I.2.4.1.3 Limites de la modulation directe :

#### 1) Limites : Dérive de Fréquence

##### **Définition :**

Variation non désirée de la fréquence du signal.

##### **Cause :**

Instabilité des oscillateurs, variations de température.

##### **Impact :**

Distorsion et perte de synchronisation.

##### **Solutions :**

Cristaux de quartz et boucles PLL.

#### 2) Limites : Non-Linearités

##### **Sources :**

Composants actifs (transistors, diodes).

##### **Conséquences :**

Distorsion harmonique, fréquences parasites.

##### **Techniques :**

Pré-distorsion, rétroaction négative.

#### 3) Limites : Sensibilité au Bruit

##### **Sources :**

Bruit thermique, bruit de grenaille.

##### **Impact :**

Erreurs de détection.

##### **Réduction :**

Filtrage, LNA.

### 4) Limites : Complexité des Circuits :

Concevoir des modulateurs directs performants est difficile. Cela nécessite des composants de haute qualité. **Les circuits** sont plus coûteux et complexes. **Alternatives** : modulation indirecte et numérique.

#### I.2.4.2 Modulation externe :

La modulation externe consiste à graver les données électrique sur un signal optique continu (par le modulateur externe), il est commandé par une tension externe qui est appliquée au modulateur elle permet de présenter l'information à transmettre et consiste à modifier le facteur de transmission, on va utiliser afin de parvenir à moduler le signal lumineux. . [27]

##### I.2.4.2.1 Principe :

Le principe de fonctionnement est le suivant :

En fonction du signal de modulation, Un champ électrique est généré et influe sur l'indice de réfraction du modulateur externe.

Une puissance constructive est créée, cela provoque la disponibilité de la puissance optique

Une puissance destructive est créée, cela provoque alors une absence d'émission de lumière.

Voici l'illustration du fonctionnement par un schéma d'interféromètre Mach-Zhender :

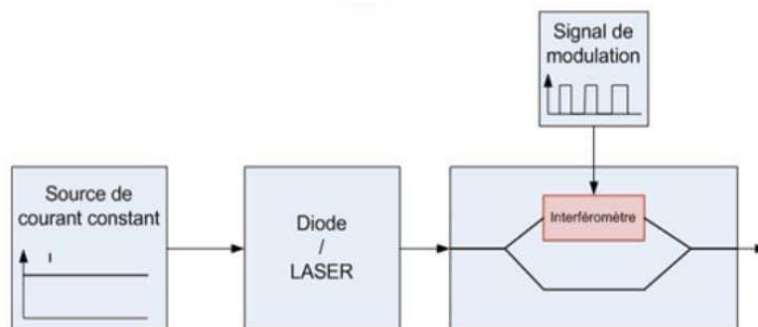


Figure I.6 : Schéma de modulation externe

### I.2.5 Avantages et inconvénients des fibres optiques :

#### I.2.5.1 Avantages :

Les systèmes de communication en fibre optique ont largement supplanté les systèmes basés sur le métal, grâce à leurs atouts comparatifs en termes de transmission électrique. Voici les bénéfices majeurs de la transmission via fibre optique :

✓ **Une bande passante considérable** : aucun autre moyen de transmission ne propose une telle bande passante que la fibre optique. La capacité de transmission d'information par unité de fibre optique est considérablement supérieure à celle des câbles métalliques (pouvant atteindre une vitesse de 1.6 Tb/s dans les systèmes en service et jusqu'à 10 Tb/s dans les installations de laboratoire).

✓ **Taille et poids réduits** : Le câble en fibre optique est nettement plus compact et léger comparé aux câbles électriques pour accomplir les mêmes tâches [8]. Il prend également moins de place que les câbles métalliques ayant la même capacité d'information.

✓ **Le Coût des matériaux** : À la différence du cuivre, les matières premières nécessaires à la fabrication du verre sont moins coûteuses. Ceci indique que de nombreux kilomètres de fibre optique peuvent être mis en place à un coût inférieur, comparativement à des longueurs similaires en fil de cuivre.

✓ **Protection électrique** : Étant donné l'absence de composants métalliques dans la fibre optique, elle peut être déployée dans les zones où les risques de foudre sont élevés, les régions inflammables et celles soumises à des brouillages électromagnétiques sans subir d'impacts.

✓ **Absence d'interférences électromagnétiques** : Le passage de la lumière à travers les fibres optiques n'est pas perturbé par d'autres émissions électromagnétiques environnantes, car la fibre optique est constituée d'un matériau isolant qui ne fonctionne pas comme une antenne pour recevoir des signaux électromagnétiques. Elle est aussi capable de fonctionner dans des milieux où le bruit électrique est présent, sans difficulté, car la fibre n'est pas influencée par le bruit électrique [12]. C'est la raison pour laquelle la communication optique présente si peu de fautes.

✓ **Faible atténuation du signal** : Quand un câble coaxial classique transporte un signal à haute fréquence, il perd la moitié de sa puissance après seulement quelques centaines de mètres. En revanche, la fibre optique présente une atténuation minimale du signal avec une distance de régénération de 15 km ou plus. Par conséquent, un dispositif de répétition sera nécessaire sur de très longues distances.

✓ **Durabilité prolongée** : La longévité d'un réseau en fibre optique est de deux décennies, alors que la période pour atteindre le seuil de rentabilité moyenne se situe entre 2 et 5 ans. Ainsi, la fibre optique représente une option économiquement solide et pérenne pour les entreprises.

✓ **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.

### *1.2.5.2 Inconvénients :*

Comme tout moyen de communication, la fibre optique présente également certains inconvénients.

Toutefois, des limites sont observées :

✓ Le déploiement de la fibre optique implique des coûts considérables.

✓ L'assemblage des fibres optiques est particulièrement ardu en raison de la taille réduite du

cœur. Cela demande des compétences spécifiques et du matériel coûteux pour l'épissage et la mesure.

- ✓ En raison de sa composition, la fibre optique est extrêmement délicate.
- ✓ Les différents produits chimiques, y compris l'hydrogène sous forme de gaz, peuvent avoir un impact sur la fibre (c'est une problématique pour les câbles marins).
- ✓ La diffusion dans les fibres optiques, car elle restreint la capacité de transmission des informations à travers elles.

### **I.2.6 Applications des fibres optiques :**

Transmission numérique à grande vitesse.

- Réseaux télécoms nationaux et internationaux.
- Réseaux locaux dans des environnements bruyants.
- Identification. . [21]

### **Dans le domaine des télécommunications**

La fibre optique, en raison de ses performances remarquables, est de plus en plus Avec la croissance d'Internet et son application dans les réseaux de télécommunications, son usage devient progressivement courant jusqu'à s'inviter chez l'individu. Les premiers utilisateurs de la fibre optique ont été les opérateurs et les entreprises. Elle est particulièrement valorisée par les forces armées en raison de sa résistance aux IEM (Interférences Électromagnétiques), ainsi que pour sa légèreté. **En médecine**, un endoscope spécifique, nommé fibroscope, emploie la fibre optique pour transmettre l'image de la région à inspecter jusqu'à l'œil du praticien effectuant l'examen exploratoire. C'est l'un des premiers usages des fibres optiques. Dans les salles de thérapie Snoezelen, on utilise des décorations lumineuses en fibres optiques plastiques, tant pour l'éclairage des plafonds que pour la stimulation tactile grâce aux filaments des fibres. [22]

### **I.3 Emetteur optique :**

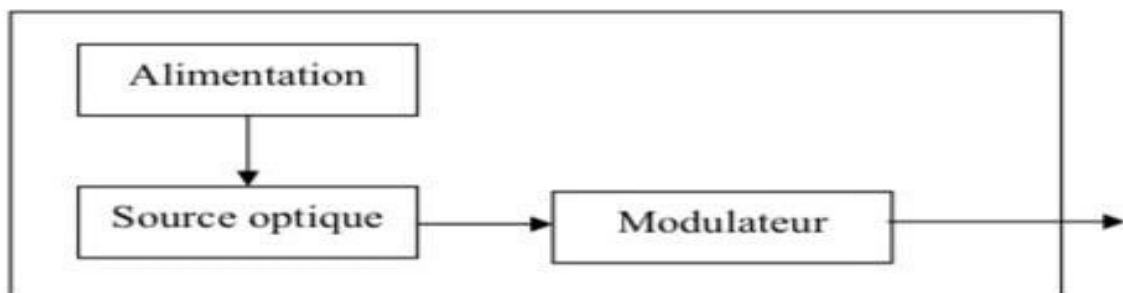
Dans un système de télécommunications optiques il est nécessaire de disposer d'un émetteur optique qui a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Des émetteurs optiques doivent remplir certaines conditions :

- **Faible encombrement.**
- **Fonctionnement à température ambiante.**
- **Commande par circuits à semi-conducteurs.**
- **Capacité à moduler la lumière émise à haute fréquence.**
- **Spectre d'émission étroit.**

- **Puissance d'émission importante.**
- **Grande durée de vie.**

Les composants d'émission de lumière qui satisfont le mieux à ces critères sont des composants à semi-conducteurs et se regroupent en deux catégories : les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes lasers (DL). [23]

Ces deux catégories de sont réalisés à partir de jonction PN polarisée en direct.

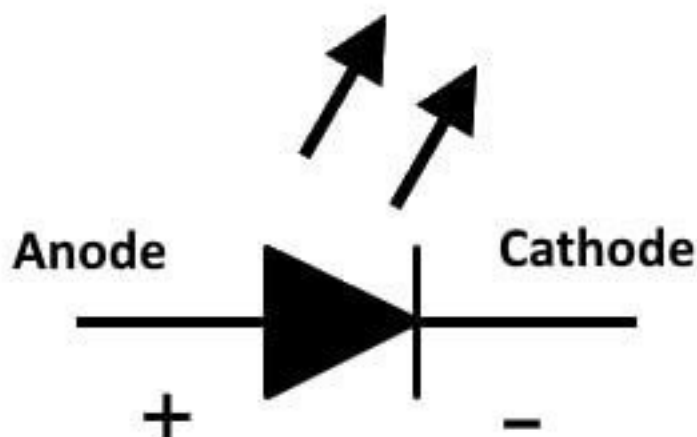


**Figure I.7 : Structure d'un émetteur optique.**

### I.3.1 Emetteur à LED :

Le mot LED est l'acronyme de "Light Emitting Diode" (Diode Electroluminescente en français). La LED est un élément électronique ou optoélectronique qui produit de la lumière lorsqu'elle est traversée par un courant électronique.

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 montré dans la figure.



**Figure I.8 : Schéma simplifié d'une LED.**

Les avantages des LEDs on a : la luminescence élevée, la rapidité de réponse, la grande

Fiabilité, l'encombrement réduit, la forme variée et la tension d'alimentation faible. . [24]

### I.3.2 Emetteur 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  $\mu\text{m}$  [13]. 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 [14].

### I.4 Le modulateur de Match-Zehnde (MMZ) :

Les modulateurs Mach Zehnder reposent sur les effets électro-optiques ( $\text{LiNO}_3$ , GaAs), ce qui signifie que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être ajusté par l'application d'un champ électrique [15]. On identifie deux sortes d'effets électro-optiques :  
• Effet Pockels, où l'indice optique change proportionnellement au champ appliqué.  
• Effet Kerr, dans lequel la modification de l'indice est en relation avec le carré du champ appliqué.

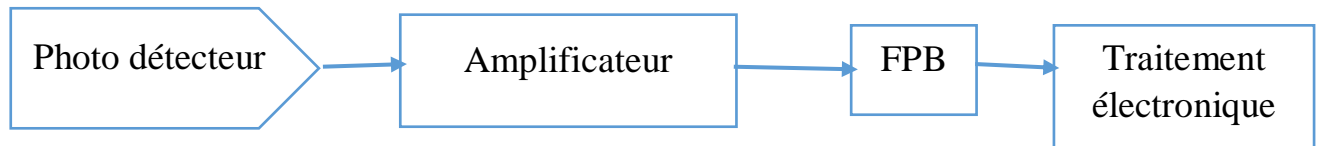
Le MMZ est un type d'interféromètre généralement constitué d'un bras de référence et d'un bras où une variation de phase est créée par un effet électro-optique. Comme illustré dans la figure (I.2), ces deux bras sont des guides optiques de longueur identique et parallèles.

Lorsqu'aucune tension n'est imposée aux guides d'ondes, la lumière incidente se répartit équitablement entre les deux bras de l'interféromètre. L'interférence figure résultant de la recombinaison des ondes provenant des bras est observée. Si l'on impose une tension à l'un des bras de manière que l'écart de phase entre les deux rayons sortants soit un multiple impair de  $\pi$ , l'interférence devient destructive (aucune lumière n'est transmise en sortie). Ainsi, l'interféromètre de Mach-Zehnder agit comme un modulateur d'amplitude [16].

### I.5 Récepteur optique :

Dans une chaîne de communication par fibre optique, le récepteur est tout aussi crucial que l'émetteur [17]. Il est chargé de transformer le signal optique reçu à la fin de la fibre optique en signal électrique tout en minimisant la dégradation. C'est la photo détecteur qui assume ce rôle, offrant l'avantage d'être très rapide et simple à utiliser, comme c'est le cas pour les photodiodes PIN ou à avalanches [18]. Comme le courant électrique est extrêmement faible, un amplificateur à gain élevé est incorporé pour augmenter la puissance du photo-courant généré.

Suite à son amplification, le signal est soumis à un filtre Passe-bas (LPF) afin de diminuer les interférences produites en dehors de la bande passante du signal, avant d'être traité électroniquement pour l'analyse des données.



**Figure. I.9. Récepteur optique.**

En termes de connexions par fibre optique, les paramètres essentiels qui définissent la détection sont : la longueur d'onde de coupure, la sensibilité du détecteur ( $A/W$ ) qui quantifie le rapport entre le photo-courant recueilli et l'énergie optique incidente, l'efficacité quantique et le courant d'obscurité du détecteur.

### I.6 L'amplificateur optique :

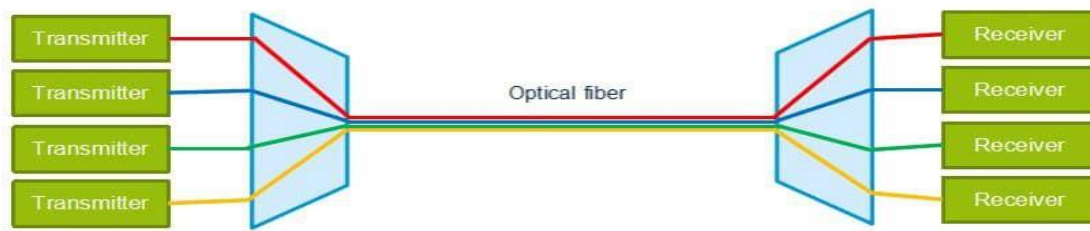
Une évolution énorme a été effectuée sur les fibres et les dispositifs pour les systèmes de communications optiques au début des années 60. Mais les vrais changements ont été dans les années 1980 quand les amplificateurs apparus. Dans les systèmes optiques, les données transportées sur des distances 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. La mise en œuvre de cette technologie devient extrêmement complexe et coûteuse pour les systèmes multicanaux. C'est pourquoi l'idée d'opter pour des amplificateurs optiques en remplacement des répéteurs a été envisagée. Ces amplificateurs, qui renforcent directement le signal optique sans nécessité de conversion au domaine électrique, présentent une simplicité et un coût beaucoup plus abordable comparativement aux répéteurs [20]. . Il existe plusieurs variantes d'amplificateurs optiques : on distingue notamment les amplificateurs à semi-conducteurs, les amplificateurs Raman et les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (Amplificateur à Fibre Dopée Erbium, EDFA). Leur fonctionnement est basé sur la capacité d'amplification optique par émission stimulée de lumière. Nous allons nous concentrer uniquement sur l'amplificateur EDFA, qui joue un rôle crucial dans les connexions par fibre optique, particulièrement en tant qu'amplificateur de ligne [19]. .

