

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGL**

**Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la  
Communication**

**Département d'Électronique et de Télécommunication**



**Mémoire**

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : sciences et technologies

Filière : télécommunications

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Présenté par :

**HALASSA Manal**

**KHEMISSAT Yasmine**

**Thème**

**Etude Des Réseaux De Bragg Dans Les  
Fibres Optiques**

**le jury :**

|                    |     |                      |                         |
|--------------------|-----|----------------------|-------------------------|
| M. Mekimah Boualem | MAA | Président            | Université UKMO Ouargla |
| M. Otmani Hamza    | MCB | Encadreur/rapporteur | Université UKMO Ouargla |
| M. Chenina Hachemi | MAA | Examineur            | Université UKMO Ouargla |

**Année Universitaire : 2019 /2020**

# *Remerciements*

Tout d'abord, nous remercions le bon Dieu pour ce qui nous a inspiré la bénédiction de la patience, de la conscience et de la détermination pendant nos années d'étude et l'achèvement de cette mémoire. Louange à Dieu beaucoup. Nous tenons de remercier notre professeur, l'honorable Dr OTMANI HAMZA, pour lequel il a tous nos éloges et notre appréciation pour les informations et les directives qu'il nous a fournies, et les documents qu'il nous a fournis ont contribué à l'enrichissement de notre sujet d'étude, sans oublier ses conseils. Que Dieu vous protège.

Nous remercions aussi sincèrement les membres du jury pour le temps consacré à la lecture et à l'évaluation de notre travail, aussi les chercheurs qui ont coopéré avec nous du début à la fin de notre étude.

Enfin, nous remercions nos parents, familles et amis pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de nos études.

sans oublier ceux qui ont nous aidé financièrement et moralement.

## **Résumé**

Ce travail s'articule autour de trois axes principaux, qui sont généralités sur la fibre optique, l'étude des réseaux de Bragg dans une fibre optique, et enfin la simulation des réseaux de Bragg dans la fibre optique.

En premier lieu, nous fournissons des informations sur la fibre optique et la diffusion de la lumière en elle, montrant les différences entre ses types et ce qui distingue chaque type, en plus de mentionner les points les plus importants qui distinguent la fibre optique.

Après ça, nous concentrons sur l'étude des réseaux de Bragg (fabrication, fonctionnement, types et application); un réseau de Bragg est une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre optique, pour que vous entendiez le traitement des longueurs d'onde, et c'est pour restituer le signal déformé dû à la dispersion, surtout sur de longues distances.

Enfin, nous passons à la simulation et à la création de réseaux de Bragg dans la fibre optique à l'aide du programme optisystem, afin d'étudier la différence entre les différents types des réseaux de Bragg pour évaluer les performances du réseau en termes de qualité de transmission (Q factor), les valeurs de BER (Bit Error Rate), et leur effet sur la fibre optique, et ceci afin d'obtenir une bonne transmission entre l'émetteur et le récepteur.

### **Mots clés:**

Fibre optique, réseaux de Bragg, dispersion, Q factor.

### **Abstract**

This work revolves around three main axes, which are general on the optical fiber, the study of the Bragg gratings in an optical fiber, and finally the simulation of the Bragg gratings in optical fiber.

In the first place, we have provided information about optical fiber and the diffusion of light in it, showing the differences between its types and what distinguishes each type, besides mentioning the most important points that distinguish optical fiber.

After that, we are focused on the study of Bragg gratings (fabrication, operation, types and application); a Bragg grating is a periodic modulation of the refractive index of the core of an optical fiber, so that you can hear the processing of wavelengths, and it is to restore the distorted signal due to dispersion, especially over long distances.

Finally, we moved on to the simulation and creation of Bragg gratings in optical fiber using the optisystem program, in order to study the difference between the different types of Bragg gratings to assess the performance of the grating in terms transmission quality (Q

factor), the BER (Bit Error Rate) values and their effect on the optical fiber, in order to obtain good transmission between the transmitter and the receiver.

**Keywords:**

optical fiber, Bragg gratings, dispersion, Q factor.

**تلخيص**

هذا العمل يتمحور حول ثلاثة محاور رئيسية ألا وهي معلومات على الليف البصري، ودراسة شبكات Bragg في الليف البصري وأخيرا محاكاة شبكات براغ في الليف البصري. في المقام الأول، قدمنا بعض المعلومات حول الألياف البصرية وانتشار الضوء فيها مع إظهار الاختلافات الموجودة بين أنواعها وما يميز كل نوع، بالإضافة إلى ذكر أهم النقاط التي تميز الألياف الضوئية. بعد ذلك، صببنا اهتمامنا بدراسة حواجز شبكات Bragg (التصنيع والتشغيل والأنواع والتطبيق)؛ شبكة Bragg هو تعديل دوري لمؤشر الانكسار في قلب الألياف البصرية، بحيث تسمح بمعالجة الأطوال الموجية وهذا من أجل ترميم الإشارة المشوهة بسبب التشتت، بالأخص في المسافات الطويلة. أخيراً، تدرجنا إلى محاكاة حواجز شبكات Bragg في الألياف البصرية باستخدام برنامج optisystem، بغرض دراسة الفرق بين الأنواع المختلفة لشبكات Bragg لتقييم أداء الشبكة من حيث جودة الإرسال (عامل Q) وقيم معدل (BER(Bit Error Rate)) وتأثيرها في الألياف البصرية، من أجل الحصول على إرسال جيد بين المرسل والمستقبل.

**الكلمات المفتاحية:**

الليف البصري، شبكات Bragg، تشتت، عامل Q.

## **Liste des acronymes**

**MMF:** Multi Mode Fibre

**SMF:** Single Mode Fibre

**PMD:** Polarisation Mode Dispersion

**IEM:** Interférences Electromagnétiques

**FBG:** Fibre Bragg Grating

**UV :** Ultra Violite

**ArF\*:** Fluorure d'argon

**RDB:** Réseau de Bragg

**FO :**Fibre Optique

**WDM:**Wavelength Division Multiplexing

**MAN:**Metropolitan Area Network

**LAN:**Local Area Network

**CATV:**Community Antenna Television

**TDM :**Time Division Multiplexing

**FTTx:**Fibre To The X

**SONET:** Synchronous Optical Network

**SDH:**Synchronous Digital Hierarchy

**BER:** Bit Error Rate

**Facteur Q:** Le Facteur de Qualité

**TEB :**Taux D'erreur Binaire

**DCF:** Fibre à Dispersion Compensée

**RZ:**Retour à Zéro

**NRZ:**Non-Retour à Zéro

**PRBS :** Pseudo-Random Binary Sequence

**MZI:**Mach-Zehnder

**OSA:**Analyseur de Spectre Optique

## Liste des figures

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figure I.1</b> : Structure générale d'une fibre optique.....   | <b>3</b>  |
| <b>Figure I.2</b> : organigramme de classification.....   | <b>4</b>  |
| <b>Figure I.3</b> : fibre a saut d'indice.....  | <b>5</b>  |
| <b>Figure I.4</b> : fibre a gradient d'indice.....  | <b>5</b>  |
| <b>Figure I.5</b> : fibre monomode.....   | <b>6</b>  |
| <b>Figure I.6</b> : Ouverture numérique d'une fibre optique .....   | <b>7</b>  |
| <b>Figure I.7</b> : Dispersion chromatique.....   | <b>8</b>  |
| <b>Figure I.8</b> : Dispersion modale.....  | <b>9</b>  |
| <b>Figure I.9</b> : Dispersion polarisation.....  | <b>9</b>  |
| <b>Figure II.1</b> : Exposition d'une fibre dans un champ d'interférences de 2 faisceaux UV..   | <b>12</b> |
| <b>Figure II.2</b> :spectrale de longueur d'onde du réseau.....   | <b>13</b> |
| <b>Figure II.3</b> : Représentation schématique d'un réseau de Bragg inscrit au cœur d'une fibre optique.....   | <b>13</b> |
| <b>Figure II.4</b> : Les réponses spectrales d'un réseau de Bragg.....  | <b>14</b> |
| <b>Figure II.5</b> :(A gauche en haut : spectre de la lumière injectée ; en haut à droite : spectre de la lumière transmise ; au centre : FBG avec symbolisées la transmission la réflexion de la lumière ; en bas à gauche : spectre de la lumière reflétée) ..... | <b>15</b> |
| <b>FigureII. 6</b> : Principe d'exposition de RDB par méthode holographique.....  | <b>17</b> |
| <b>Figure II.7</b> :Inscription d'un réseau par la méthode du masque de phase .....   | <b>18</b> |
| <b>Figure II.8</b> : Schéma du montage de photo inscription par miroir de Lloyd.....  | <b>19</b> |
| <b>Figure II.9</b> :Montage point-à-point pour l'inscription d'un réseau dans la fibre optique.....   | <b>19</b> |
| <b>Figure II.10</b> : réseau de Bragg uniforme.....   | <b>20</b> |
| <b>Figure II.11</b> : réseau de Bragg « tilted ».....   | <b>21</b> |
| <b>Figure II.12</b> : réseau de Bragg « chirped » .....   | <b>21</b> |
| <b>Figure II.13</b> : Réseau anodisé intègre dans un guide d'onde.....  | <b>21</b> |
| <b>Figure II.14</b> : Réseau de Bragg échantillonné.....  | <b>22</b> |
| <b>Figure II.15</b> : Principe de l'échantillonnage.....  | <b>22</b> |
| <b>Figure II.16</b> : (a) Filtre passe bande fabriqué par un réseau de Bragg associé avec un circulateur ; (b) un multiplexeur OADM fabrique avec association d'un réseau de Bragg et deux circulateurs.....  | <b>23</b> |

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Figure II.17 :</b> (a) multiplexeur OADM basé sur un interféromètre Mach-Zehnder : deux réseau de Bragg identiques sont photo imprimés à la longueur $\lambda_2$ sur les deux bras de l'interferometre.(b) multiplexeur OADM basé sur un coupleur 0% : le réseau de Bragg est photo imprimé à la longueur $\lambda_2$ dans la région du couplage, la fonction d'insertion de $\lambda_2$ est représenté ..... | <b>24</b>      |
| <b>Figure II.18:</b> Principe de la compensation de la dispersion chromatique.....   | <b>25</b>      |
| <b>Figure II.19:</b> Effet du stress sur la réflexion d'un RDB.....  | <b>26</b>      |
| <b>figure II.20:</b> Mesure de température autour d'un A380.....   | <b>26</b>      |
| <b>figure III.1:</b> Interface utilisateur graphique (GUI) d'OptiSystem.....   | <b>30</b>      |
| <b>figure III.2:</b> Boîte de dialogue « Calculs» d' OptiSystem.....   | <b>31</b>      |
| <b>figure III.3:</b> Menu Fichier.....   | <b>31</b>      |
| <b>figure III.4:</b> Affichage des résultats de la simulation.....   | <b>31</b>      |
| <b>figure III.5:</b> diagramme de l'œil.....   | <b>34</b>      |
| <b>figure III.6:</b> Système de communication à base de fibre optique [18].....  | <b>34</b>      |
| <b>figure III.7 :</b> : Compression et étirement des impulsions au moyen des réseaux de Bragg... <b>35</b>   |                |
| <b>figure III.8:</b> (a) format NRZ (b) format RZ.....   | <b>37</b>      |
| <b>figure III.9:</b> Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder [27].....  | <b>37</b>      |
| <b>figure III.10:</b> Schéma du réseau Bragg à pas variable à fibre optique (fibre Bragg grating). <b>39</b>   |                |
| <b>figure III.11 :</b> (a, b et c) propriétés du réseau Bragg à pas variable à fibre optique (fibre Bragg grating).....  | <b>[39-40]</b> |
| <b>figure III.12:</b> Diagramme de l'œil du réseau de Bragg à pas variable avec la variation de la distance. ....  | <b>[41-42]</b> |
| <b>figure III.13:</b> réseau de Bragg avec une compensation de dispersion idéale (ideal Dispersion compensation FBG).....  | <b>43</b>      |
| <b>Figure III.14:</b> Diagramme de l'œil du réseau de Bragg avec une compensation de dispersion idéale (idéal Dispersion compensation FBG) avec la variation de la distance.....   | <b>[44-45]</b> |
| <b>Figure III.15:</b> réseau de Bragg uniforme à fibre optique (Uniform Fibre Bragg grating).... <b>45</b>   |                |
| <b>Figure III.16 :</b> Diagramme de l'œil réseau de Bragg uniforme à fibre optique (Uniform Fibre Bragg grating) avec la variation de la distance.....   | <b>[46-47]</b> |
| <b>Figure III.17:</b> réseau Bragg à fibre optique (OptiGrating).....  | <b>48</b>      |
| <b>Figure III.18 :</b> Diagramme de l'œil du réseau Bragg à fibre optique (OptiGrating) avec la variation de la distance.....  | <b>49</b>      |

## Liste des tableaux

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tableau I.1:</b> Comparaissant entre les différents types de la fibre optique.....   | <b>6</b>  |
| <b>Tableau III.1:</b> résultats du réseau Bragg à pas variable à fibre optique (fibre Bragg grating).....                               | <b>40</b> |
| <b>Tableau III.2 :</b> résultats du réseau de Bragg avec une compensation de dispersion idéale (idéal Dispersion compensation FBG)..... | <b>43</b> |
| <b>Tableau III.3 :</b> résultats du réseau de Bragg uniforme à fibre optique (Uniform Fibre Bragg grating).....                         | <b>46</b> |
| <b>Tableau III.4:</b> résultats de réseau Bragg à fibre optique (OptiGrating).....  | <b>48</b> |

# Table des Matière

**Résumé**

**liste des acronymes**

**liste des figures**

**liste des tableaux**

**Introduction générale .....1**

## *Chapitre I : Généralités sur les fibres optiques*

I.1. Introduction .....3

I.2. Structure générale de la fibre optique.....3

    I.2.a –Définition.....3

    I.2.b-Présentation de la fibre optique .....3

I.3. La fabrication .....4

I.4. Classification des fibres optiques.....4

I.5. Type de fibre optique.....4

    I.5.1- Les fibres multimodes.....4

        I.5.1.a- Les fibres à saut d'indice.....5

        I.5.1.b- Les fibres à gradient d'indice.....5

    I.5.2-Fibre optique monomode .....5

I.6. Comparaison entre les différents types de la fibre optique.....6

I.7. Caractérisation de la fibre optique.....6

    I.7.a-Ouverture numérique .....7

    I.7.b-Atténuation.....7

    I.7.c-La bande passante.....8

    I.7.d -La Dispersion.....8

        • Dispersion chromatique.....8

        • La dispersion modale (dispersion intermodale).....8

        • Dispersion de polarisation PMD.....9

I.8 .Performances des fibres optiques.....9

I.9 . les Avantages est les inconvénients.....9

    I.9.1-les Avantage.....9

|  |    |
|--|----|
| I.9.2 -les inconvénients .....                       | 10 |
| I.10 .Quelques applications de la fibre optique..... | 10 |
| I.11.Conclusion.....                                 | 11 |

## ***Chapitre II : Etude des réseaux de Bragg dans une fibre optique***

|  |    |
|--|----|
| II.1.Introduction.....   | 12 |
| II.2.Définition des réseaux de Bragg.....                                | 12 |
| II.3.Principe de fonctionnement.....                                     | 14 |
| II.4.Techniques de fabrication de réseau de Bragg.....                   | 16 |
| II.4.1-Méthode holographique (interfronétique).....                      | 16 |
| II.4.2-Technique des Masques de Phase.....                               | 17 |
| II.4.3-Technique de miroir de Lloyd .....                                | 18 |
| II.4.4-Technique d'inscription point-par-point des réseaux de Bragg..... | 19 |
| II.5.Les types de réseau de Bragg.....                                   | 20 |
| II.5.1- Réseau de Bragg uniforme.....                                    | 20 |
| II.5.2- Réseau de Bragg « tilted » ou « blazed ».....                    | 21 |
| II.5.3-Réseau de Bragg à pas variable ou « chirped ».....                | 21 |
| II.5.4-Réseau de Bragg apodisé.....                                      | 21 |
| II.5.5-Réseau de Bragg échantillonné.....                                | 22 |
| II.5.6- Réseau de Bragg à saut de phase.....                             | 22 |
| II.6.1.Application des réseaux de Bragg à la télécommunication.....      | 23 |
| II.6.1.1-Filtrage et multiplexage.....                                   | 23 |
| II.6.1.2-Compensation de la dispersion chromatique.....                  | 24 |
| II.6.1.3- Senseurs.....  | 25 |
| II.6.2.Autres application de réseau de Bragg.....                        | 26 |
| II.6.2.1- Les réseaux de Bragg dans l'aviation.....                      | 26 |
| II.6.2.2-Les réseaux de Bragg dans l'automobile.....                     | 27 |
| II.7.La théorie des modes couplés.....                                   | 27 |
| II.8. Conclusion.....  | 28 |

## ***Chapitre III : Simulation des réseaux de Bragg dans la fibre optique***

|  |    |
|--|----|
| III.1.Introduction.....                        | 29 |
| III.2.Présentation du logiciel optisystem..... | 29 |
| III.3.Edition et simulation.....               | 31 |

|   |           |
|---|-----------|
| III.4.Les Avantages.....  | 32        |
| III.5.Les Applications.....   | 32        |
| III.6. Résultats de simulation .....  | 32        |
| III.6.1- Paramètres de qualité d'une liaison optique.....   | 32        |
| III.6.2- Système de communication à base de fibre optique.....  | 34        |
| III.6.3-Réseau de Bragg à fibre (FBG) modèle de compensation de dispersion.....                             | 35        |
| III.6.4-Etapes de simulation du système de communication à base de réseau de Bragg à fibre<br>optique ..... | 36        |
| III.6.5-Simulation 1 : réseau de Bragg à pas variable.....  | 38        |
| III.6.6-Simulation 2 : réseau de Bragg avec une compensation de dispersion idéale.....                      | 42        |
| III.6.7-Simulation 3 : réseau de Bragg uniforme.....  | 45        |
| III.6.8.Simulation 4 : réseau de Bragg avec OptiGrating.....  | 47        |
| IV.Conclusion.....  | 51        |
| <b>Conclusion générale.....</b>   | <b>52</b> |
| <b>Bibliographie.....</b>   | <b>53</b> |

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Après les développements dans le monde des communications et des technologies modernes aux changements dans la conception des systèmes de transmission sur câbles et sur ondes, et ceci afin d'améliorer la qualité de la transmission. Les communications optiques sont devenues un cercle efficace dans le réseau de communication pour les courtes et longues distances, car nous entendons beaucoup parler des fibres optiques et du développement qu'elles ont atteint et de l'étendue de leur qualité en transmission optique. Il s'agit de considérer la lumière comme un rayon qui a aidé à comprendre le mécanisme de la fibre optique dans le monde de la communication, et avec cela la qualité et la vitesse de transmission montrent une grande importance dans la communication. La transmission de la lumière par fibres optiques exploite le principe de la réflexion totale à l'interface cœur gaine [1].

Pour cela, les scientifiques essaient d'utiliser des techniques pour résoudre les problèmes auxquels ils sont confrontés, notamment l'utilisation du réseau de Bragg, qui a été démontrée pour la première fois dans la fibre par Ken Hill en (1978). En 1989, Gerald Meltz et ses collègues ont démontré cette technique dans une coupe transversale tridimensionnelle plus flexible. Le réseau de Bragg est construit dans une courte section de fibres optiques. Une fibre à réseau de Bragg est une microstructure tout optique de quelques millimètres basés sur un seul concept fondamental de la physique qui est la dispersion par une structure périodique. Ces structures présentent une variation périodique locale de la constante de propagation, qui est induite par la variation périodique de l'indice de réfraction du guide d'onde considéré.[2]

Le réseau de Bragg est une structure symétrique, ainsi il reflète toujours la lumière selon la longueur d'onde peu importe d'où provient la lumière.