### I.7 Système WDM :

Le trafic Internet et téléphonique oblige les opérateurs de réseau toujours à augmenter la capacité de transmission de leur réseau en fibre optique, Il faudra offrir des capacités de plusieurs Gigabits sur une seule fibre, en utilisant le multiplexeur en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing).

Le principe du WDM consiste à transmettre simultanément sur une même fibre plusieurs signaux, provenant de sources diverses, chacun étant véhiculé par une longueur d'onde différente. Les systèmes actuels autorisent 4, 8, 16,32 et même 64 canaux optiques différents. Par exemple chacune pouvant supporter 2,5Gbits/s, on obtient alors des débits de 10, 40,80 et même 160Gbits/s.

A partir de différentes sources émettant chacune à une longueur d'onde propre, de regrouper et d'injecter ces canaux dans une seule fibre sans qu'il y ait de mélange entre eux au cours de la propagation. A l'extrémité de la fibre, il suffit de séparer ces longueurs d'ondes et de les envoyer sur autant de détecteurs différents pour retrouver les signaux électriques initiaux. La capacité du système de transmission à WDM a augmenté parallèlement avec l'augmentation du débit par canal en multiplexage temporel (TDM) de 2,5Gbits/s à 10Gbits/s. .[25][26]



**Figure I.10 : Schéma de système WDM**

### **I.8 Conclusion :**

La fibre, en tant que moyen de transmission de l'information, présente des caractéristiques non négligeables qui lui ont permis de devenir un élément incontournable dans les réseaux de télécommunications. Dans ce chapitre, nous avons succinctement détaillé les diverses générations du développement de la fibre optique. Nous avons également examiné les différents types de fibre optique et les spécificités qui caractérisent chacune d'elles, en mettant l'accent sur leurs bénéfices. Par la suite, nous avons exposé les phénomènes qui affectent la transmission du signal lumineux lors de sa diffusion à travers la fibre optique (tels que la dispersion chromatique, l'atténuation, etc.).

**Chapitre II :**  
**Approches de**  
**Compensation de la**  
**Dispersion dans les**  
**Fibres Optiques**

### II .Introduction :

Le problème de la dispersion est devenu majeur à cause de l'accroissement du débit sur les lignes de transmission actuellement en service. La dispersion de vitesse de groupe générée dans la fibre affecte la transmission du signal à travers les réseaux de télécommunications optiques. Ce phénomène se manifeste par l'élargissement temporel des impulsions lumineuses composant le signal, entraînant des distorsions dans le signal émis à l'extrémité de la fibre. Il est donc essentiel de contrebalancer la dispersion accumulée durant son parcours. Afin de résoudre ces problèmes d'élargissement temporel, nous concentrerons nos efforts sur les méthodes de compensation de la dispersion chromatique. Deux méthodes de contrebalancement On envisagera deux options : la première fait appel à la fibre compensatrice (DCF), alors que la seconde utilise la fibre de Bragg (FBG). Ces deux éléments nous autoriseront à corriger la dispersion chromatique.

### II.2. Les différentes formes de dispersion optique :

#### II.2.1. Dispersion modale (ou intermodale) :

L'élargissement des impulsions dans les fibres optiques multimodes est principalement dû à la dispersion intermodale. Cette expansion est induite par les variations des délais de trajet des faisceaux lumineux. La diffusion intermodale ( $D_i$ ) correspond à l'extension temporelle maximale ( $\hat{o}$ ) d'une impulsion par segment de fibre.

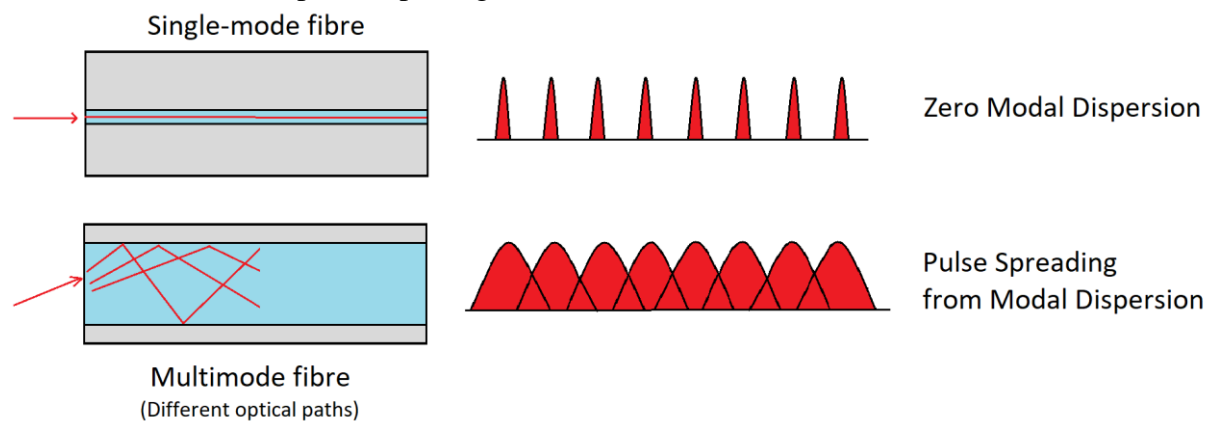


Figure I.1 : Dispersion modale.

#### II.2.2. Dispersion chromatique :

La dispersion chromatique, exprimée en  $\text{Ps}/(\text{nm.km})$ , définit l'expansion du signal due à sa largeur spectrale (deux longueurs d'onde distinctes ne se déplacent pas précisément à la même vitesse). Cette dispersion est fonction de la longueur d'onde prise en compte et découle de l'association de deux phénomènes : la dispersion inhérente au matériau et la dispersion liée au guide, associée à la configuration du profil d'indice. On peut donc la réduire en ajustant le profil [31]. Pour une fibre de silice, le minimum de dispersion se trouve aux alentours de 1 300-1 310 nm.

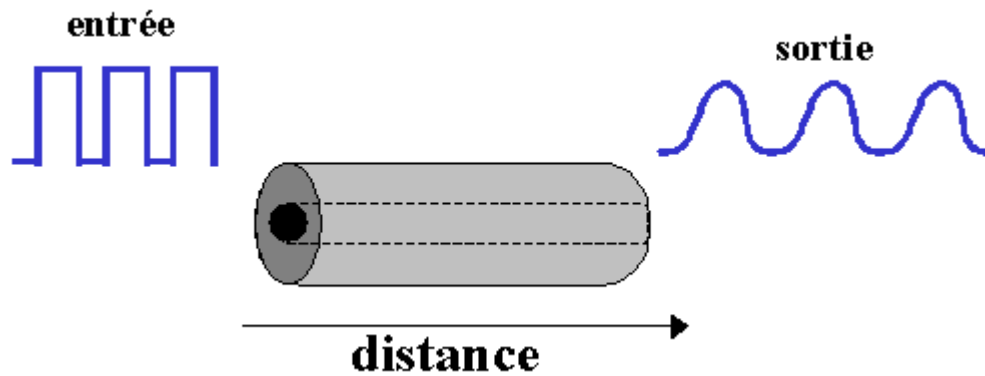


Figure I.2 : Dispersion chromatique.

### II.2.2.1. Dispersion d'origine matérielle :

La dispersion des matériaux est une dépendance de l'indice de réfraction des fibres sur la longueur d'onde ou la fréquence des signaux transmis. Ce type de dispersion résulte de l'interaction du signal avec la structure cristalline du verre à fibre optique. L'indice de réfraction du matériau verrier varie en fonction de la longueur d'onde du signal optique ; plus la longueur d'onde est longue, plus le signal se déplace rapidement. Les différentes longueurs d'onde se déplaçant à des vitesses différentes créent une variation d'impulsions optiques qui se propagent. Ceci, par conséquent, provoque la propagation de certaines impulsions dans le temps. À mesure que la longueur d'onde augmente et que la fréquence diminue, la dispersion du matériau diminue. Par conséquent, les signaux optiques dans la plage de 1550 nm subissent généralement moins de dispersion matérielle que les signaux optiques dans la plage de 1310 nm. [32]

### II.2.1.2. Dispersion liée au guide d'onde :

La dispersion du guide d'ondes est particulièrement importante pour les fibres monomodes ; causée par des indices de réfraction différents entre le cœur et la gaine d'une fibre optique. En raison de la nature du transport de la fibre optique, une petite quantité de lumière se déplace vers la gaine à partir du noyau, ce qui fait que les signaux se déplacent à des vitesses différentes. [33]

### II.2.3. Dispersion des modes de polarisation (PMD) :

Cette dispersion due à la biréfringence de la fibre, provoque une déformation des impulsions lumineuses par le fait que les deux principaux états de polarisation ont des constantes de propagation légèrement différentes. Pour pouvoir compenser avec précision la dispersion de polarisation de la fibre installée, il est nécessaire de l'avoir préalablement mesurée. [34]

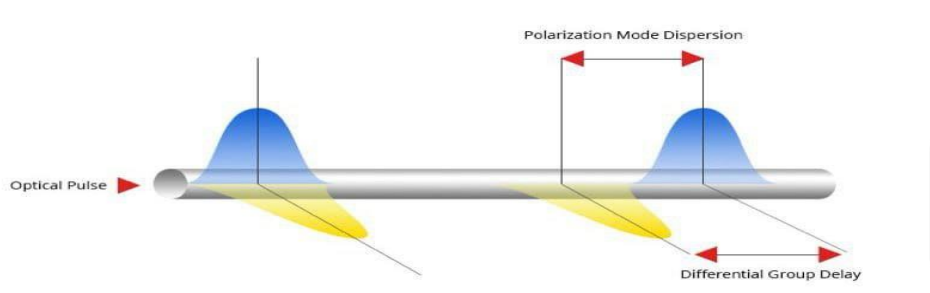


Figure I.3 : dispersion PMD

### II.3. Techniques de compensation de dispersion :

Il existe plusieurs méthodes pour pallier la dispersion. Chaque option présente ses propres points forts et faibles. Les méthodes fréquemment déployées dans des contextes pratiques sont examinées minutieusement.

#### II.3.1. Technique compensation de dispersion par des fibres compensatrice (DCF) :

Les fibres de compensation de dispersion sont des fibres à dispersion négative intégrées dans la connexion optique afin d'équilibrer la dispersion accumulée. Un module de compensation de dispersion est donc équilibré par une fibre de longueur fixée et ayant une dispersion identique en magnitude, mais inverse en signe à celle de la fibre de transmission. Il est donc indispensable de contrebalancer la dispersion accumulée au sein des fibres tout au long de la ligne de transmission en utilisant des fibres spécialement attribuées à cette tâche, telles que les fibres dites « à compensation de dispersion » ou DCF.

Au lieu de corriger la dispersion cumulée dans l'ensemble du système en une seule opération, il est essentiel de répartir cette correction de manière progressive.

Tout au long du système, l'objectif est de réduire au minimum les interactions entre la dispersion et les effets non linéaires le long de la ligne. C'est la notion de gestion de la dispersion. Il suffit de

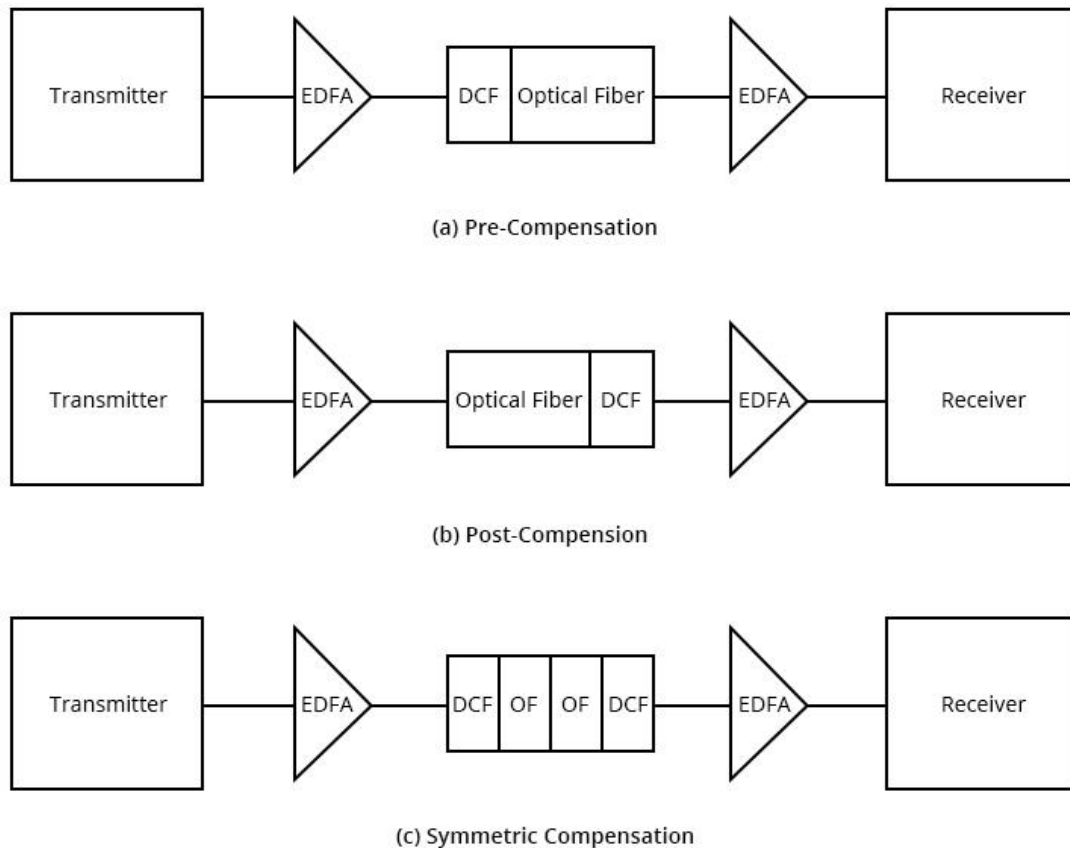
Il s'agit de sélectionner une fibre dont DDCF et LDCF compensent DSMF et LSMF sur le segment de fibre de la ligne de transmission, comme indiqué dans [35].

$$\text{DSMF. LSMF} = -\text{DDCF. LDCF}$$

On désigne respectivement DSMF, DDCF, LSMF et LDCF comme les paramètres de dispersion et les longueurs des fibres monomode et compensatrices de dispersion. Dans la méthode des fibres à compensation de dispersion, nous employons une fibre avec une forte dispersion négative et une fibre conventionnelle. L'utilisation d'une fibre de compensation de dispersion, qui présente une valeur de dispersion très élevée et de signe contraire à celle d'une fibre standard, permet de réduire voire d'annuler la quantité de lumière diffusée par une fibre normale.

Selon la position DCF, trois types de compensation de dispersion peuvent être envisagés : post DCF, pré DCF et symétrique (post et pré DCF).

- **Pré-compensation** : dans cette méthode de compensation, la fibre compensatrice à dispersion négative est positionnée avant la fibre monomode standard (SMF) à dispersion positive.
- **Poste-compensation** : Dans cette méthode de compensation, c'est le contraire qui est en vigueur : la fibre destinée à la compensation de dispersion négative est positionnée après la fibre monomode standard (SMF) à dispersion positive.
- **Pré Post-Compensation** : Dans cette méthode de compensation, la fibre à dispersion compensatrice qui contrebalance la dispersion négative est positionnée avant et après la fibre monomode standard (SMF) afin d'équilibrer la dispersion positive de la fibre conventionnelle.



**Figure I.4 : Technique compensation de dispersion**

### II.3.1.1 Avantages de DCF :

- Le principal atout de cette méthode est son large spectre, d'autant plus qu'il est envisageable de créer une DCF qui compense aussi la pente de dispersion.
- Leur intégration est aisée tout en garantissant une fiabilité élevée.
- Le DCF offre une compensation constante sur un vaste intervalle de longueurs d'onde.
- Le module DCF est censé présenter une faible perte d'insertion, une dispersion réduite en mode de polarisation et une non-linéarité optique modeste. Au-delà de ces spécificités, la fibre DCF est censée présenter un haut coefficient de dispersion chromatique afin de réduire les dimensions d'un module DCF.

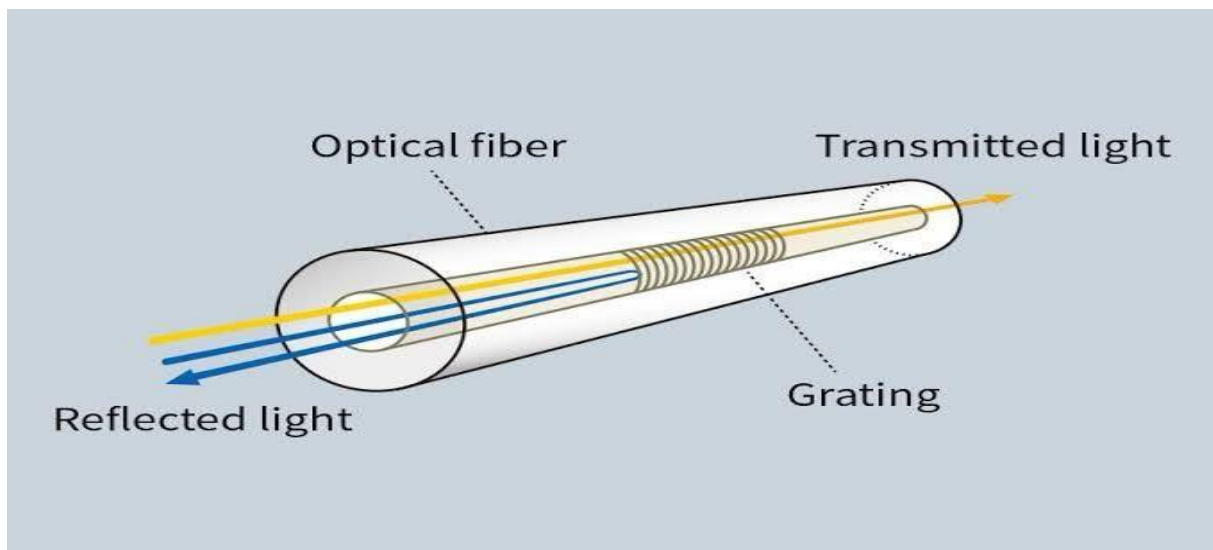
### II.3.2. Compensation par réseaux de Bragg inscrits dans les fibres :

#### II.3.2.1. Généralités sur les réseaux de Bragg :

Le nom vient de Sir William Henri Bragg qui découvre la loi de Bragg en 1915.

Un réseau de Bragg ou réflecteur de Bragg distribué est un réflecteur de grande qualité utilisé dans des guides d'ondes et une microstructure tout optique de quelques millimètres basés sur un seul concept fondamental de la physique qui est la dispersion par une structure périodique. La photo inscription des réseaux de Bragg est due principalement au phénomène de photosensibilité des fibres (fortes bandes d'absorption dans l'UV).

Elle peut donc agir comme un miroir sélectif en longueur d'onde, réfléchissant une longueur d'onde particulière. Il est utilisé comme un filtre optique en ligne pour bloquer certaines longueurs d'onde .[36]

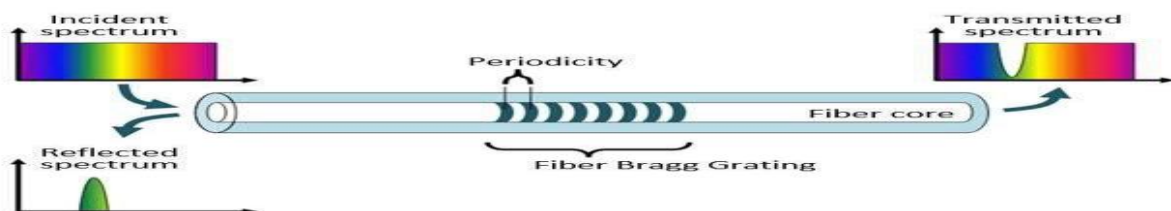


**Figure I.5 : réseaux de Bragg**

### ***II.3.2.2. Fonctionnement des fibres à réseau de Bragg (FBG) :***

Agira comme un miroir sélectif de la longueur d'onde très précise ; c'est un filtre 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 reflétée. À la frontière entre deux couches, il se produit une réflexion partielle des ondes.

La lumière restante poursuivra son chemin le long de la fibre jusqu'au prochain réseau de Bragg sans avoir perdu de son pouvoir. .[37]



**Figure I.6 : Fonctionnement des fibres à réseau de Bragg**

### ***II.3.2.3. Mécanisme de compensation à l'aide des FBG :***

Le réseau de Bragg sur fibre permet de réduire considérablement les effets de dispersion dans les systèmes de transmission de longue distance (150 km). L'utilisation de FBG pour la compensation de la dispersion peut être une approche prometteuse car ils sont des éléments optiques passifs compatibles avec les fibres, avec de faibles pertes d'insertion et des prix bas. Les FBG peuvent non seulement être utilisés comme filtres pour la compensation de la dispersion, mais aussi comme capteurs, stabilisateurs de longueur d'onde pour les lasers de pompage, dans les filtres d'insertion WDM à bande étroite, et comme un multiplexeur et un démultiplexeur dans les systèmes à multiplexage en longueurs d'onde (WDM) .

Trois techniques de compensation de dispersion sont également utilisées pour compenser la dispersion, en fonction de la position de FBG. .[38]

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

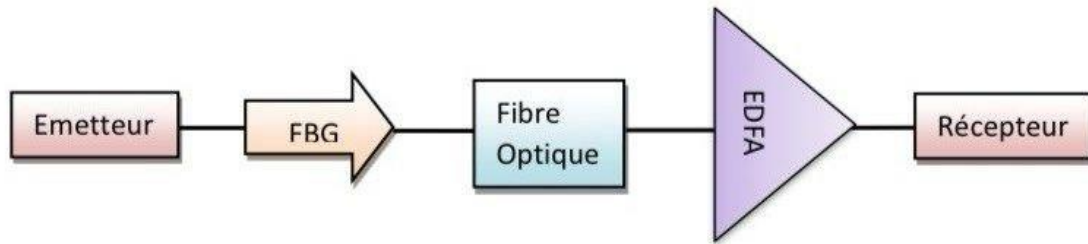


Figure I.7 : Pré-compensation FBG.

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

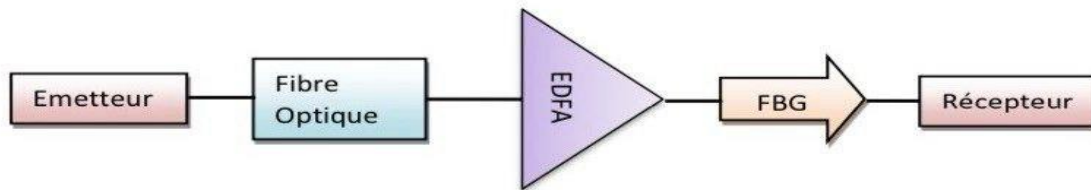


Figure I.8 : Poste-compensation FBG.

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

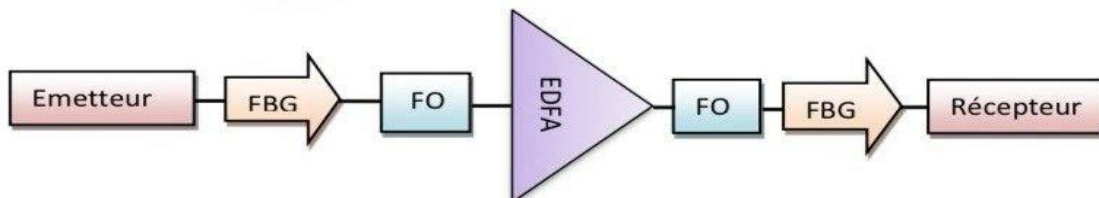


Figure I.9 : Pré poste-compensation FBG.

### II.3.2.4. Intérêts de l'intégration des FBG dans les réseaux optiques :

Les avantages de la fibre à réseau de Bragg comprennent : la facilité relative de fabrication de sa structure, sa petite taille et son coût modique, une bonne résistance aux radiations électromagnétiques, des pertes d'insertion minimisées, une large sélection spectrale et une compatibilité totale avec les diverses fibres monomodes utilisées en communication[39]. .

### II.4. Les type de réseaux de Bragg :

Il existe plusieurs types de réseau de Bragg que nous mentionnons :

### II.4.1-Réseau de Bragg uniforme :

Il s'agit de réseaux standards ayant une période fixe et des pas qui sont perpendiculaires à l'axe de la structure (la fibre ou le guide d'ondes). Pour un réseau de Bragg photo-inscrit dans le cœur d'une fibre optique, on observe une variation périodique le long de l'axe de la fibre. Cette modulation de l'indice produit un filtre en termes de longueur d'onde.

Des longueurs d'onde proches de la longueur d'onde de Bragg respectant la loi de Bragg :

$$\Lambda_b = 2n_{\text{eff}} \Lambda$$

Certaines sont partiellement réfléchies par le réseau, tandis que d'autres sont transmises. On utilise  $\Lambda$  pour désigner la période de modulation d'indice et  $n_{\text{eff}}$  pour l'indice de réfraction effectif du mode fondamental.

On peut donc affirmer que le réseau renvoie la lumière focalisée sur une longueur d'onde spécifique.

Le réseau est idéalement périodique tout au long de la structure, avec des points de commencement et d'achèvement clairement établis. En raison soit de sa conception intrinsèque, soit des méthodes de production employées, le réseau de Bragg s'écarte parfois de cette structure idéale.

### II.4.2- Réseau de Bragg « tilted » ou « blazed » :

Les réseaux « tilted » présentent des inclinaisons d'un certain degré par rapport à l'axe de la fibre. Cela facilite le couplage de la lumière tant en interne qu'en externe au cœur.

### II.4.3-Réseau de Bragg à pas variable ou « chirped » :

Il arrive fréquemment que le réseau de Bragg, soit en raison de la conception du même réseau, soit en raison des méthodes de fabrication employées, présente une légère déviation par rapport à cette structure idéale. Si le pas du réseau fluctue un peu partout dans la structure, on qualifie alors ce phénomène d'écart ou de « chirp ».

Dans les réseaux à chirp, la période s'accroît graduellement d'un pas à l'autre ; les longueurs d'onde étendues sont renvoyées au début du réseau tandis que les plus courtes le sont au bout du réseau ; ce qui permet de compenser la dispersion et de restaurer le signal initial.

### II.4.4-Réseau de Bragg apodisé :

Dans ces réseaux, l'intensité du coefficient de couplage  $c$  fluctue à travers la structure. .[40]

### II.4.5-Réseau de Bragg échantillonné :

Un réseau échantillonné est un réseau traditionnel dont on supprime régulièrement des sections.

Autrement dit, il s'agit d'une alternance entre des parties avec connexion réseau et des parties sans connexion réseau. .[41]

### II.4.6- Réseau de Bragg à saut de phase :

L'introduction d'un saut de phase dans un réseau de Bragg crée une résonance étroite à la longueur d'onde centrale, transformant le réseau en un filtre passe-bande extrêmement sélectif en termes de longueur d'onde. Il est vrai que l'ajout d'un décalage de phase de  $\lambda/4$  dans un réseau de Bragg équivaut à l'intégration d'une section non modulée d'une longueur de  $\lambda/2$  au centre du réseau.

Ainsi, la progression spatiale de la phase le long du réseau montre une discontinuité à l'emplacement du saut de phase et demeure constante en dehors de cet endroit. Cette discontinuité nous permet de comprendre le réseau à saut de phase comme étant composé de deux

Des sous-réseaux adjacents, S1 et S2, qui sont séparés par un saut de phase. La relation suivante définit la distance entre les deux sous-réseaux  $\delta L$  résultant d'un changement de phase  $\varphi$ . [42]

### II.5.Application des réseaux de Bragg en télécommunication :

Les réseaux de Bragg photo inscrits dans les fibres optiques se sont révélés essentiels pour équilibrer le gain des amplificateurs, stabiliser la longueur d'onde des pompes ou des sources, ainsi que pour les lasers à fibre. Parmi leurs principaux atouts, on note des pertes d'insertion minimales, une sensibilité extrêmement faible à la polarisation et une conception hautement flexible.

Ces atouts les rendent aussi des prétendants particulièrement attrayants pour les applications de filtrage complexe ou de compensation de dispersion chromatique fine.

#### II.5.1-Filtrage et multiplexage :

Les réseaux de Bragg uniformes à courtes périodes ont été initialement envisagés pour des applications liées au filtrage et au multiplexage, en tant que filtres sélectifs de longueur d'onde. Le coefficient de réflexion est proportionnel à la transformée de Fourier du profil longitudinal de l'indice de réfraction. Il est alors possible d'obtenir le spectre de filtrage en ajustant la période du réseau et le changement de l'indice de réfraction, afin d'obtenir des rejets élevés, des canaux voisins, des formes rectangulaires, multi-crête... etc.

Actuellement, grâce aux méthodes sophistiquées de rédaction des FBG, il est possible de créer presque toutes les formes spectrales souhaitées en manipulant la réponse de phase. Les réseaux de Bragg en fibre optique sont donc des prétendants idéaux pour les systèmes WDM complexes à venir. Mais avec des filtres économiques à ajuster à cette conception. Un exemple de filtre déjà prouvé qui renferme un espacement entre canaux de 25 ou 12,5 GHz et qui présente simultanément des formes rectangulaires et une dispersion nulle.