La longueur d'onde du réseau de Bragg est essentiellement définie par la période de la microstructure et de l'indice de réfraction du noyau. [2]

Nous commencerons le premier chapitre par des généralités sur la fibre optique en fournissant une description à son sujet (présentation, fabrication et classification) ainsi qu'en mentionnant ses différents types et la différence entre eux, en plus des caractéristiques les

plus importantes qui distinguent la fibre optique telles que l'atténuation et la dispersion et en fin nous discutons de ses avantages et inconvénients, ainsi que de certaines de ses applications, notamment dans le domaine de la communication.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons un étude des réseaux de Bragg à fibre optique , on va débiter par une introduction qui va montrer le principe de fonctionnement et la techniques de fabrication de ces réseaux, en plus de mentionner les différents types de réseaux de Bragg, et finalement nous allons conclure , en mentionnant les applications des réseaux de Bragg à la télécommunication et dans d'autres domaines et nous allons également traiter la théorie des modes couplés qui peuvent être appliquer dans plusieurs domaines, tels que l'optique pour décrire des phénomènes physiques des réseaux de Bragg.

Une simulation des réseaux de Bragg dans les fibres optiques sera effectuée dans le troisième chapitre à l'aide du logiciel Optisystem, dans cette simulation on va représenter les différents types de réseaux de Bragg(FBG), en montrant l'effet de l'amélioration des performances de BER (Bit Error Rate). dans la liaison par fibre optique. Le facteur de qualité Q du système a été nettement augmenté avec l'utilisation de FBG, tandis que le minimum (BER) du système est réduit de manière significative.

# Chapitre I

## I.1. Introduction

L'apparence de la fibre optique fût du début du XX<sup>e</sup> siècle, mais ce n'est qu'en 1970 qu'est développée une fibre utilisable pour les télécommunications, qui transmet l'information sous forme de lumière à travers des longues distances avec un débit élevée.

Dans ce chapitre nous allons aborder l'étude des fibres optiques, leurs types et caractéristiques, ainsi que leurs avantages et inconvénients et finalement nous allons passer à différents applications.

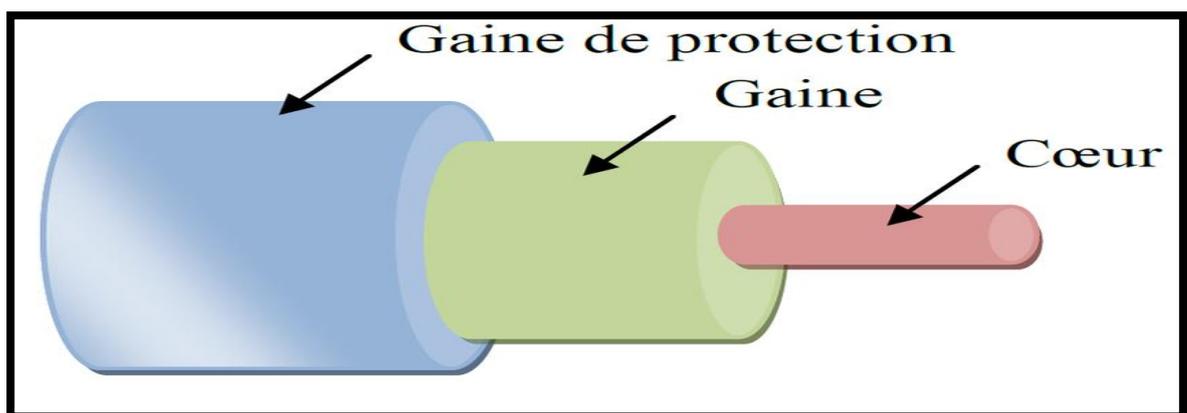
## I.2. Structure générale de la fibre optique

### I.2.a -Définition

Une 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 et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques.[2]

### I.2.b-Présentation de la fibre optique

La fibre optique est une ligne de transmission sous forme d'un guide d'onde cylindrique qui est composée d'une partie centrale appelée cœur d'indice de réfraction  $n_1$  fabriqué à base de silice entouré d'un autre matériau d'indice de réfraction  $n_2$  appelé la gaine. 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.



**Figure I.1** : Structure générale d'une fibre optique.

En outre, telle que le montre, la gaine est elle-même recouverte d'une enveloppe, généralement en plastique, qui a le double rôle de protéger la fibre mécaniquement et de

piéger la lumière qui se propage dans la gaine optique, en général indésirable. Si l'on dénude la fibre, le milieu extérieur est l'air.[3]

**I.3. La fabrication**

La fabrication d'une fibre optique passe par la réalisation d'une préforme cylindrique en barreau de silice. La silice est un composé oxygéné de silicium, de formule SiO<sub>2</sub>, présent dans un grand nombre de minéraux, tels que le quartz, la calcédoine et l'opale. Le barreau subit ensuite un étirage, en plaçant l'extrémité dans un four porté à une température voisine de 2000°C. Il est alors transformé en une fibre de plusieurs centaines de kilomètres, à une vitesse de l'ordre du kilomètre par minute. La fibre est ensuite revêtue d'une double couche de résine protectrice avant d'être enroulée sur une bobine ; Son centre, qui constitue le cœur est entouré d'une silice de moindre qualité qui forme la gaine optique. On réalise un écart d'indice entre le cœur et la gaine en incorporant des dopants, tels que :

- Le germanium et le phosphore qui accroissent l'indice dans le cœur, le bore et le fluor qui le font décroître dans la gaine.
- Une préforme de verre d'une longueur de 1m et d'un diamètre de 10cm permet d'obtenir par étirement une fibre monomode d'une longueur d'environ 150 Km. [4]

**I.4. Classification des fibres optiques**

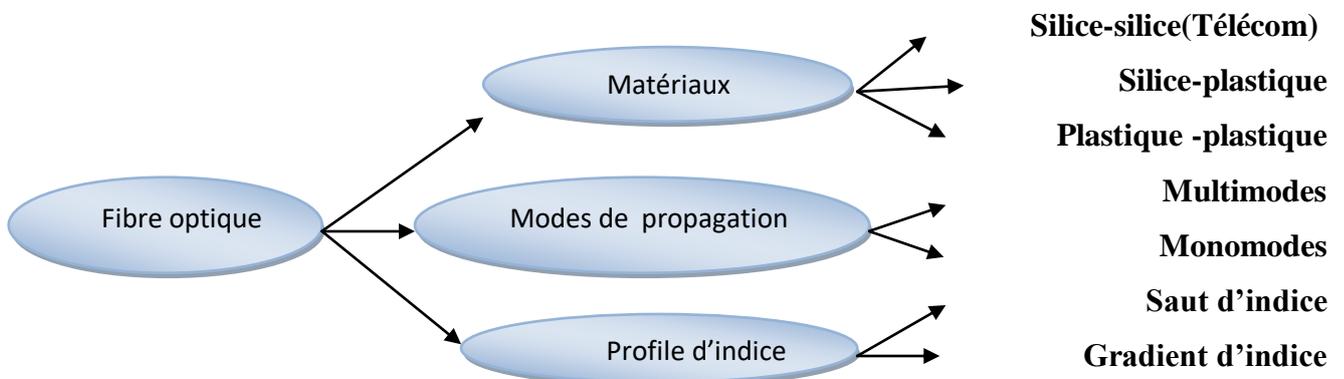


Figure I.2: organigramme de classification.

**I.5. Type de fibre optique**

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon leur diamètre et la longueur d'onde utilisée :

**I.5.1- Les fibres multimodes**

La fibre multi modes (dites MMF, pour Multi Mode Fibre), ont été les premières sur le marché. Elles ont pour caractéristiques de transporter plusieurs modes (trajets lumineux) simultanément. Du fait de la dispersion modale, on constate un étalement temporel du signal. Elles sont caractérisées par un diamètre de cœur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de

micromètres (les cœurs en multimodes sont de 50 ou 62.5 microns pour le bas débit). En conséquence, elles sont utilisées uniquement pour des bas débits et de courtes distances.[2] nous trouvons deux sous catégories :

**I.5.1.a- 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.[5]

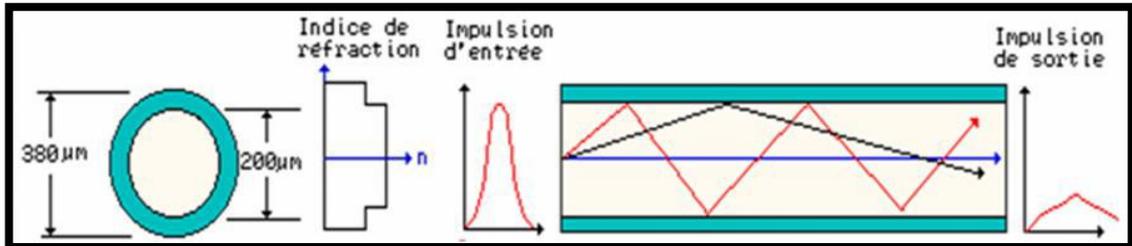


Figure I.3 : fibre a saut d'indice.

**I.5.1.b- 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.

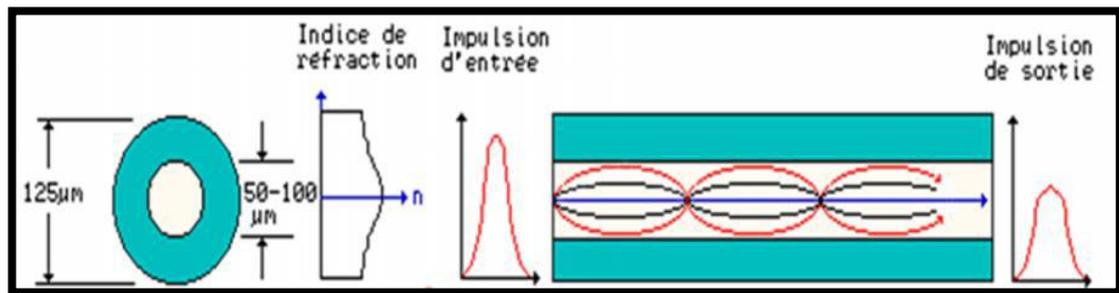


Figure I.4 : fibre a gradient d'indice.