Le réseau de Bragg à périodes courtes renvoie la lumière à proximité de la longueur d'onde de Bragg tout en restant transparent pour les autres. Pour être déployés dans un réseau, le réseau de Bragg doit se combiner avec un autre élément possédant plusieurs entrées et sorties afin de tirer le signal pertinent. [40]

#### II.5.2-Compensation de la dispersion chromatique :

Une autre utilisation essentielle des RDB pour un transport d'information efficace est la correction de la dispersion chromatique. Effectivement, une dispersion chromatique est détectée lors de la transmission de la lumière sur de grandes distances, ce qui restreint le taux de transfert des informations dans la fibre optique. L'information se diffuse sous la forme d'un pulse gaussien qui couvre un large spectre de longueurs d'onde. Étant donné que ces dernières

ne se déplacent pas à la même vitesse dans la fibre optique, une distorsion du signal s'installe et une superposition des signaux peut être constatée si leur proximité spatiale est trop grande. En général, dans une fibre optique monomode employée pour les télécommunications, la dispersion chromatique est de  $17 / (\text{m})$  pour des longueurs d'onde avoisinant 1550 nm. Toutefois, on peut pallier cette dispersion en ayant un RDB dont la période s'accroît de manière linéaire au fil du réseau.

### II.5.3- Senseurs :

Une autre caractéristique des RDB permet l'obtention de capteurs de température, pression, vibrations, accélération, ainsi que de champs électriques et magnétiques. Il est même possible d'avoir des capteurs réagissant à des changements dans l'indice de réfraction de la fibre en raison de réactions chimiques.

Effectivement, l'onde réfléchie par un RDB est exactement associée à la période ainsi qu'à l'indice de réfraction de la fibre, de légères modifications de ces deux paramètres affecteront directement les caractéristiques optiques du RDB. Le dispositif de mesure pourrait impliquer l'émission d'un signal lumineux constant à travers un spectromètre et l'observation de la position du pic de Bragg. .[43]

### II.6. La théorie des modes couplés :

La méthode des modes couplés est une approche générale. Elle est mise en œuvre dans divers domaines (optiques, mécanique, quantique...) où des propagations d'onde se produisent dans un milieu donné.

Pour mettre en œuvre la théorie des modes couplés dans le contexte du réseau de Bragg, il est essentiel de supposer que la fibre est unidimensionnelle, sans perte (ce qui signifie une conservation de l'énergie) et que l'interaction de la lumière à la longueur d'onde de Bragg se produit uniquement entre le mode qui progresse dans la fibre « copropagatif » et le mode « contrapropagatif » qui évolue en direction opposée.

L'approche de la théorie des modes couplés est fréquemment utilisée pour expliquer les phénomènes physiques présents dans les réseaux de Bragg. On considère le réseau comme une légère perturbation qui génère un couplage entre les modes de propagation vers l'avant et les modes de retour se déplaçant à travers la structure.

La technique des modes couplés est une approche rigoureuse, elle prend en compte les paramètres physiques présents dans les réseaux de Bragg susceptibles d'avoir un impact sur le spectre. Cela inclut la valeur du coefficient de couplage entre les modes allé et retour, la longueur du réseau, la configuration du réseau, etc. Elle tient également compte des transferts d'énergie entre les divers modes de propagation. . [41][42]

### II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé le phénomène de dispersion et sa compensation, qui constitue un désavantage significatif dans les systèmes de télécommunications optiques. L'élargissement temporel des impulsions, causé par la dispersion chromatique lors de leur passage à travers la fibre optique, entraîne une superposition des impulsions à la fin de la fibre. Cela se traduit par une déformation du signal contenant l'information. La fin de ce chapitre a été dédiée à l'emploi des filtres compensateurs et des fibres à réseau de Bragg pour compenser la dispersion.

# **Chapitre III :**

## **Simulation et**

### **résultats.**

### III .1. Introduction :

La dispersion chromatique représente l'un des principaux obstacles à la transmission optique à haut débit sur de longues distances. Ce phénomène provoque l'élargissement temporel des impulsions, ce qui entraîne un recouvrement entre les symboles transmis, une augmentation du taux d'erreurs, et une dégradation globale des performances du système. Pour y remédier, plusieurs techniques de compensation ont été développées, notamment les fibres à dispersion compensée (DCF) et les réseaux de Bragg en fibre (FBG), qui permettent de corriger efficacement la dispersion accumulée.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'évaluation des performances d'un système de transmission optique à haut débit à l'aide de différentes techniques de compensation de dispersion. La première partie des simulations concerne une liaison monovoie à 10 Gb/s et 20 Gb/s, dans laquelle trois configurations de compensation à base de DCF sont étudiées : pré-compensation, post-compensation et compensation symétrique. Cette étape permet d'identifier l'approche la plus efficace pour limiter les effets de la dispersion sur un seul canal.

Dans un second temps, l'étude est étendue à un système WDM à 8 canaux avec des débits de 10 Gb/s et 20 Gb/s par canal. Deux architectures de compensation sont comparées : l'utilisation exclusive de la DCF et une solution hybride combinant DCF et FBG. L'ensemble des simulations est réalisé à l'aide du logiciel OPTISYSTEM, afin d'analyser l'impact de chaque technique sur la qualité du signal transmis, à travers des indicateurs tels que le facteur Q et le taux d'erreur binaire (BER).

### III.2. Présentation du logiciel OptiSystem :

OptiSystem est un environnement de simulation développé par la société canadienne Optiwave Systems Inc. destiné à la conception, la modélisation et l'analyse de systèmes de communication optique. Il offre une plateforme intuitive permettant de représenter graphiquement des schémas de transmission optique, allant des composants de base jusqu'aux architectures complexes.

Grâce à son interface conviviale et à ses outils numériques intégrés, le logiciel permet aux utilisateurs – chercheurs, ingénieurs ou étudiants – de visualiser et d'évaluer les performances de différentes configurations. L'approche de simulation se déroule généralement en deux étapes principales :

La création d'un schéma bloc représentant le système à étudier.

L'analyse des résultats obtenus à partir des simulations.

### III.2.1 Interface du logiciel OptiSystem :

L'interface principale d'OptiSystem est organisée en plusieurs sections qui facilitent la conception et la simulation de systèmes optiques. Les deux éléments essentiels de cette interface sont :

#### III.2.1.1 La bibliothèque de composants :

Cette bibliothèque constitue une base de données regroupant l'ensemble des blocs fonctionnels nécessaires à la construction de systèmes optiques. Elle comprend des modules tels que les sources optiques, les modulateurs, les amplificateurs, les filtres, les multiplexeurs/démultiplexeurs, ainsi que des éléments de détection et d'analyse. Ces composants peuvent être intégrés directement dans le schéma de simulation.

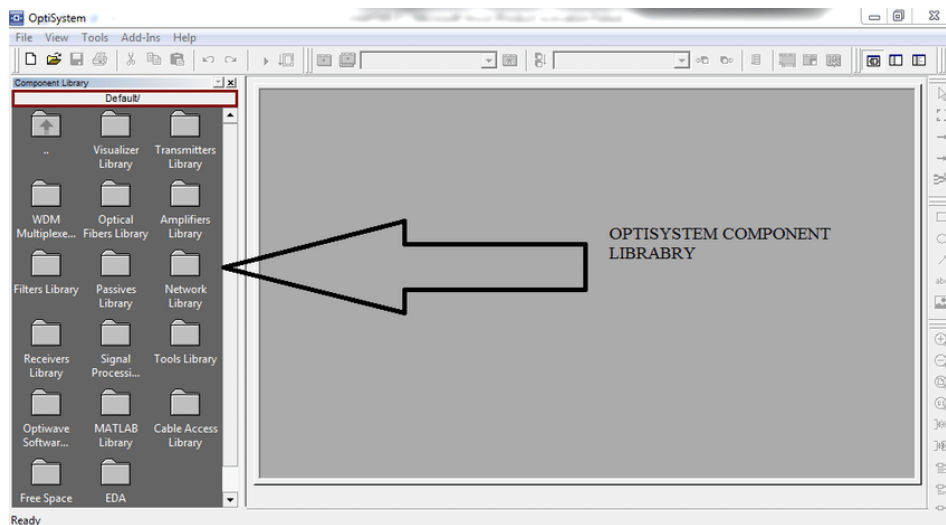


Figure III.1: La bibliothèque de logiciel Optisystem

#### III.2.1.2 L'éditeur de schéma (Layout Editor) :

L'éditeur de schéma est l'espace de travail où l'utilisateur assemble les différents blocs issus de la bibliothèque pour construire le système à simuler. Chaque composant peut être placé, connecté à d'autres, et configuré individuellement en ajustant ses paramètres selon les exigences de l'étude.

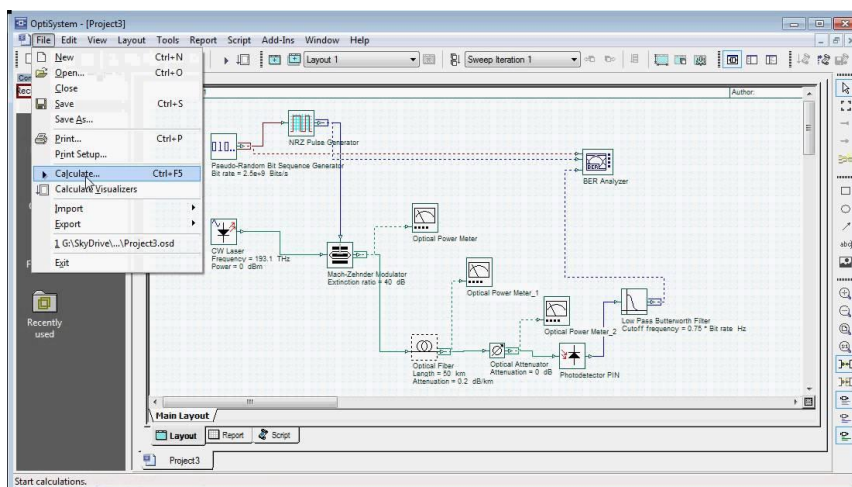


Figure III.2. Editeur de Layout.

### III.3 Paramètres de performance

L'évaluation des performances d'un système de transmission optique repose sur plusieurs indicateurs clés permettant de quantifier la qualité du signal transmis. Parmi les plus utilisés, on retrouve le taux d'erreurs binaires (BER), le facteur de qualité Q et le diagramme de l'œil.

#### III.3.1 Taux d'erreurs binaires (BER)

Le BER (Bit Error Rate) constitue une mesure directe de la fiabilité d'un système numérique. Il s'obtient en comparant la séquence de bits transmise à la séquence reçue et en comptant le nombre d'erreurs, c'est-à-dire le nombre de bits incorrectement reçus (par exemple, un « 0 » détecté à la place d'un « 1 » ou inversement). Le BER est défini comme le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total de bits transmis sur une durée donnée. Un BER faible indique une transmission plus fiable.

#### III.3.2 Facteur de qualité Q

Le facteur Q est un paramètre dérivé du diagramme de l'œil qui permet d'évaluer la clarté de la distinction entre les niveaux logiques « 0 » et « 1 » dans un signal numérique affecté par le bruit. Il se calcule à partir des moyennes ( $\mu_1$  pour le niveau logique « 1 » et  $\mu_0$  pour le niveau « 0 ») ainsi que des écarts-types ( $\sigma_1$  et  $\sigma_0$ ) de ces niveaux mesurés. La formule du facteur Q est donnée par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad 01$$

Un facteur Q élevé reflète une meilleure séparation entre les niveaux logiques et, par conséquent, une probabilité d'erreur plus faible.

#### III.3.3 Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est un outil graphique couramment utilisé pour analyser la qualité d'un signal numérique à haut débit. Il est obtenu en superposant plusieurs périodes du signal reçu sur un même intervalle de temps. L'axe vertical représente l'amplitude du signal, tandis que l'axe horizontal correspond au temps. La figure ainsi obtenue prend la forme d'un œil, dont l'ouverture est indicatrice de la marge temporelle et d'amplitude disponible pour une détection correcte du bit. Une large ouverture du diagramme de l'œil signifie une bonne qualité de transmission, tandis qu'un œil fermé suggère une détérioration du signal.

### III.4 Travail de simulation

#### III.4.1 Système optique étudié – Monocanal avec compensation DCF

Les trois figures ci-dessus (Fig. 3.3, Fig. 3.4 et Fig. 3.5) illustrent les architectures simulées dans le cadre de l'étude d'une liaison optique monocanal à 10 Gb/s intégrant différentes stratégies de compensation de dispersion à base de fibre DCF : pré-compensation, post-compensation et compensation symétrique.

Chaque système est composé d'un générateur de bits pseudo-aléatoires (BINRZ ou NRZ), d'un modulateur Mach-Zehnder piloté par un laser continu (CW Laser) dont la fréquence est fixée à 193.1 THz. Une étude paramétrique a été menée en faisant varier la puissance du laser

## Chapitre III : simulation et résultats

entre -20 dBm et 20 dBm, afin de déterminer la puissance d'émission optimale qui minimise le BER et maximise le facteur Q pour chaque architecture.

- Dans la configuration post-compensation (Figure 3.3), la SMF (150 km) est suivie d'une DCF (30 km).
- Dans la configuration pré-compensation (Figure 3.4), la DCF (30 km) est placée avant la SMF (150 km).
- Dans la configuration symétrique (Figure 3.5), la SMF (150 km) est encadrée par deux segments de DCF de 15 km chacun, offrant une compensation équilibrée en entrée et en sortie.

Chaque configuration intègre un contrôle en boucle (Loop Control) pour simuler un unique passage à travers la liaison. À la réception, un photodétecteur PIN suivi d'un filtre Bessel passe-bas permet de convertir et de filtrer le signal optique. Enfin, un analyseur BER évalue les performances du système en termes de taux d'erreurs binaires.

Cette structure permet de comparer l'impact de chaque stratégie de compensation sur la qualité du signal reçu, à travers des indicateurs comme le facteur Q, le BER et le diagramme de l'œil.

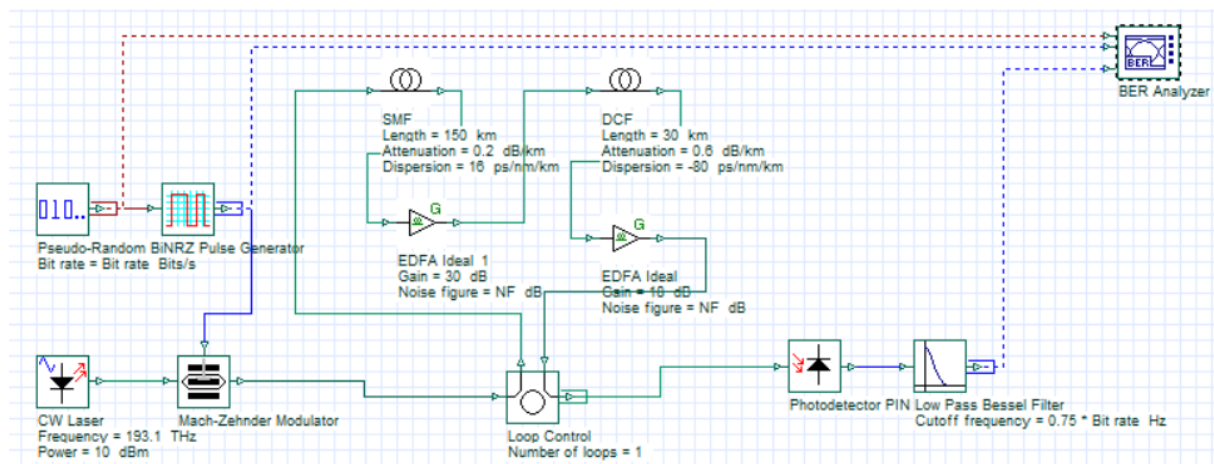


Figure.3.3 Schéma de simulation – Post-compensation de dispersion

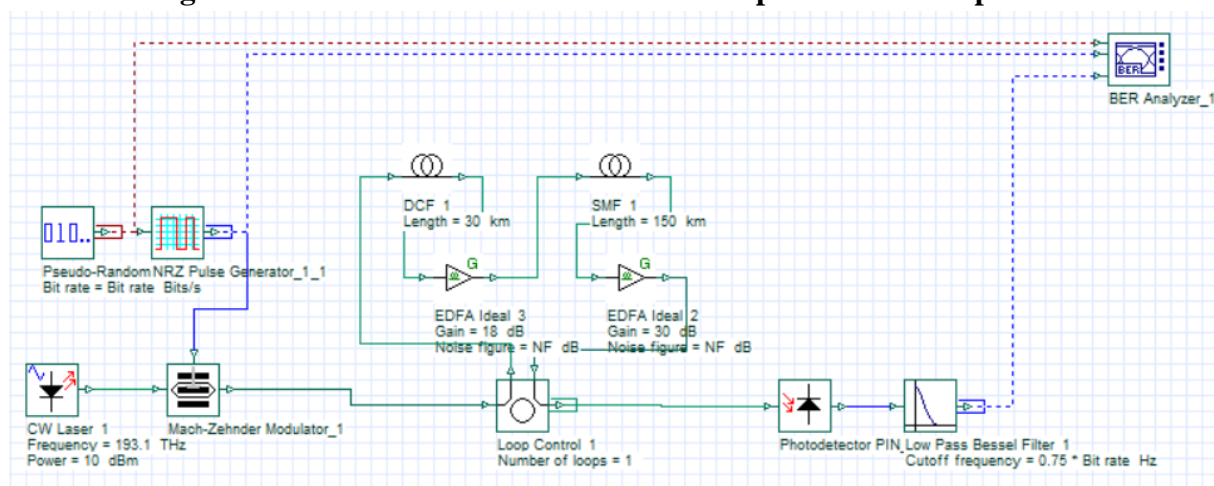


Figure.3.4 Schéma de simulation – Pré-compensation de dispersion

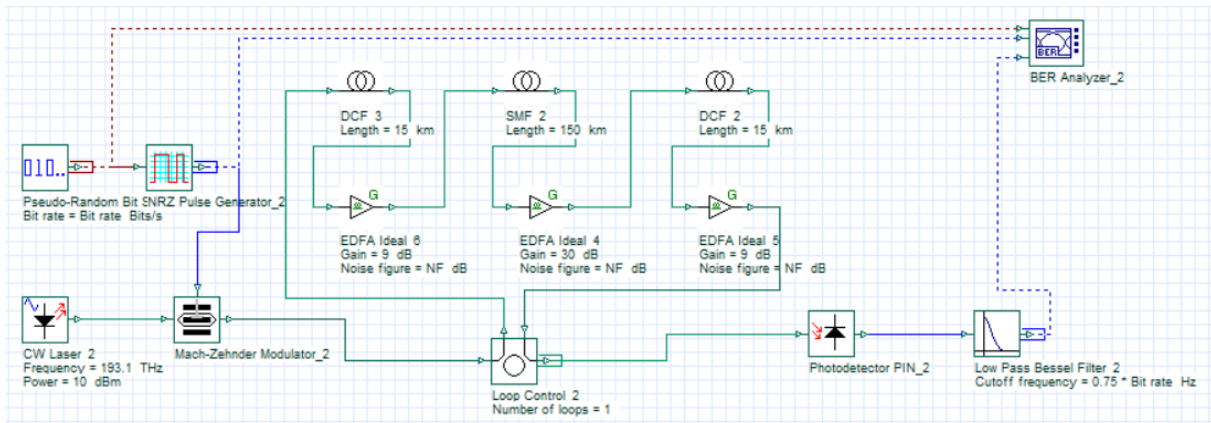


Figure.3.5 Schéma de simulation – Compensation de dispersion symétrique

### III.4.2 Système WDM à 8 canaux avec compensation hybride DCF–FBG

La figure 3.6 illustre l'architecture d'un système de transmission optique WDM (Wavelength Division Multiplexing) à 8 canaux, dans lequel chaque canal transmet un flux de données indépendant. Le système repose sur une technique de compensation hybride combinant fibre à dispersion compensée (DCF) et réseau de Bragg en fibre (FBG) pour corriger les effets de la dispersion chromatique accumulée au cours de la transmission sur fibre optique.

#### - Partie émission

Le système débute par un array de lasers CW (à onde continue), chacun correspondant à une longueur d'onde différente ( $\lambda_1$  à  $\lambda_8$ ). Chaque sortie laser alimente un modulateur Mach-Zehnder, contrôlé par un générateur de bits pseudo-aléatoires (PRBS) suivi d'un générateur d'impulsions NRZ. Ces blocs permettent de générer un signal numérique modulé pour chaque canal.

Les 8 signaux modulés sont ensuite multiplexés par un multiplexeur WDM  $8 \times 1$ , combinant les différentes longueurs d'onde dans une seule fibre de transmission.

#### - Partie transmission

La transmission s'effectue via une fibre optique standard (SMF) suivie d'une fibre DCF pour une première correction de dispersion. Ensuite, un réseau de Bragg en fibre (FBG) est intégré comme dispositif de compensation complémentaire, formant ainsi une structure hybride DCF–FBG. Un amplificateur optique (EDFA) est placé après le FBG pour compenser les pertes dues aux composants passifs.

#### - Partie réception

À la réception, le signal WDM est démultiplexé à l'aide d'un demux  $1 \times 8$ , séparant chaque canal optique pour une analyse individuelle. Chaque sortie est dirigée vers une chaîne de détection comportant un photodétecteur PIN, un filtre passe-bas (LPBF) et un analyseur BER, permettant d'évaluer les performances du système en termes de taux d'erreurs. Des analyseurs de spectre optique et un visualiseur temporel (OTDV) sont également utilisés pour observer respectivement le spectre en fréquence et l'évolution temporelle des signaux.

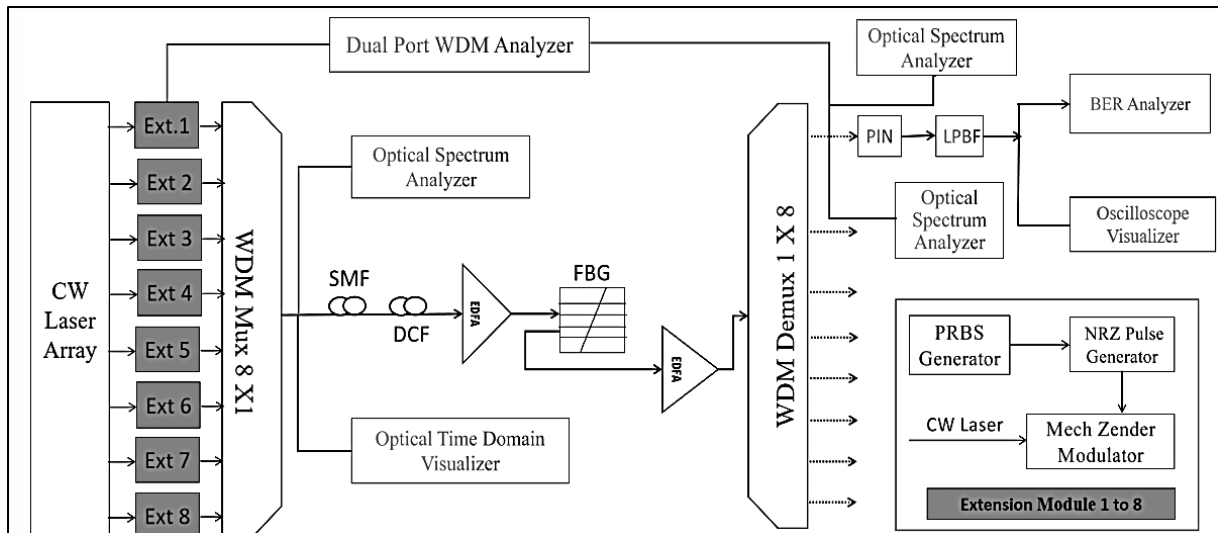


Figure.3.6 Schéma du système WDM à 8 canaux avec compensation hybride DCF-FBG

### III.5 Les résultat de simulation

#### III.5.1 Influence de la puissance sur le facteur Q

Les Figures 3.7 et 3.8 présentent l'évolution du facteur de qualité (Q) en fonction de la puissance optique d'entrée, variant de -10 dBm à +10 dBm, pour trois techniques de compensation de la dispersion : pré-compensation, post-compensation et compensation symétrique, dans une liaison optique monocanal.

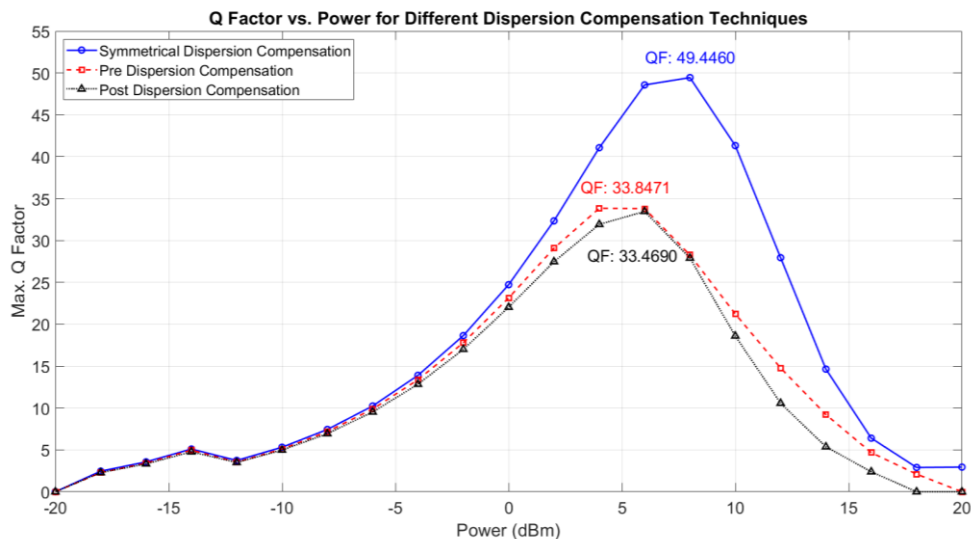
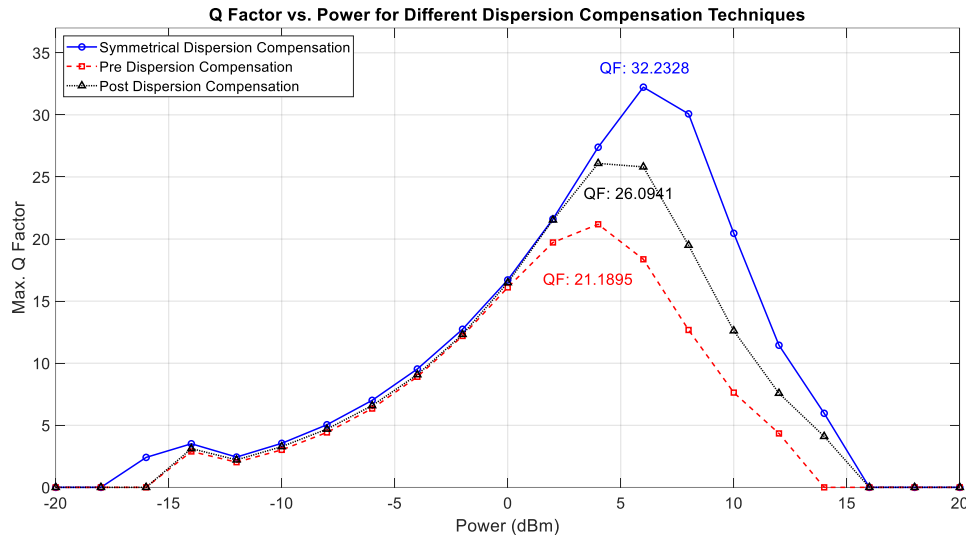


Figure.3.7 Facteur Q en fonction de la puissance du signal à 10 Gbps.



**Figure.3.8 Facteur Q en fonction de la puissance du signal à 20 Gbps.**

À 10 Gbps, les résultats montrent que le facteur Q augmente progressivement avec la puissance jusqu'à atteindre un maximum avant de chuter au-delà d'une certaine valeur de puissance, en raison de la montée des effets non linéaires dans la fibre.

- La compensation symétrique offre les meilleures performances, avec un Q maximal de 49.45 à environ 7 dBm.
- La pré-compensation atteint un Q max de 33.84 autour de 5 dBm.
- La post-compensation donne un Q max légèrement inférieur (33.47) à une puissance similaire.

Ces résultats montrent que la configuration symétrique permet une meilleure atténuation des effets de dispersion et une plus grande tolérance à la puissance.

À un débit plus élevé (20 Gbps), le même comportement global est observé, mais les valeurs du facteur Q sont réduites, en raison de la sensibilité accrue aux effets de dispersion et de non-linéarité à haute vitesse.

- La compensation symétrique reste la plus performante, avec un Q max de 32.23 à environ 6 dBm.
- La post-compensation atteint un Q max de 26.09, également autour de 5–6 dBm.
- La pré-compensation affiche les résultats les plus faibles, avec un Q max de seulement 21.19.