### I.5.2-Fibre optique monomode

Pour de plus longues distances et/ou de plus hauts débits, on préfère d'utiliser des fibres monomodes (dites SMF, pour *Single Mode Fibre*), qui sont technologiquement plus avancées car plus fines. Leur cœur très fin n'admet ainsi qu'un mode de propagation, le plus direct possible c'est-à-dire dans l'axe de la fibre. Les pertes sont donc minimales (moins de réflexion sur l'interface cœur/gaine) que cela soit pour de très hauts débits et de très longues distances. Les fibres monomodes sont de ce fait adaptées pour les lignes intercontinentales (câbles sous-marin).[2]

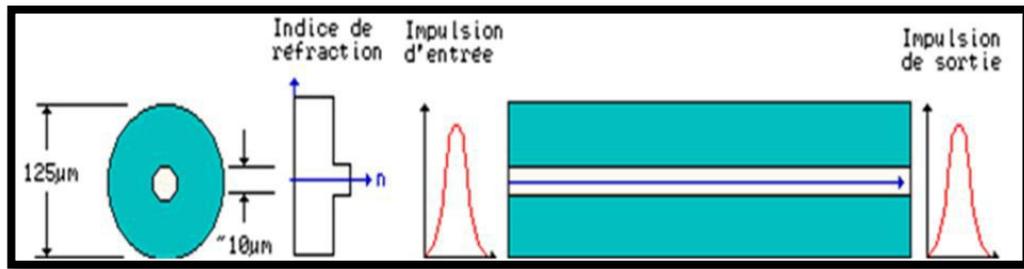


Figure I.5: fibre monomode.

**I.6. Comparaison entre les différents types de la fibre optique**

| Structure                    | Avantage   | Inconvénients                                      | Application pratique                             |
|------------------------------|--|--|--|
| Multimode à saut indice      | - grande ouverture numérique<br>- connexion facile<br>- faible prix<br>- Facilité de mise en Œuvre | Pertes .dispersion et distorsion élevées du signal | Communications courtes distances réseaux locaux. |
| Multimode à gradients Indice | Bande passante raisonnable et bonne qualité de transmission  | Difficile à mettre en Œuvre                        | Communications courtes et moyennes distances     |
| Monmode                      | Bande passante très Grande   | Prix très élevé                                    | Communication longues distances                  |

Tableau I.1: comparaison entre les différents types de la fibre optique.

**I.7. Caractérisation de la fibre optique**

La fibre optique est caractérisée par plusieurs paramètres dont nous étudierons, les quatre paramètres les plus importants :

- L'ouverture numérique.
- L'atténuation.
- La bande passante.
- La dispersion.

**I.7.a-Ouverture numérique :**

L'angle limite d'acceptation de la lumière par le guide exprime la faculté de capter la lumière d'une source à sa section frontale. Elle est directement liée à l'ouverture du cône d'acceptance la figure I.6 et l'équation I.1 des rayons lumineux critiques conduisant encore juste à une réflexion total, comme le montre:

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

(Eq I.1)

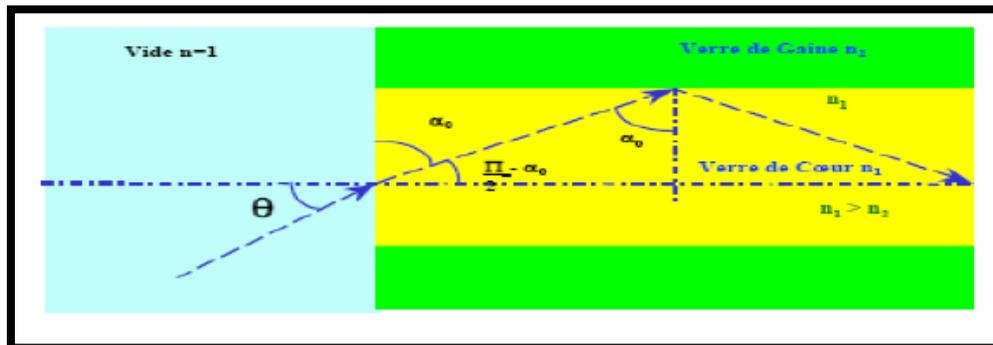


Figure I.6: Ouverture numérique d'une fibre optique.

**I.7.b-Atténuation :**

L'atténuation dans une fibre optique est définie comme étant le rapport de la puissance optique transmise dans la fibre et la puissance reçue exprimée en unité logarithmique par unité de longueur [6].

L'atténuation du signal dépend de la nature de la fibre essentiellement en fonction de sa nature (monomode ou multimode).

Le choix de la fibre optique utilisée est principalement imposé par la longueur d'onde du signal transmis. Ainsi, pour des signaux de longueur d'onde entre 800nm et 1300nm, on est contraint d'utiliser une fibre multimode, alors que pour des signaux de longueur d'onde de 1280 à 1640 nm, on peut utiliser une fibre monomode.

$$A[\text{dB}] = 10 \log \left( \frac{pe}{ps} \right)$$

(Eq I.2)

**A[dB] :** L'atténuation en décibel.

**Pe:** La puissance lumineuse à l'entrée.

**Ps :** La puissance lumineuse à la sortie.

**I.7.c-La bande passante :**

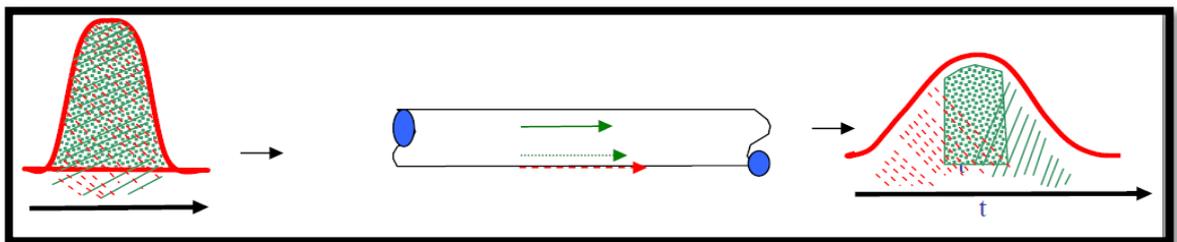
la bande passante est la quantité d'informations que l'on peut transmettre sur la fibre optique pendant un intervalle de temps, exprimée en bits par secondes (bps). Elle désigne aussi la longueur de l'intervalle de fréquence utilisable sur un support, dans ce cas elle s'exprime en hertz (Hz).[4]

**I.7.d-La Dispersion :**

L'information est souvent transportée à travers une fibre optique sous forme numérique. Dans ce cas, l'information est transmise sous la forme d'une série d'impulsions de lumière (la présence de lumière correspond à un 1 et l'absence de lumière correspond à un 0 logique). En général, les impulsions à la sortie de la fibre sont élargies par rapport aux impulsions à l'entrée. Le phénomène physique responsable de cet élargissement est la dispersion de la fibre. Si l'élargissement est trop important, il n'est plus possible de décoder correctement l'information à la sortie (il y a perte d'information suite à des erreurs de transmission) .

**Il existe trois types de dispersion :**✓ **Dispersion chromatique**

La dispersion chromatique exprimée en ps / (nm.km), caractérise l'étalement du signal lié à sa largeur spectrale (deux longueurs d'onde différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse). Cette dispersion dépend de la longueur d'onde considérée et résulte de la somme de deux effets : la dispersion due au matériau, et la dispersion du guide, liée à la forme du profil d'indice. Il est donc possible de la minimiser en adaptant le profil [7]. Pour une fibre en silice, le minimum de dispersion se situe vers 1 300-1 310 nm.



**Figure I.7:** Dispersion chromatique.

✓ **La dispersion modale (dispersion intermodale)**

La dispersion intermodale est la cause principale de l'élargissement des impulsions dans les fibres optiques multimodes . Cet élargissement est provoqué par les différences des temps de parcours des rayons lumineux. La dispersion intermodale ( $D_i$ ) est l'élargissement temporel maximum ( $\delta$ ) d'une impulsion par unité de longueur de fibre.

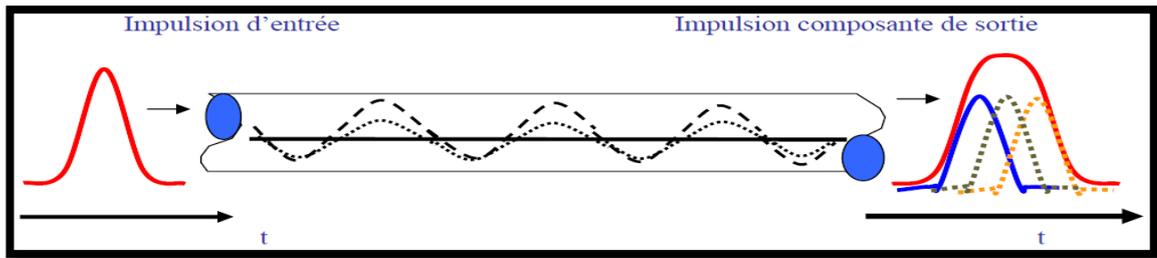


Figure I.8: Dispersion modale.

### ✓ Dispersion 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.[5]

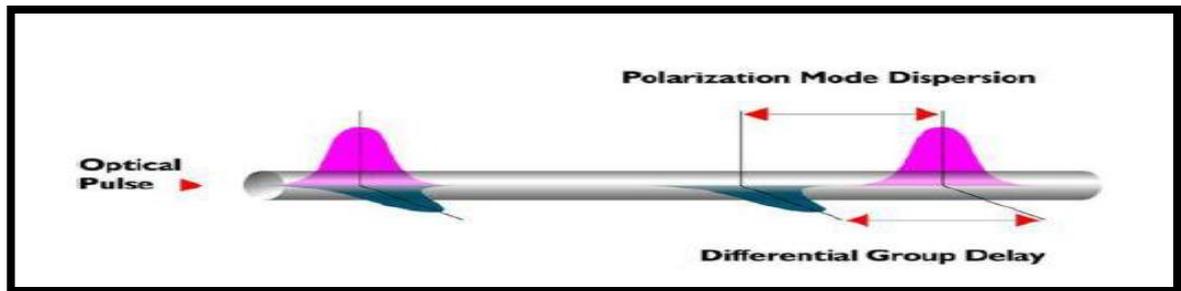


Figure I.9: Dispersion polarisation.

## I.8. Performances des fibres optiques

Pour ne transporter qu'un seul mode, les coeurs des fibres monomodes sont beaucoup plus étroits. Le diamètre n'est que de 4  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$ , alors que le diamètre de la gaine reste 125  $\mu\text{m}$ . Elles sont utilisées pour les transmissions à très longues distances en raison de leur faible atténuation et dispersion.

## I.9. les Avantages est les inconvénients de la fibre optique

### I.9.1-les Avantages

Les avantages que procure la fibre optique peuvent être classés en :

- **Performances de transmission** : Très faible atténuation, très grande bande passante, possibilités de multiplexage(en longueur d'ondes).
- **Avantages de mise en œuvre** : Très petite taille, grande souplesse, faible poids.
- **Sécurité électrique** : Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous de forte tension

- **Sécurité électromagnétique** : Insensible aux parasites et elle n'en crée pas, inviolabilité presque totale.
- **Avantage économique** : Moindre coût, en comparaison avec d'autres supports [3].

### **I.9.2 -les inconvénients**

- Exigences micromécaniques importantes (connexions, alignement).
- **Coût** : les câbles de fibre optique sont plus coûteux à installer, mais durent plus longtemps que les câbles de cuivre.
- **Transmission** : La transmission du signal dans les câbles de fibre optique doit se répéter au long d'une certaine distance grâce à des appareils amplificateurs mais demande beaucoup moins de répétitions que les câbles de cuivre.
- **Fragilité** : Les fibres peuvent être cassées ou perdre la transmission quand le câble est rayé ou fissuré. Cependant en enveloppant des fibres dans une gaine en plastique, il est difficile de plier le câble sans casser la fibre.
- **Protection** : Les Fibres Optiques exigent plus de protection autour du câble comparé au Cuivre.

### **I.10 .Quelques applications de la fibre optique**

- Transmission numérique à haute débit.
- Réseaux nationaux et internationaux de télécommunications.
- Réseaux locaux en environnement bruité.
- Détection .[2]

#### **Dans les télécommunications**

La fibre optique, grâce aux performances qu'elle offre, est de plus en plus

Avec l'essor d'Internet et utilisée dans les réseaux de télécommunications. des échanges numériques, son utilisation se généralise petit à petit jusqu'à venir chez le particulier.

Les opérateurs et les entreprises ont été les premiers utilisateurs de fibres optiques Elle est particulièrement appréciée par l'armée pour son insensibilité aux IEM (Interférences Electromagnétiques) mais aussi pour sa légèreté.

#### **En médecine**

Un type d'endoscope, appelé fibroscope, utilise de la fibre optique pour véhiculer l'image de la zone à explorer jusqu'à l'œil du médecin réalisant l'examen exploratoire. C'est une des premières applications des fibres optiques.

Les décors lumineux à bases de fibres optiques plastiques sont utilisés dans les salles de thérapie Snoezelen, à la fois dans les plafonds ou pour stimuler le toucher par les brins des fibres.[8]

### **I.11.Conclusion**

Les fibres optiques font partie des câbles qui revêtent une grande importance dans le domaine des télécommunications en raison de ses nombreux avantages, C'est un moyen idéal pour transmettre des informations dans les réseaux de télécommunications .mais elles n'éliminent pas les défauts telle que la dispersion car elles limitent le taux de transmission des données dans la dernière.

C'est ce que nous aborderons en utilisant le réseau de bragg, dont nous discuterons au deuxième chapitre.

# Chapitre II

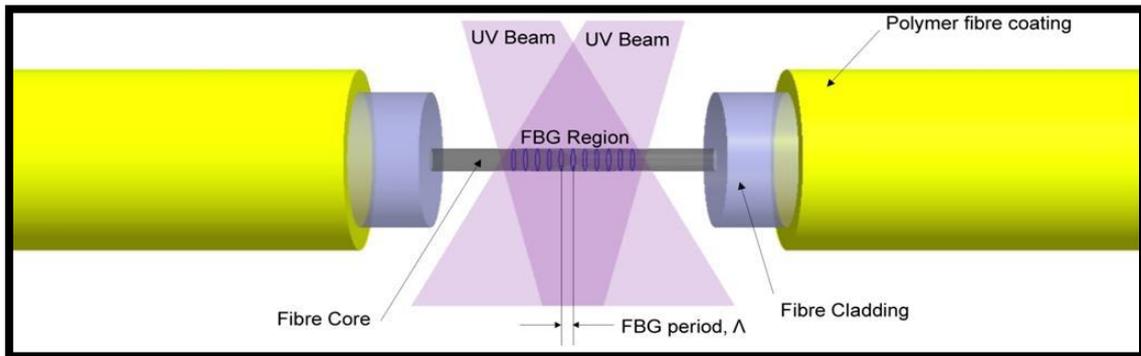
## II.1.INTRODUCTION

La découverte des réseaux de Bragg eut lieu quelque peu par hasard lors d'une expérience ayant un tout autre but initialement [2]. En 1978, au centre de recherche Canadien de communications, Ottawa, Ontario, Canada, K.O.Hill est le premier qui a démontré que l'indice de réfraction change dans une fibre optique à base de silice et de germanium, en émettant un faisceau de lumière intense dans une fibre[9]. La technologie de la fibre à réseau de Bragg s'est développée plus rapidement dès que la technologie de lithographie latérale par lumière ultraviolette a été inventée. Depuis cette innovation, beaucoup de recherches ont été faites pour améliorer la qualité et la durabilité de la fibre à réseau de Bragg. Les fibres optiques à réseau de Bragg sont les composants clés des systèmes de communications par fibre optique et des systèmes de capteurs optiques. Les produits commerciaux utilisant la fibre à réseau de Bragg ont été disponibles depuis le début de 1995.[10]

Dans ce chapitre on représente les techniques de fabrication ,le principe de fonctionnement, les types de réseaux, la modélisation de réseau, et les applications.

## II.2.Définition des réseaux de Bragg

Le nom vient de Sir William Henri Bragg qui découvre la loi de Bragg en 1915. Un réseau de Bragg(FBG) est une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre optique. La photo inscription des réseaux de Bragg est due principalement au phénomène de photosensibilité des fibres (fortes bandes d'absorption dans l'UV). [11]

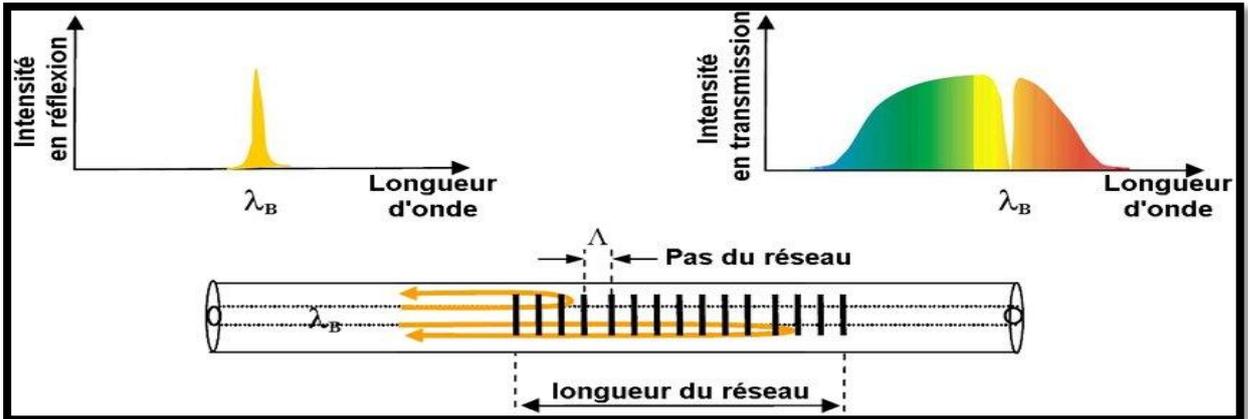


**Figure II.1:** Exposition d'une fibre dans un champ d'interférences de 2 faisceaux UV.

Un réseau de Bragg dans une fibre optique est une modulation périodique ( $\Lambda$ ) de l'indice de réfraction ( $n$ ) du  $\text{SiO}_2$  le long de la fibre optique. Comme présenté sur la (**figure II.1**), lors du passage de la lumière, une petite partie de la lumière incidente ( $\lambda_B$ ) va être réfléchi dépendamment des caractéristiques du réseau selon la fameuse loi de Bragg [12] :

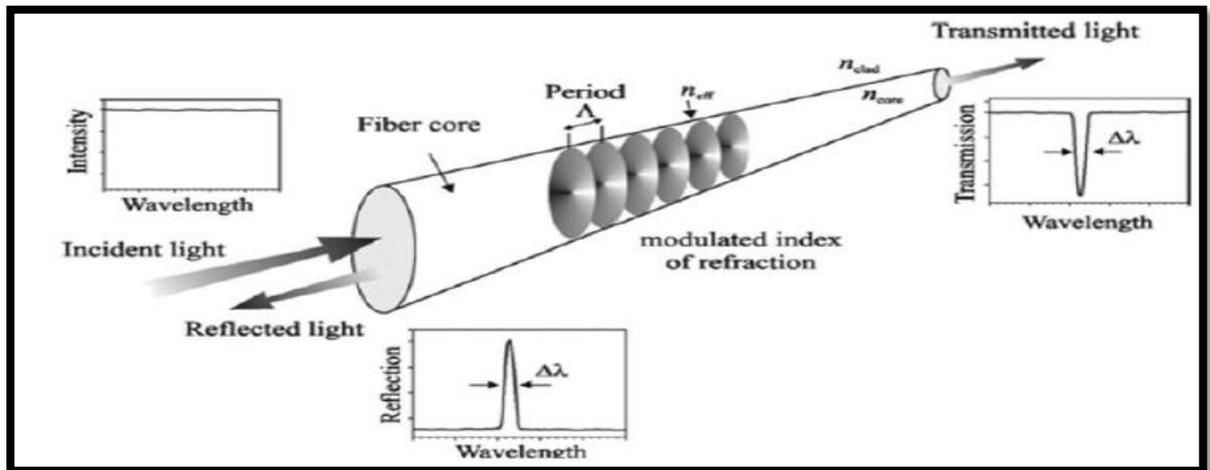
$$\lambda_B = 2 * n * \Lambda \quad (\text{Eq II.1})$$

$$\lambda_B = 2 * n * \Lambda \quad \rightarrow \quad \Lambda = \frac{\lambda_B}{2 * n}$$