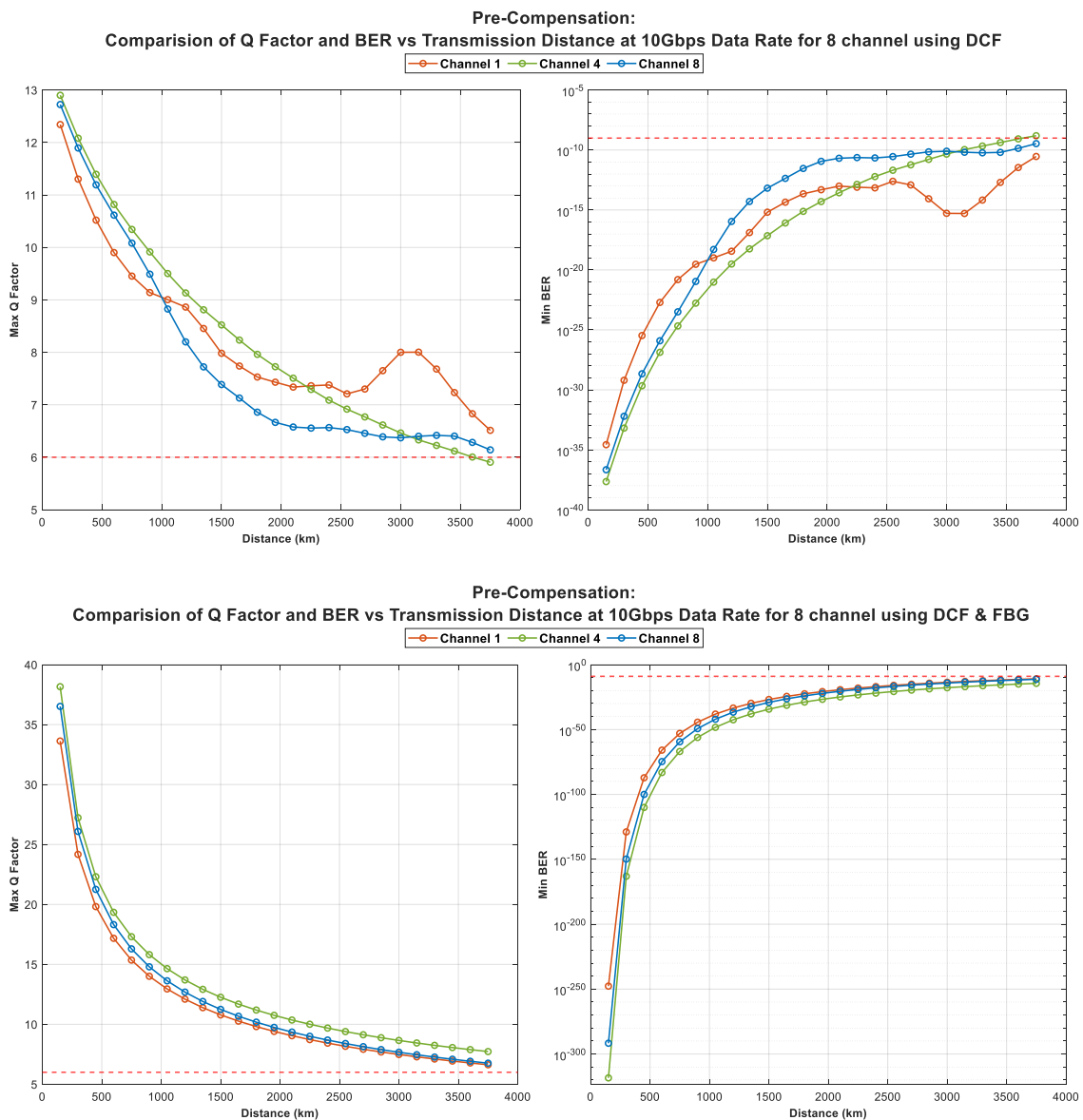
Ces résultats confirment que, quelle que soit la vitesse de transmission, la compensation symétrique est la stratégie la plus efficace pour optimiser la qualité du signal. Elle équilibre les effets dispersifs en amont et en aval du lien, tout en offrant une meilleure tolérance à la puissance optique d'entrée.

### III.5.2 Évaluation comparative de la qualité de transmission en fonction de la distance pour un système WDM à 8 canaux avec pré-compensation et compensation symétrique à 10 Gbps et 20 Gbps

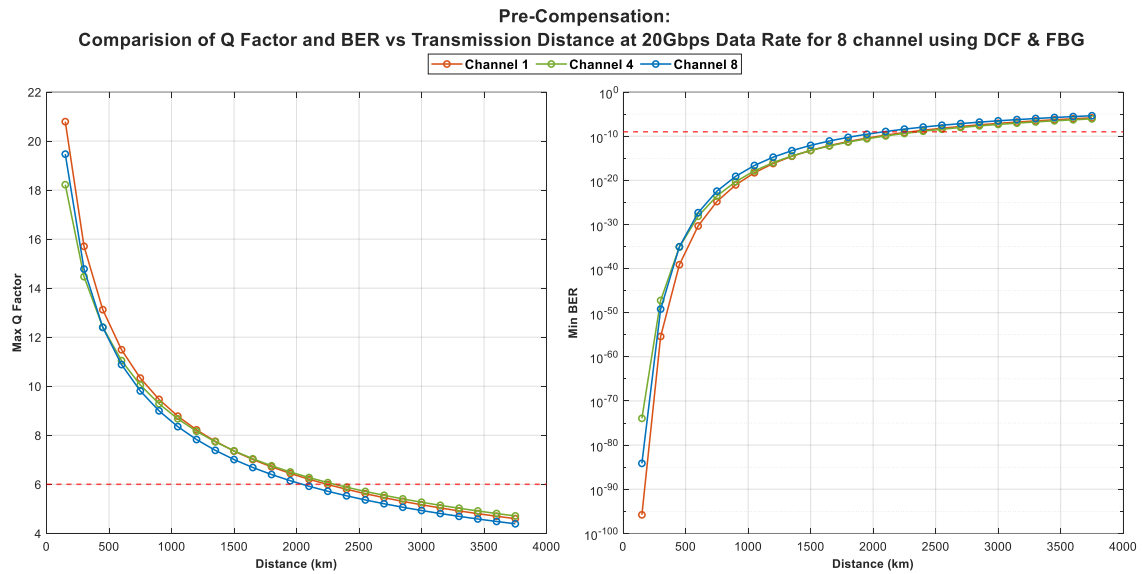
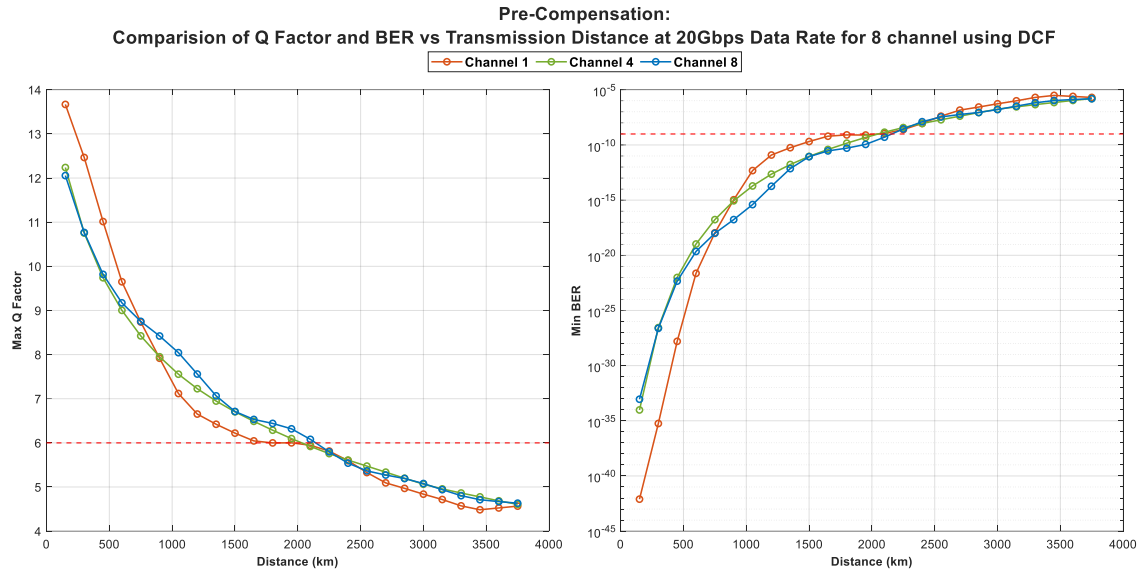
Les figures suivantes comparent les performances d'un système WDM à 8 canaux fonctionnant à des débits de 10 Gbps et 20 Gbps par canal, en fonction de la distance de transmission. Deux schémas de compensation sont étudiés : pré-compensation et compensation symétrique, et deux techniques de compensation de la dispersion sont comparées dans chaque cas :

- DCF seule (fibre à dispersion compensée)
- DCF combinée à un FBG (réseau de Bragg en fibre)

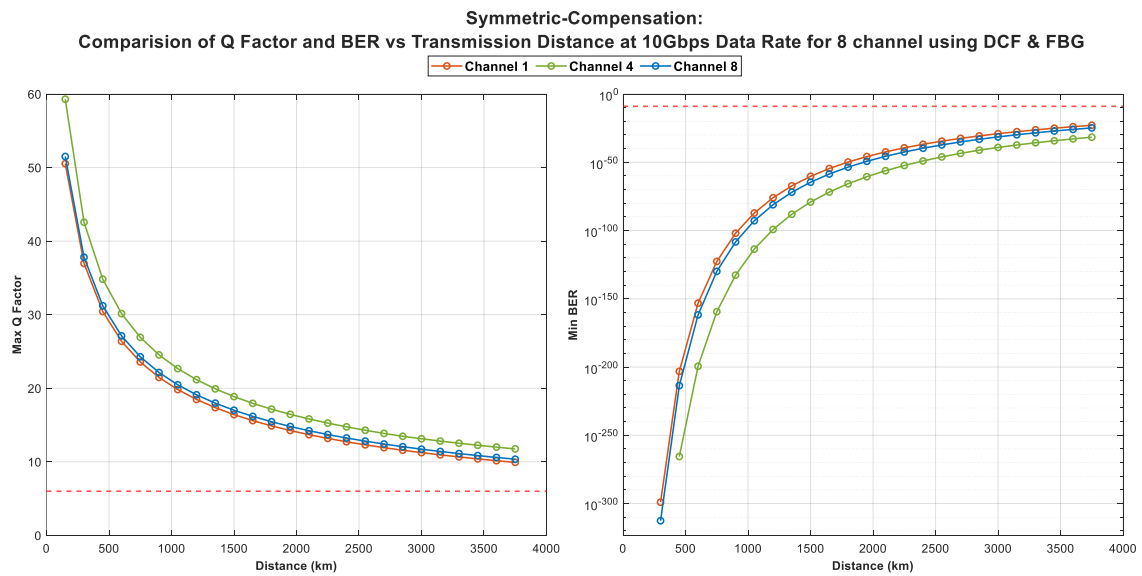
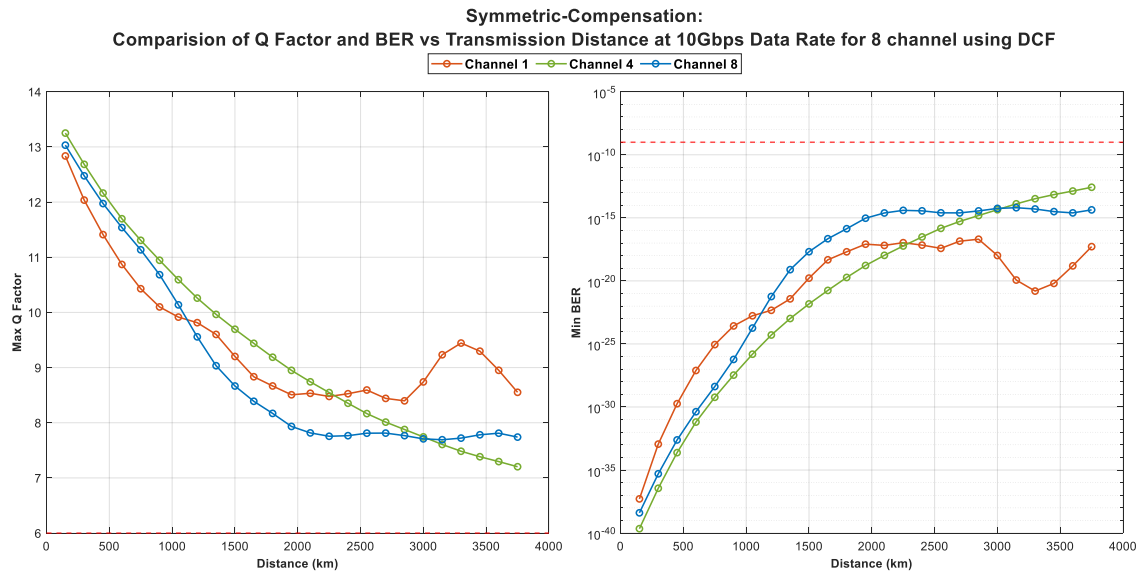
Les facteurs Q et les BER (Bit Error Rate) sont tracés pour trois canaux représentatifs : canaux 1, 4 et 8.



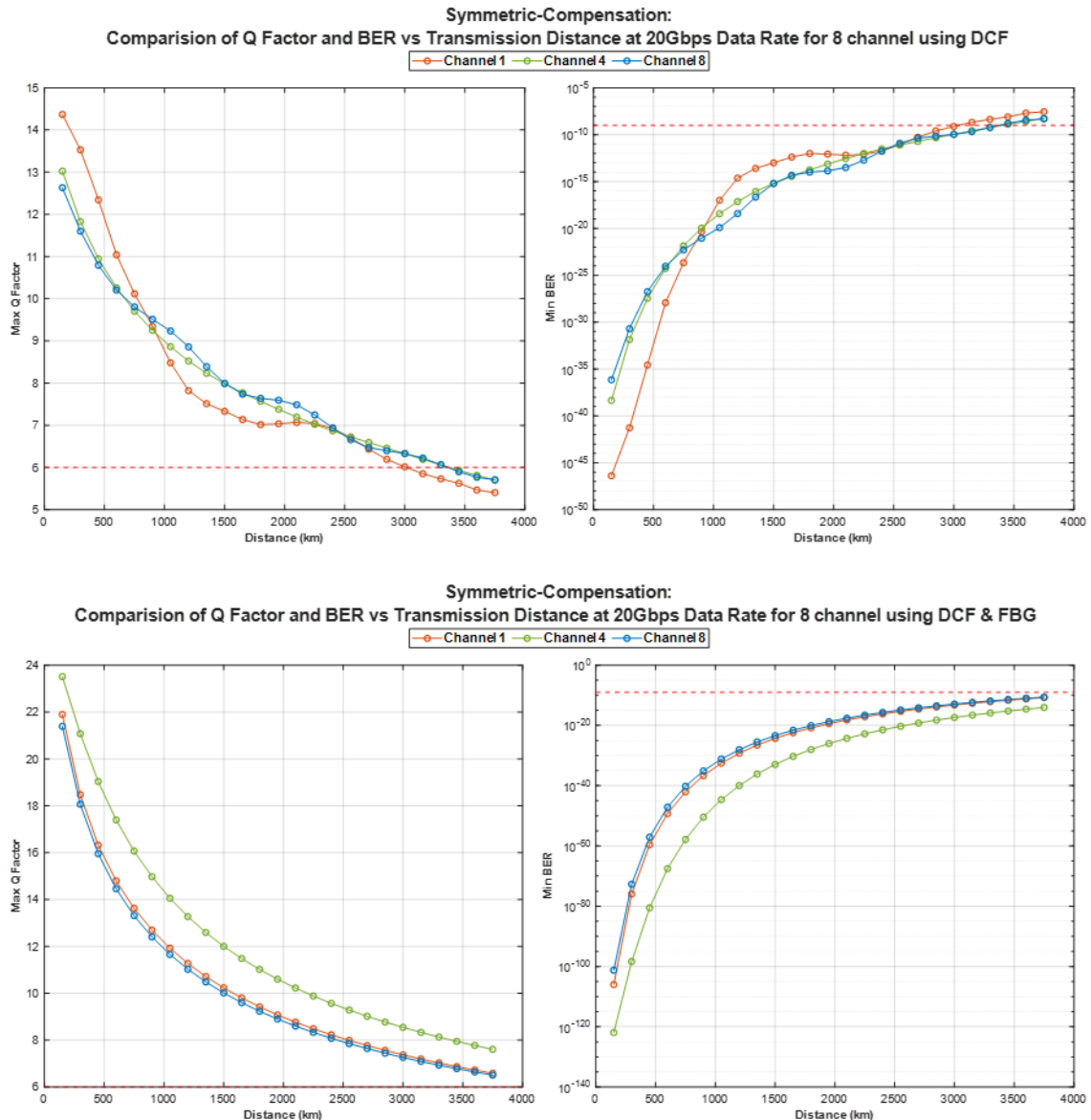
**Figure.3.9** Comparaison du facteur Q et du BER en fonction de la distance de transmission pour un système WDM à 8 canaux à 10 Gbps en pré-compensation : DCF seul vs DCF + FBG



**Figure.3.10** Comparaison du facteur Q et du BER en fonction de la distance de transmission pour un système WDM à 8 canaux à 20 Gbps en pré-compensation : DCF seul vs DCF + FBG



**Figure.3.11 Comparaison du facteur Q et du BER en fonction de la distance de transmission pour un système WDM à 8 canaux à 10 Gbps en compensation symétrique : DCF seul vs DCF + FBG**



**Figure.3.12 Comparaison du facteur Q et du BER en fonction de la distance de transmission pour un système WDM à 8 canaux à 20 Gbps en compensation symétrique : DCF seul vs DCF + FBG**

### **III.5.2.1 Pré-compensation à 10 Gbps : DCF vs DCF + FBG**

On observe que l'ajout du FBG améliore significativement la qualité de transmission. Le facteur Q atteint jusqu'à 38 avec DCF + FBG à courte distance, contre 13 environ avec DCF seul. La performance reste acceptable ( $Q > 6$  et  $BER < 10^{-9}$ ) jusqu'à environ 3500 km avec la solution hybride, contre environ 2700 km pour DCF seul.