**Figure II.2:** spectrale de longueur d'onde du réseau.

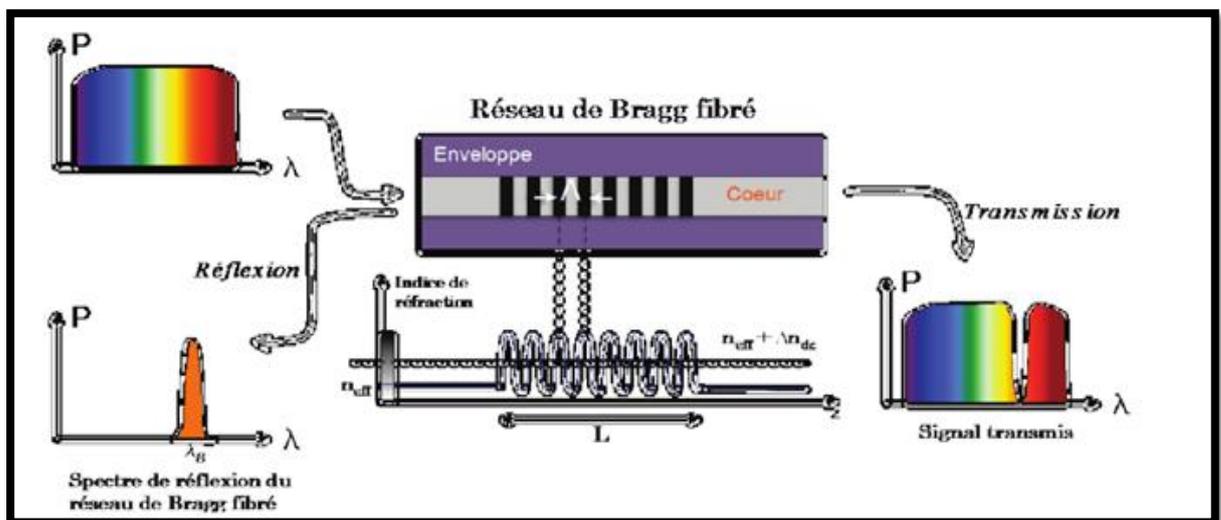
Explicitement, un réseau de Bragg fibré est un morceau de fibre optique, généralement de longueur ne dépassant pas les 3 centimètres à l'exception de certains réseaux spécifiques qui peuvent atteindre ou dépasser une longueur de 14 centimètres, et dont l'indice de réfraction du cœur est modulé de façon périodique, comme le représente le schéma de la (figure II.3). La modification d'indice est obtenue par insolation latérale avec une figure d'interférence issue d'un faisceau laser ultraviolet. Dans ce cas, on note que le laser à excimer à base de fluorure d'argon (ArF\*), qui émet à 193 nm, est le mieux placé pour ce genre d'opération. De ce fait, il modifie périodiquement la phase (ou l'intensité) de la lumière réfléchi (ou transmise). [2]



**Figure II.3:** Représentation schématique d'un réseau de Bragg inscrit au cœur d'une fibre optique.

Cette modulation d'indice s'obtient par exposition du cœur de la fibre à une intense figure d'interférence, créée à partir d'un laser ultraviolet, qui excite ainsi des défauts dans le cœur de la fibre optique et modifie le verre. Cette exposition a pour effet d'augmenter l'indice de réfraction des régions exposées aux fortes intensités.

Les premiers réseaux inscrits à l'intérieur d'une fibre optique ont été produits en 1978 à Ottawa au Centre de recherches sur les communications par Hill et al. Ces chercheurs ont observé que l'injection d'un laser monomode à ions d'argon de forte puissance dans une fibre dopée au germanium menait, après un certain temps d'exposition, à la réflexion partielle de la lumière injectée. En procédant à des mesures spectrales, ils ont remarqué que la réflexion du réseau était très sélective et que la réflexion maximale correspondait à la longueur d'onde du laser injecté. Le réseau inscrit était formé grâce à la présence d'une onde stationnaire créée par la lumière injectée et celle réfléchi par le bout de la fibre. Ce type de réseau par injection guidée a été baptisé « réseau de Hill».[1]



**Figure II.4:** Les réponses spectrales d'un réseau de Bragg .

La fibre à réseau de Bragg 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 (**figure II.4**).

Les FBG permettent de coupler la lumière entre le mode fondamental qui se propage dans la fibre optique (mode propagatif) et un mode contra-propagatif. Ce couplage efficace qui satisfait le principe de conservation de la quantité du mouvement en présence du réseau et celle de la conservation d'énergie. [11]

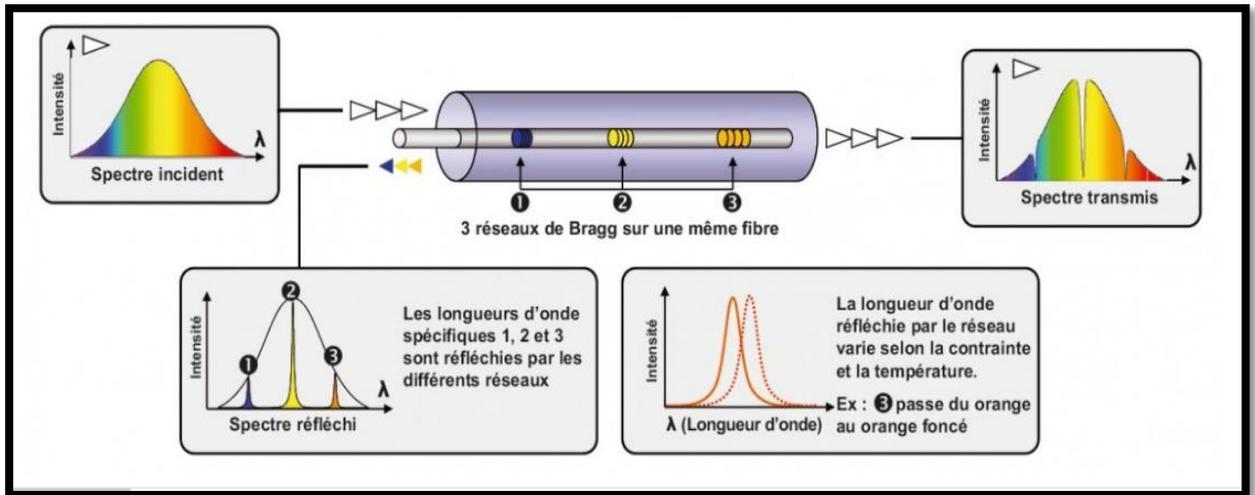
### II.3.Principe de fonctionnement

La fibre à réseau de Bragg 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.

La lumière restante poursuivra son chemin le long de la fibre jusqu'au prochain réseau de Bragg sans avoir perdu de son pouvoir (**figure II.5**).

La longueur d'onde du réseau de Bragg est essentiellement définie par la période de la microstructure et de l'indice de réfraction du noyau. Le réseau de Bragg est une structure symétrique, ainsi il reflétera toujours la lumière selon la longueur d'onde peu importe d'où provient la lumière.

Différents capteurs fabriqués à partir de réseaux ayant une longueur d'onde spécifique peuvent être implémentés en série sur une même ligne optique (typiquement jusqu'à 16).



**Figure II.5:**(A gauche en haut : spectre de la lumière injectée ; en haut à droite : spectre de la lumière transmise ; au centre : FBG avec symbolisées la transmission la réflexion de la lumière ; en bas à gauche : spectre de la lumière reflétée).

La (**figure II.5**) montre la représentation schématique d'un réseau de Bragg à fibre. Lorsque la période et l'amplitude de la modulation de l'indice sont constantes, le réseau est appelé uniforme et représente la structure de base pour décrire les différents types de réseau de Bragg existants. La modulation de l'indice de réfraction de la fibre optique résultante de l'irradiation UV s'écrit :

$$\Delta n ( z ) = \Delta n_{\text{moy}} + \Delta n_{\text{mod}} \cos \left( \frac{2\pi}{\Lambda} z \right) \quad (\text{Eq II.2})$$

- $\Delta n_{\text{moy}}$  : la variation de l'indice moyen
- $\Delta n_{\text{mod}}$  : l'amplitude de la modulation
- $z$  : la position dans le réseau
- $\Lambda$  : la période ou pas de variation de l'indice de réfraction [2].

## II.4. Techniques de fabrication de réseau de Bragg

Différents procédés de fabrication ont été développés pour la fabrication de réseau de Bragg (RDB) sur fibre optique, l'objectif ultime étant d'obtenir une méthode fiable et économique pour imprimer rapidement et massivement les RDB et ainsi faciliter leur utilisation dans les différents domaines. [12]

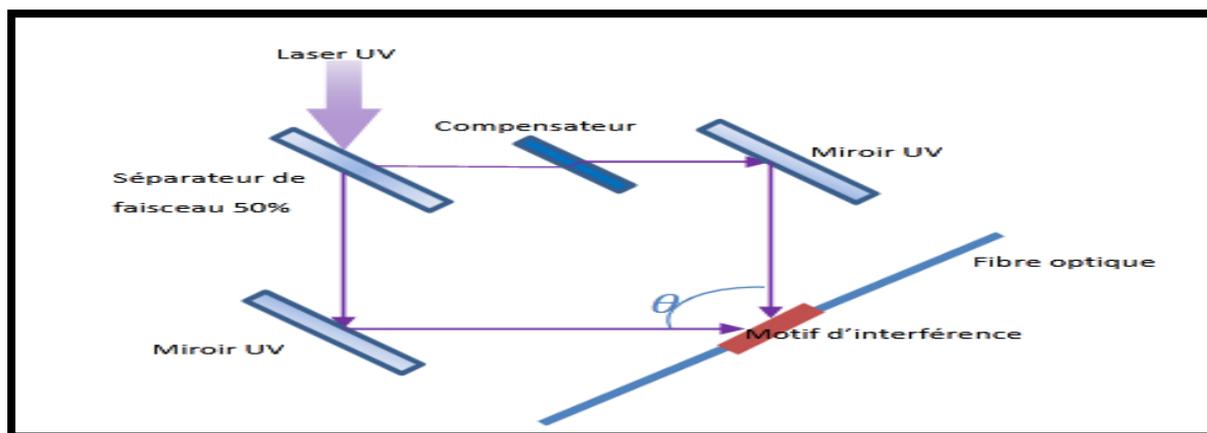
En matière de procédés de fabrication, actuellement, il existe principalement trois techniques de base en usage permettant d'obtenir la modulation d'indice nécessaire avec la plus grande précision : l'interférométrie (ou technique holographique), la technique de point par point, et la méthode de masque de phase. Il est à noter que chaque technique a ses propres avantages et ses inconvénients. [2]

### II.4.1-Méthode holographique (interfronétique)

En 1989, Metz *et al* ont mis au point la méthode dite holographique d'exposition des RDB en vue de réfléchir des longueurs d'onde intéressantes pour les télécommunications et autres applications.