### **III.5.2.2 Pré-compensation à 20 Gbps : DCF vs DCF + FBG**

À plus haut débit, les effets de dispersion s'intensifient. Le DCF seul atteint rapidement ses limites :  $Q < 6$  au-delà de 2000 km, et  $BER > 10^{-9}$ . En revanche, la solution DCF + FBG permet de maintenir le facteur  $Q > 6$  jusqu'à environ 2600 km, montrant sa robustesse face à l'augmentation du débit.

### **III.5.2.3 Compensation symétrique à 10 Gbps : DCF vs DCF + FBG**

La compensation symétrique permet d'équilibrer les effets de dispersion avant et après la transmission. Les résultats montrent une nette amélioration du facteur Q avec le système hybride : jusqu'à 58 à courte distance, et valeurs maintenues supérieures à 10 même à 4000 km. Le BER reste aussi largement en dessous du seuil critique jusqu'à cette distance.

### **III.5.2.4 Compensation symétrique à 20 Gbps : DCF vs DCF + FBG**

Dans le scénario le plus exigeant (20 Gbps + longue distance), la compensation hybride reste performante. Le facteur Q reste supérieur à 6 jusqu'à environ 2800 km, alors que le DCF seul devient critique vers 2200 km. Le BER montre également une dégradation plus rapide pour DCF seul, tandis que DCF + FBG permet une propagation fiable sur une plus grande distance.

### **III.5.3 Évolution du facteur Q maximal selon la distance, le débit binaire et le schéma de compensation de dispersion**

Le tableau 3.1 et les figures 3.13 et 3.14 présente une synthèse des valeurs maximales du facteur Q obtenues lors des simulations d'un système WDM à 8 canaux, en fonction de la distance de transmission, du débit binaire (10 Gbps ou 20 Gbps), et de la technique de compensation utilisée : DCF seule ou DCF combinée à un FBG, selon deux architectures – pré-compensation et compensation symétrique.

Les résultats montrent clairement que :

Pour toutes les distances, le système utilisant la compensation hybride DCF + FBG affiche des valeurs de Q supérieures à celles obtenues avec la DCF seule.

La configuration symétrique est systématiquement plus performante que la pré-compensation, avec une marge de Q nettement plus élevée, notamment à courte distance (jusqu'à 59 pour 10 Gbps à 150 km).

À 10 Gbps, la compensation hybride permet de maintenir un facteur  $Q > 6$  jusqu'à 3750 km, là où la DCF seule devient insuffisante ( $Q < 6$ ) dès 3600 km ou moins selon le cas.

À 20 Gbps, les effets de dispersion deviennent plus critiques. Néanmoins, le système DCF + FBG en mode symétrique parvient à maintenir un  $Q > 6$  jusqu'à environ 3600 km, contre 2100 à 2400 km pour le DCF seul.

Enfin, les performances se dégradent progressivement avec la distance, mais de façon beaucoup plus lente avec le schéma combiné, confirmant son efficacité dans les transmissions longue distance à haut débit.

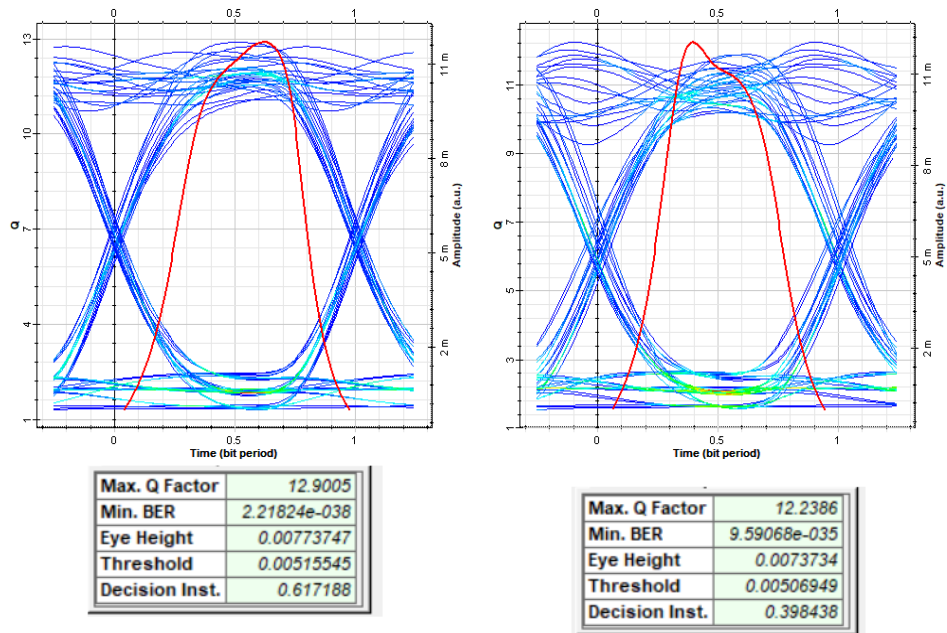
Tableau.III.1. Résumé des valeurs maximales du facteur Q pour les schémas de compensation de dispersion selon différentes distances de transmission et débits binaires.

Distance (km)	Max. Q-factor							
	Using DCF only				Using Combinational Schemes (DCF+FBG)			
	Pre		Symmetric		Pre		Symmetric	
	10 Gbps	20 Gbps	10 Gbps	20 Gbps	10 Gbps	20 Gbps	10 Gbps	20 Gbps
150	12.900	12.238	13.2504	13.022	38.158	18.219	59.295	23.507
300	12.082	10.754	12.684	11.827	27.228	14.467	42.564	21.076
450	11.394	9.740	12.163	10.944	22.306	12.408	34.828	19.035
600	10.819	9.002	11.697	10.258	19.3417	11.044	30.144	17.396
750	10.343	8.423	11.306	9.704	17.3072	10.052	26.923	16.068
900	9.914	7.950	10.945	9.249	15.8114	9.286	24.533	14.972
1050	9.502	7.555	10.592	8.862	14.6409	8.671	22.670	14.054
1200	9.131	7.226	10.259	8.523	13.7008	8.162	21.167	13.271
1350	8.811	6.947	9.964	8.232	12.9171	7.733	19.919	12.595
1500	8.523	6.703	9.694	7.986	12.2576	7.363	18.861	12.004
1650	8.233	6.487	9.439	7.769	11.6861	7.041	17.950	11.483
1800	7.961	6.286	9.187	7.567	11.1895	6.757	17.154	11.018
1950	7.726	6.095	8.949	7.377	10.7502	6.503	16.451	10.602
2100	7.507	***	8.741	7.194	10.3567	6.276	15.824	10.225
2250	7.293	***	8.546	7.024	10.0053	6.070	15.261	9.883

### Chapitre III : simulation et résultats

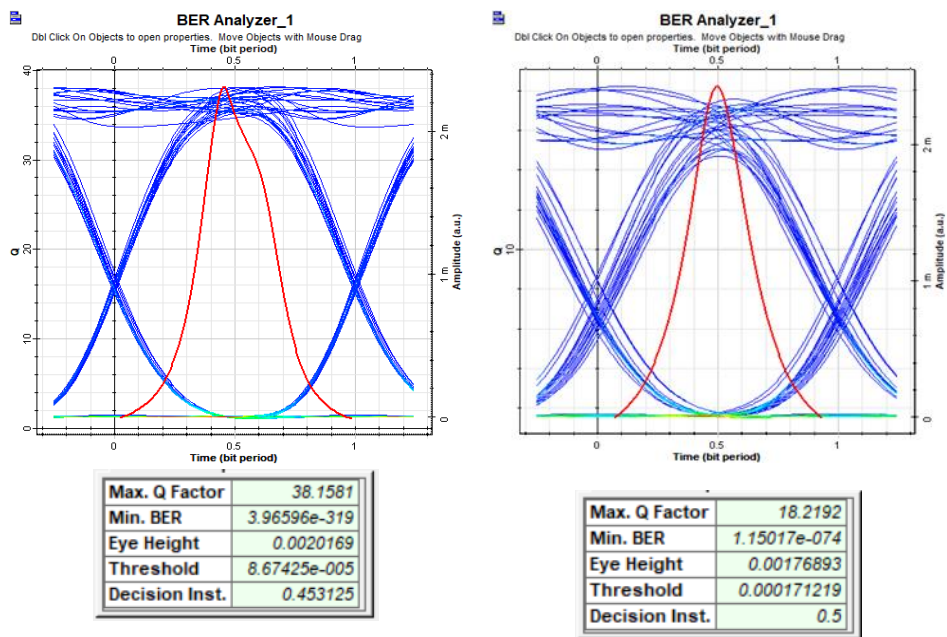
2400	7.088	***	8.353	6.867	9.6862 7	***	14.75 1	9.570
2550	6.917	***	8.165	6.725	9.3943 9	***	14.28 6	9.283
2700	6.768	***	8.011	6.592	9.1273 2	***	13.86 1	9.018
2850	6.614	***	7.877	6.459	8.8823 4	***	13.46 9	8.773
3000	6.462	***	7.743	6.326	8.6549 7	***	13.13 0	8.545
3150	6.330	***	7.605	6.193	8.4432	***	12.81 6	8.333
3300	6.225	***	7.483	6.059	8.2457	***	12.52 3	8.134
3450	6.118	***	7.383	***	8.0623 1	***	12.25 0	7.948
3600	6.004	***	7.296	***	7.8898 6	***	11.99 3	7.773
3750	***	***	7.202	***	7.7272 8	***	11.75 0	7.608

Max. Q-factor (\*\*\*) < 6)



(a)

(b)

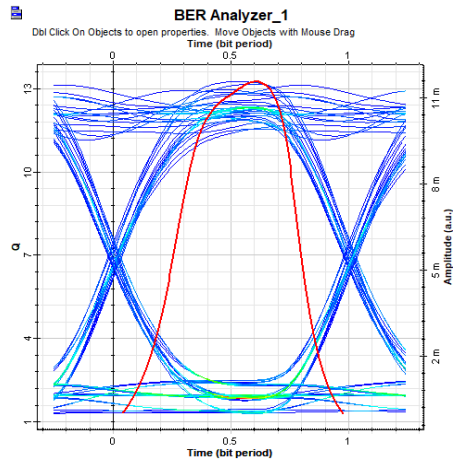


(c)

(d)

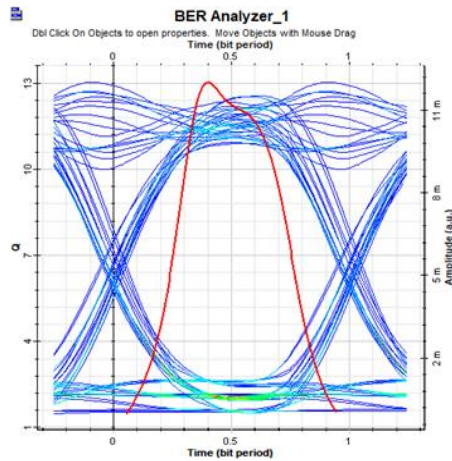
Figure.3.13 Diagrammes de l’œil à 150 km pour un système WDM à 8 canaux – Comparaison entre DCF seul et DCF + FBG à 10 Gbps et 20 Gbps (Pré-compensation)

(a) pour DCF seul à 10 Gbps (b) pour DCF seul à 20 Gbps (c) pour DCF + FBG à 10 Gbps (d) pour DCF + FBG à 20 Gbps



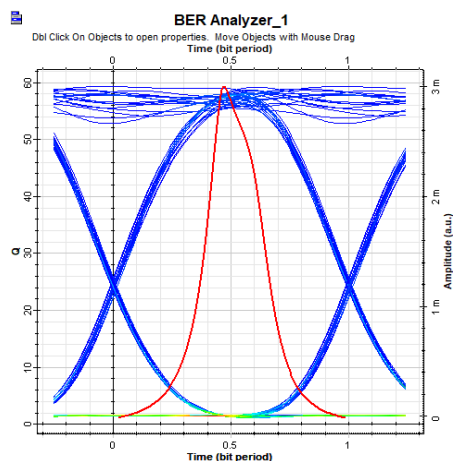
Max. Q Factor	13.2504
Min. BER	2.23227e-040
Eye Height	0.00779573
Threshold	0.00527637
Decision Inst.	0.601563

(a)



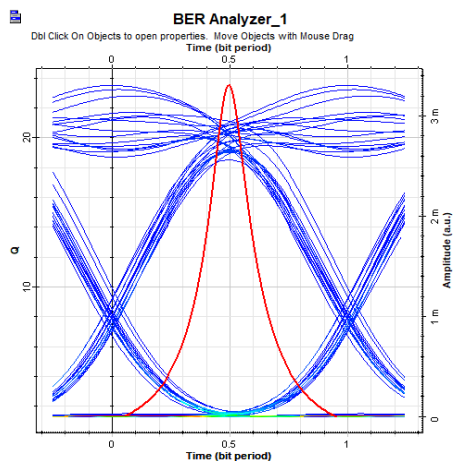
Max. Q Factor	13.0227
Min. BER	4.53241e-039
Eye Height	0.00753417
Threshold	0.00530108
Decision Inst.	0.398438

(b)



Max. Q Factor	59.2954
Min. BER	0
Eye Height	0.00273729
Threshold	0.000468757
Decision Inst.	0.414063

(c)



Max. Q Factor	23.5079
Min. BER	1.18709e-122
Eye Height	0.00239322
Threshold	0.000343869
Decision Inst.	0.492188

(d)

**Figure.3.14** Diagrammes de l'œil à 150 km pour un système WDM à 8 canaux –  
 Comparaison entre DCF seul et DCF + FBG à 10 Gbps et 20 Gbps (Sym-compensation)  
 (a) pour DCF seul à 10 Gbps (b) pour DCF seul à 20 Gbps (c) pour DCF + FBG à 10 Gbps  
 (d) pour DCF + FBG à 20 Gbps

### III.5.4 Comparaison des techniques de compensation de dispersion entre différentes études

Le tableau 3.2 présente une comparaison entre plusieurs études réalisées entre 2010 et 2025, portant sur différentes techniques de compensation de dispersion utilisées dans les systèmes optiques longue distance. Les méthodes incluent l'utilisation de DCF classique, DCF optimisé, DCF segmenté, et des approches hybrides combinant DCF et FBG.