Cette technique consiste à exposer le RDB en créant un patron d'interférence avec deux faisceaux laser UV ( $\lambda=248\text{ nm}$ ) sur la fibre optique (**figure II.6**). L'angle d'incidence des deux faisceaux détermine la période du RDB exposé, ce qui rend cette technique relativement flexible. Cette méthode présente toutefois des difficultés techniques significatives. En effet, plus les réseaux sont longs (plus de 5 cm), plus les miroirs doivent être grands. Or, ces miroirs doivent être impérativement uniformes afin de conserver la cohérence du faisceau laser. Ce type de dispositif est également sensible aux vibrations, ce qui rend difficile la reproduction systématique d'un même RDB sur différentes fibres optiques. Cette méthode présente toutefois des difficultés techniques significatives. En effet, plus les réseaux sont longs (plus de 5 cm), plus les miroirs doivent être grands. Or, ces miroirs doivent être impérativement uniformes afin de conserver la cohérence du faisceau laser. Ce type de dispositif est également sensible aux vibrations, ce qui rend difficile la reproduction systématique d'un même RDB sur différentes fibres optiques.

De plus, même s'il est possible de choisir la période du réseau, ce système d'exposition reste le plus souvent limité à des réseaux uniformes. Des variantes de ce système ont été développées afin d'exposer des RDB non-uniformes plus longs et avec des périodes non-uniformes.



**Figure II. 6:** Principe d'exposition de RDB par méthode holographique.

#### II.4.2-Technique des Masques de Phase

Il devient nécessaire de développer une méthode pour la production de RDB sur fibre optique fiable, rapide et reproductible. C'est dans cet objectif que la technique des masques de phase a été développée et que ceux-ci sont maintenant majoritairement utilisés pour la fabrication des RDB sur FO. [12]

Quelques années plus tard, une seconde méthode d'inscription fut mise au point, celle du masque de phase [Hill 1993], cette méthode permet l'inscription de façon plus robuste et beaucoup moins dépendante de la cohérence du laser utilisé et le principal intérêt réside dans la simplicité du montage optique utilisé. [11]

Un masque de phase est constitué par une lame de silice sur laquelle ont été gravées des bandes rectangulaires espacées de  $2L$  de même profondeur constituant un réseau. Ce dernier diffracte environ 80% de la lumière du laser incident dans les ordres  $+1$  et  $-1$  lorsque la profondeur est judicieusement choisie. Ainsi, il se forme une figure d'interférences dont les franges insolent le guide perpendiculairement à son axe et créent une modulation de l'indice du cœur avec un pas  $L$  deux fois plus petit que celui du masque. [1]

Cette technique consiste à utiliser un élément optique diffractif appelé masque de phase, qui consiste en une lame de silice à faces parallèles transparente aux UV où sont périodiquement gravées des rainures rectangulaires de même profondeur. Le rayonnement UV traverse le masque et se trouve diffracté. Les faisceaux d'ordre  $+1$  et  $-1$  forment, en interférant, un système de franges qui éclaire la fibre (**figure II.7**).

La période du réseau de Bragg inscrit par cette méthode est donc égale à la moitié du pas du masque de phase ( $\Lambda = d/2$ ). Par ailleurs, il est important de ne pas mettre en contact la fibre et le masque de phase afin de ne pas abîmer ce dernier. La période du réseau gravé étant de l'ordre du  $\mu\text{m}$ , une simple égratignure peut l'endommager.

L'inconvénient majeur est qu'il faut changer de masque de phase à chaque fois que l'on désire changer de longueur d'onde de Bragg et ces composants sont très dispendieux. La longueur d'onde de Bragg est reliée à l'angle de diffraction des ordres  $\pm 1$  par:

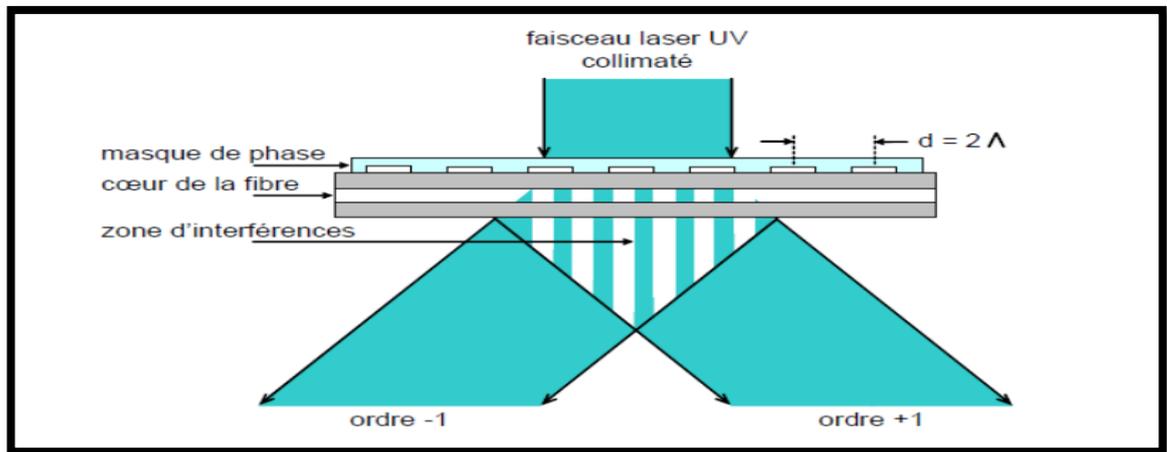
$$\lambda_B = n_{\text{eff}} d = 2 n_{\text{eff}} \Lambda$$

$$\Lambda = \frac{\lambda uv}{2 \sin(\theta)}$$

(Eq II.3)

$$\lambda_B = n_{\text{eff}} \frac{\lambda uv}{\sin(\theta)}$$

où  $\lambda_B$  est la longueur d'onde du réseau de Bragg,  $\Lambda$  est période du réseau de Bragg et  $\theta$  représente l'angle de diffraction du masque de phase.[11]



**Figure II.7:**Inscription d'un réseau par la méthode du masque de phase.

Malheureusement, cette méthode n'est pas flexible comme la méthode interférométrique, car chaque masque de phase correspond à une seule longueur d'onde de Bragg  $B$ , Celle-ci est déterminée uniquement par le pas du masque de phase et elle est indépendante de la longueur d'onde de la lumière laser UV utilisée. Toutefois, elle est moins sensible aux vibrations et aux contraintes d'alignement. [2]

#### II.4.3-Technique de miroir de Lloyd

Le faisceau laser UV est élargi dans le plan horizontal grâce à un télescope cylindrique afocal pour qu'il ait une taille deux fois plus grande que celle du réseau voulu (**figure II.8**).

Ensuite, une lentille cylindrique parallèle à la fibre permet de focaliser le faisceau dans le plan vertical sur le cœur à photo inscrire. La fibre est alors placée de telle sorte qu'une partie de la fibre soit insolée à la fois par le faisceau incident et par le faisceau réfléchi par le miroir de Lloyd. Ce dernier est réglé pour réfléchir la moitié du faisceau incident.

Des franges d'interférences apparaissent alors sur la fibre et crée ainsi une modulation d'indice proportionnelle à l'insolation UV reçue. [1]

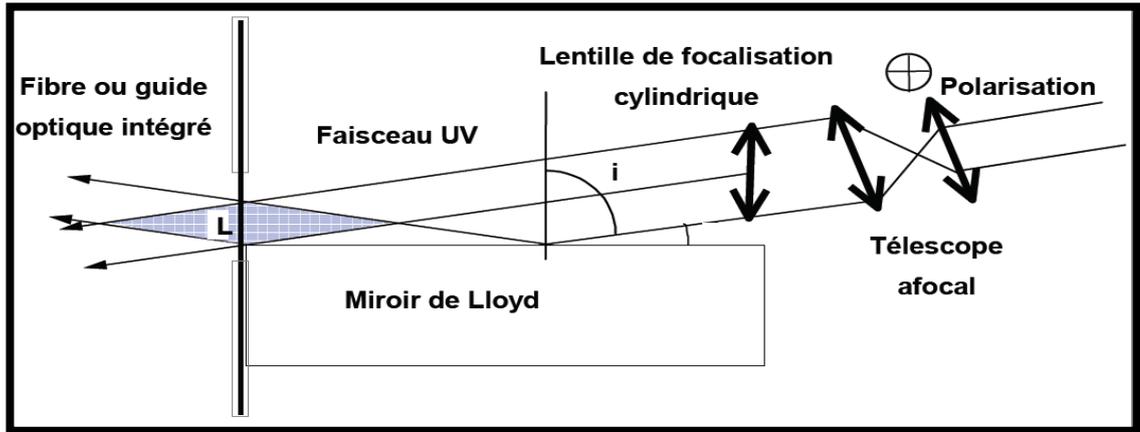


Figure II.8: Schéma du montage de photo inscription par miroir de Lloyd.

#### II.4.4-Technique d'inscription point-par-point des réseaux de Bragg

Une méthode d'inscription des réseaux de Bragg appelée point-par-point a été décrite pour la première fois par Malo et al en 1993 elle consiste à modifier localement l'indice de réfraction du cœur de la fibre optique en focalisant fortement un faisceau sur un point. Le faisceau est ensuite déplacé de façon très précise pour former la structure périodique. Cette technique fort intéressante a été démontrée à l'aide d'impulsions femto secondes infrarouges par Martinez et al, 2004. Il va sans dire que cette technique nécessite un déplacement extrêmement précis du faisceau focalisé par rapport au cœur de la fibre ainsi qu'un alignement quasi-parfait pour que la zone de changement d'indice confinée à une dimension de quelques microns demeure alignée avec le cœur de la fibre optique ayant également un diamètre de quelques microns sur une longueur de plusieurs millimètres.