Les résultats montrent que la méthode proposée dans cette étude, basée sur une compensation symétrique combinant DCF et FBG, permet d'atteindre une distance de transmission allant jusqu'à 3750 km avec un débit de 80 et 160 Gbps. Elle offre également un facteur Q très élevé de 11,75 à 80 Gbps, ce qui représente une amélioration significative par rapport aux études précédentes. Ces résultats confirment l'efficacité de la méthode DCF–FBG symétrique pour les transmissions à très haut débit sur de longues distances. [44]

**Tableau 3.2 Comparaison des techniques de compensation utilisées dans diverses études**

Étude	Débit (Gbps)	Distance maximale (km)	Facteur Q max	Technique de compensation
Agrawal (2010)	40	400	6.5	DCF
Keiser (2011)	40	600	7.2	DCF
Yadav et al. (2015)	40	600	7.8	DCF optimisé
Sharma et al. (2017)	40	800	8.0	DCF – FBG hybride
Bobruk (2021)	40	960	7.9	DCF segmenté
H. A. Benghenia et al. (2024)	20	1200	6.184	Division optimisée SMF / DCF
	40	1080	6.094	
	80	840	7.698	
Cette étude (2025)	<b>80</b>	<b>3750</b>	<b>11.750</b>	<b>DCF – FBG symétrique</b>
	<b>160</b>	<b>3750</b>	<b>7.608</b>	<b>DCF + FBG symétrique</b>

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les performances d'un système de transmission optique WDM à 8 canaux en présence de dispersion chromatique, en évaluant différentes stratégies de compensation par le biais de simulations sous OptiSystem. Les résultats obtenus ont permis de comparer la compensation par DCF seule et la compensation hybride combinant DCF et FBG, selon deux architectures : la pré-compensation et la compensation symétrique.

Les simulations ont clairement montré que la configuration symétrique offre de meilleures performances que la pré-compensation, en assurant une meilleure stabilité du facteur de qualité (Q) et un taux d'erreurs binaires (BER) plus faible, en particulier sur longue distance. Ce gain est encore plus marqué lorsqu'on utilise une compensation hybride DCF + FBG. En effet, à 10 Gbps, la configuration symétrique avec DCF + FBG permet de maintenir un facteur Q supérieur à 6 jusqu'à 3750 km, contre 3000 km pour la symétrique avec DCF seul, et une portée encore plus réduite pour la pré-compensation. À 20 Gbps, bien que les effets de

dispersion soient amplifiés, la symétrique hybride conserve des performances élevées jusqu'à 2800–3000 km, là où les autres configurations chutent nettement en qualité.

Les diagrammes de l'œil ont confirmé visuellement cette supériorité, avec des ouvertures plus nettes, une meilleure séparation des niveaux logiques et une réduction significative de l'interférence inter symbole.

Ainsi, les résultats démontrent que la compensation symétrique hybride DCF + FBG constitue la solution la plus efficace pour les systèmes WDM à haut débit, permettant à la fois d'améliorer la qualité du signal, d'augmenter la distance de transmission et de garantir la fiabilité du système optique face aux effets limitants de la dispersion.

# **Conclusion générale**

À travers ce mémoire, nous avons étudié l'impact de la dispersion chromatique sur les systèmes de transmission optique à haut débit, ainsi que les différentes techniques permettant de compenser ses effets afin d'assurer une communication fiable et performante sur de longues distances. Dans un premier temps, nous avons présenté les fondements des fibres optiques, leurs caractéristiques physiques, leurs limitations, ainsi que les composants essentiels d'un système optique moderne. Ensuite, nous avons analysé en détail les phénomènes de dispersion — modale, chromatique et des modes de polarisation — et nous avons exposé les approches de compensation les plus courantes, notamment les fibres à dispersion compensée (DCF) et les réseaux de Bragg en fibre (FBG).

La phase de simulation, réalisée à l'aide du logiciel OptiSystem, nous a permis de comparer plusieurs architectures de compensation (pré, post et symétrique), dans des systèmes monocanal et WDM à des débits de 10 et 20 Gbps. Les résultats obtenus ont clairement montré que l'approche symétrique hybride DCF-FBG permet d'obtenir des performances nettement supérieures en termes de facteur Q et de taux d'erreur binaire (BER), même à très haut débit et sur de longues distances.

Ainsi, l'intégration conjointe des DCF et des FBG s'impose comme une solution efficace et économiquement viable pour relever les défis posés par la dispersion dans les réseaux optiques de nouvelle génération. Ce travail ouvre également des perspectives pour l'optimisation des transmissions dans des environnements encore plus complexes, en intégrant par exemple des techniques avancées de traitement numérique du signal ou des modulations de plus haut ordre.

En perspective, il serait intéressant d'approfondir cette étude en testant des débits encore plus élevés (40 Gbps, 100 Gbps), des formats de modulation avancés (16-QAM, DP-QPSK), ou encore en intégrant des techniques de traitement numérique du signal (DSP) en réception. De plus, une évaluation expérimentale sur banc optique permettrait de valider les résultats obtenus en simulation et de mieux appréhender les contraintes pratiques. Ces prolongements ouvrent la voie à la conception de systèmes optiques plus robustes, plus rapides et mieux adaptés aux exigences croissantes des réseaux de télécommunications de nouvelle génération.

# **Références bibliographique**

## Bibliographie :

- [1] : Pierre LECOY Hermès, "Télécom Sur Fibres Optiques" (2ème édition revue et augmentée), 1 vol. 280 p, Paris, 1997.
- [2] : LAISSAOUI FATIMA, BENDJEDDOU ZOHRA, mémoire de Master, "L'influence des paramètres optogéométriques d'une FBG chirpée sur la réponse spectrale de réflectivité destinée pour la compensation de la dispersion chromatique", Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2019.
- [3] : Bertrand KIBLER, Thèse de Doctorat, "Propagation Non-linéaire D'impulsions Ultracourtes Dans Les Fibres Optiques De Nouvelle Génération", Université de Franche-Comté, École doctorale sciences physiques pour l'Ingénieur et microtechniques, le 28 juin 2007.
- [4] : Jean-Charles BEUGNOT, Thèse de Doctorat, "La Diffusion Brillouin Dans Les Fibres Optiques Microstructures", Université de Franche-Comté, école doctorale Sciences physiques pour l'ingénieur et microtechniques, le 12 Décembre 2007.
- [5] : Sébastien Le Floch, Thèse de Doctorat, "Etude De La Diffusion De Brillouin Stimulée Dans La Fibre Monomode Standard Application Aux Capteur De Température Et De Pression", Université de Bretagne occidentale, Le 3 Décembre 2001.
- [6] Rosdiah Hamzah, site <https://prezi.com/ldxfr-bg1uys/22-know-and-understand-analog-modulation/>, date de création : 20-04-2019
- [7] Alexis Owens , site : <https://slideplayer.com/slide/4888429/> , date de creation 2015/06/02, date de consultation : 2019-02-18
- [8] Harry J. R. Dutton, "Understanding Optical Communications", First Edition, September 1998.
- [9] John M. Senior, " Optical fiber communications: Principles and practice", third edition, Prentice Hall, 2009.
- [10] <http://millysu.e-monsite.com/blog/>
- [11] <http://informafun.free.fr/avantages.htm>
- [12] <http://www.syscope.net/elec/B33.pdf>
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] CARENCO.A., « Composants actifs, Systèmes optiques », Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse, Ecole d'été, Juillet 1991.
- [16] Rachid RADOUANI, « Dérive dans les modulateurs électro-optiques Mach-Zehnder. Analyse physique et résolution », Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, Juin 2006.
- [17] 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.
- [18] Jérôme LAURENT, « communication optique à très haut débit », examen probatoire CNAM Paris, décembre 2004.

- [19] 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.
- [20] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communications Systems", Third Edition, 2002 by John Wiley & Sons, Inc.
- [21] «Analyse Numérique Et Etude Spectrale De Réseaux De Bragg A Fibre: Compensation De La Dispersion Chromatique Dans Une Ligne De Transmission Optique», Projet de fin cycle Université de Blida 1,2019.
- [22] Wikipedia ,wiki /Fibre\_ optique.
- [23] Pierre LECOY, « Communications sur fibres optiques », 4ème Edition, 2015, Lavoisier, paris.
- [24] Harry J. R. Dutton, "Understanding Optical Communications", First Edition, September 1998.
- [25] Routage optique dans les liaisons a haut débit WDM-DWDM  
Projet de fin d'étude (IGE:23) ITO. 2003
- [26] Etude d'une liaison par fibre optique à haut débit << technologie WDM>>  
Projet de fin d'étude (ING ELN) FGEI UMMTO 2010
- [27] Transmission par fibre optique Sidi Ali Mebarek Zerouk SIEMENS1989.  
OPU 2001.
- [28] <http://igm.univ-mlv.fr/>
- [29] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics," Third Edition, Academic Press, Inc, 1995.
- [30] 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.
- [31] Kitayama K, Shibata N and Masaharu O 1985 Two-core optical fibers: experiment J. Opt.Soc. Am. A 1 85-89.
- [32] <https://www.precisionot.com/fr/probleme-de-dispersion-des-reseaux-a-grande-vitesse-longue-distance/>
- [33] <https://www.fs.com/fr/blog/types-of-optical-fiber-dispersion-and-compensation-strategies-6913.html>
- [34] «Etude pratique sur la maintenance des fibres optiques monomodes» , Soutenu publiquement le 21 juin 2018, Par : Mr BELDJILALI Khaled Mr KHELLADI Mohammed,Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen .
- [35] Julien MAURY, « Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, novembre 2003.
- [36] Mlle CHETTOUH Saida, «Etude des propriétés spectrales des réseaux de Bragg pour codeurs/décodeurs optiques», THESE Doctorat EN SCIENCE, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2018.
- [37] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn. Formation of bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method. Opt. Lett., 14:823.825, 1989.

- [38] I. FSAIFES, « Encodage et décodage temporel "Tout-optique" à réseau de Bragg pour l'accès multiple », Ecole supérieur de télécommunication, paris, 2007.
- [39] Johannes Skaar , « Synthesis and characterization of fiber Bragg gratings », these de doctorat, Institut of optical research Sweden, 2001.
- [40] «Analyse Numérique Et Etude Spectrale De Réseaux De Bragg A Fibre: Compensation De La Dispersion Chromatique Dans Une Ligne De Transmission Optique», Projet de fin cycle Université de Blida 1,2019.
- [41] Melle: GOURMALA Ouassila, «Etude et Réalisation des Réseaux de Bragg pour des Applications Photoniques», Thèse de Magister, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID–TLEMCEM,2006.
- [42] Mlle CHETTOUH Saida, «Etude des propriétés spectrales des réseaux de Bragg pour codeurs/décodeurs optiques», THESE Doctorat EN SCIENCE, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2018.
- [43] Pierre Vinchon, «Optimisation de Masques de Phase pour l'exposition de Réseaux de Bragg à périodes variables sur fibre optique», Université du Québec,2015.
- [44] H. A. Benghenia, H. A. Bakir/ Journal of Applied Research and Technology ,2024

## **Résumé**

Ce mémoire traite de l'amélioration des performances des transmissions optiques à haut débit en présence de dispersion chromatique. Il commence par une présentation détaillée des fibres optiques, de leurs types, propriétés physiques, limitations et applications, ainsi que des composants clés d'un système de transmission optique (émetteurs, modulateurs, amplificateurs, récepteurs, WDM). Le second chapitre est consacré aux phénomènes de dispersion et aux techniques de compensation, notamment les fibres à dispersion compensée (DCF) et les réseaux de Bragg en fibre (FBG), en insistant sur les différents types et mécanismes de fonctionnement des FBG. Le troisième chapitre s'appuie sur des simulations réalisées avec OptiSystem, en comparant plusieurs schémas de compensation (pré, post, symétrique) dans des configurations monocanal et WDM. Les résultats montrent que la compensation symétrique DCF–FBG offre les meilleures performances (facteur Q élevé, faible BER) même à 20 Gbps sur de longues distances. L'étude met en évidence l'intérêt d'une approche hybride pour surmonter les limites des techniques classiques. Elle ouvre la voie à des transmissions optiques plus fiables, performantes et adaptées aux réseaux du futur.

## **Abstract**

This thesis focuses on improving the performance of high-speed optical transmissions in the presence of chromatic dispersion. It begins with a detailed presentation of optical fibers, their types, physical properties, limitations, and applications, as well as the key components of an optical transmission system (transmitters, modulators, amplifiers, receivers, WDM). The second chapter addresses dispersion phenomena and compensation techniques, particularly dispersion compensating fibers (DCF) and fiber Bragg gratings (FBG), emphasizing the different types and working mechanisms of FBGs. The third chapter is based on simulations using OptiSystem, comparing various compensation schemes (pre, post, symmetric) in both single-channel and WDM configurations. Results show that symmetric DCF–FBG compensation offers the best performance (high Q-factor, low BER) even at 20 Gbps over long distances. The study highlights the value of a hybrid approach to overcome the limitations of traditional techniques, paving the way for more reliable and efficient optical transmissions for future networks.

## ملخص

يركز هذا البحث على تحسين أداء أنظمة الإرسال البصري عالية السرعة في وجود التشننت اللوني. يبدأ بعرض مفصل للألياف البصرية، وأنواعها، وخصائصها الفيزيائية، وقيودها، وتطبيقاتها، بالإضافة إلى المكونات الأساسية لنظام الإرسال البصري (المرسلات، المُعدِّلات، المُضخِّمات، المستقبلات، وتقنية WDM). يتناول الفصل الثاني ظواهر التشننت، وتقنيات التعويض، خاصة الألياف المعوضة للتشننت (DCF) وشبكات براج الليفية (FBG)، مع التركيز على أنواعها وآلية عملها. يعتمد الفصل الثالث على محاكاة باستخدام برنامج OptiSystem، ويقارن بين عدة طرق تعويض (قبل، بعد، و متمائلة) في أنظمة أحادية القناة و WDM. أظهرت النتائج أن التعويض المتمثل باستخدام DCF-FBG يوفر أفضل أداء (عامل جودة مرتفع، ومعدل خطأ منخفض)، حتى بسرعة 20 جيجابت/ثانية ولمسافات طويلة. تُبرز الدراسة أهمية النهج الهجين في تجاوز قيود التقنيات التقليدية، مما يمهد الطريق لإرسال بصري أكثر موثوقية وكفاءة في شبكات المستقبل.