La première démonstration d'inscription d'un FBG de bonne qualité par cette méthode utilisait des impulsions femto secondes proche-infrarouges à 800nm. La (figure II.9) présente le montage utilisé pour l'inscription des réseaux.

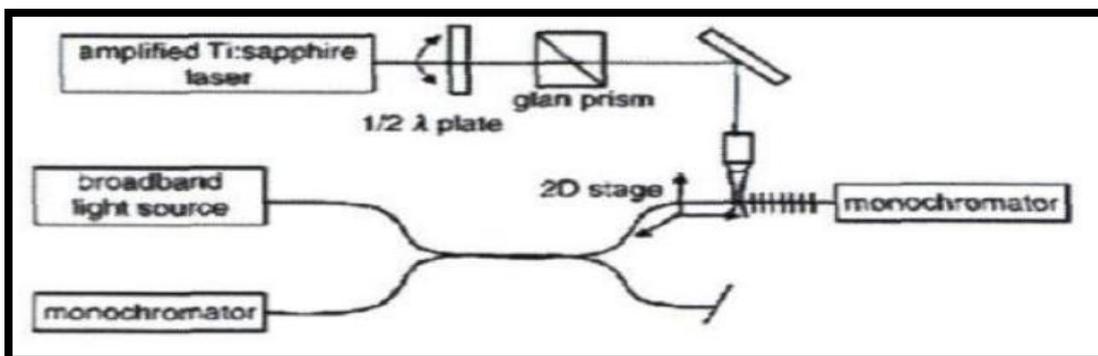


Figure II.9:Montage point-à-point pour l'inscription d'un réseau dans la fibre optique.

Le principal avantage de cette technique provient du fait qu'elle permet l'utilisation d'un laser émettant des impulsions femtosecondes de faible énergie (environ 1 microjoule) donc moins complexe et moins coûteux. De plus, aucun masque de phase n'est nécessaire pour effectuer l'inscription du réseau de Bragg ce qui donne de la flexibilité à la méthode car le pas du réseau peut être ajusté très simplement en ajustant la vitesse de translation du faisceau. Par contre, cette technique nécessite un système de déplacement extrêmement précis, un alignement quasi parfait et une stabilité mécanique extrêmement bonne, ce qui la rend difficile à adapter pour la fabrication en volume de FBGs. [11]

**Comparée aux différentes méthodes utilisées, la technique de masque de phase présente de nombreux avantages par rapport aux autres méthodes.**

## II.5. Les types de réseaux de Bragg

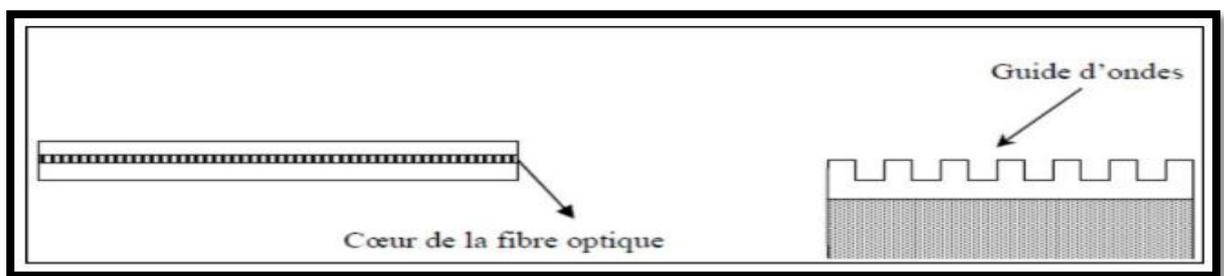
Il existe plusieurs types de réseau de Bragg que nous mentionnons:

### II.5.1-Réseau de Bragg uniforme

Ce sont des réseaux standards qui ont une période constante et des pas perpendiculaires à l'axe de la structure (la fibre ou guide d'onde). Par exemple pour un réseau de Bragg photo-inscrit dans le cœur d'une fibre optique consiste en la variation périodique, selon l'axe de la fibre, Cette modulation d'indice réalise un filtre en longueur d'onde. En effet, les (figure II.10). longueurs d'onde situées autour de la longueur d'onde de Bragg vérifiant la loi de Bragg :

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (\text{Eq II.4})$$

sont partiellement réfléchies par le réseau ; les autres sont transmises, avec  $\Lambda$  désigne la période de modulation d'indice et  $n_{\text{eff}}$  l'indice de réfraction effectif du mode fondamental.



**Figure II.10:** réseau de Bragg uniforme.

Donc on peut dire que le réseau réfléchit la lumière centrée autour d'une seule longueur d'onde.

Le réseau est parfaitement périodique le long de la structure, avec des points de départ et de fin bien définis. Souvent, soit par sa conception même soit à cause des techniques de fabrications utilisées, le réseau de Bragg dévie un peu de cette structure parfaite.

**II.5.2- Réseau de Bragg « tilted » ou « blazed »**

Les réseaux « tilted » ont des pas inclinés d'un certain angle par rapport à l'axe de la fibre à titre d'exemple (figure II.11) ce qui permet un couplage de la lumière à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du cœur.

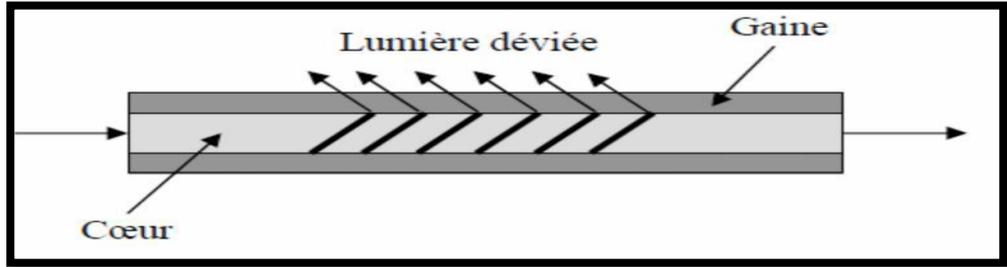


Figure II.11: réseau de Bragg « tilted ».

**II.5.3-Réseau de Bragg à pas variable ou « chirped »**

Souvent, soit par la conception du même réseau soit à cause des techniques de fabrication utilisées, le réseau de Bragg dévie un peu de cette structure parfaite. Si le pas du réseau varie légèrement tout au long de la structure, on dit alors qu'il présente un écart ou « chirp ». Dans les réseaux chirpés la période augmente progressivement d'un pas à l'autre (figure II.12) ; les grandes longueurs d'onde sont réfléchies en début de réseau et les plus courtes en fin de réseau ; ainsi la dispersion peut être compensée et le signal d'origine rétabli.

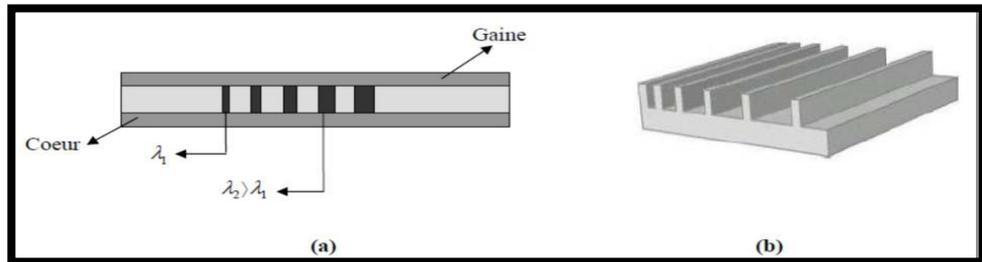


Figure II.12 : réseau de Bragg « chirped ».

(a) intégré dans une fibre optique      (b) intégré dans un guide d'onde

**II.5.4-Réseau de Bragg apodisé**

Dans ces réseaux l'amplitude du coefficient de couplage *c* varie le long de la structure.

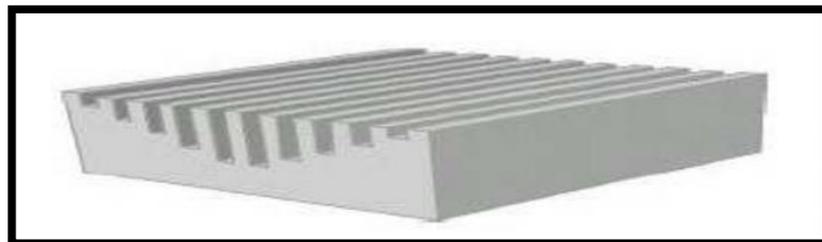


Figure II.13 : Réseau apodisé intégré dans un guide d'onde.

La (figure II.13) représente un réseau sur semi-conducteur présentant une apodisation, c'est à dire une variation de son coefficient de couplage le long de la structure. Cette variation est obtenue ici par une modification de la profondeur de gravure. [2]

**II.5.5-Réseau de Bragg échantillonné**

Un réseau échantillonné est un réseau classique dont on enlève périodiquement des portions. En d'autres termes, il s'agit d'une alternance entre des sections avec réseau et des sections sans réseau comme le décrit la figure

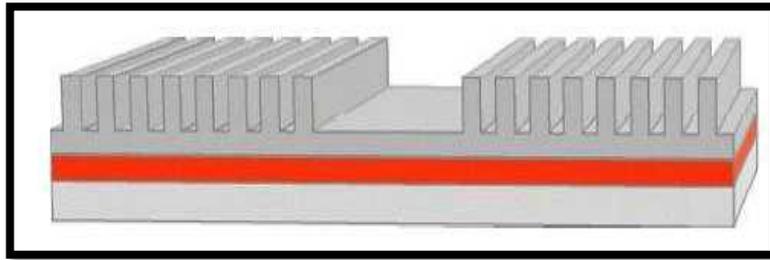


Figure II.14 : Réseau de Bragg échantillonné.

Comme le montre la figure le réseau échantillonné alterne de façon périodique des portions avec et sans réseau.

L'échantillonnage est obtenu en multipliant la modulation de l'indice de réfraction induite par le réseau par une fonction d'échantillonnage (figure II.15) :

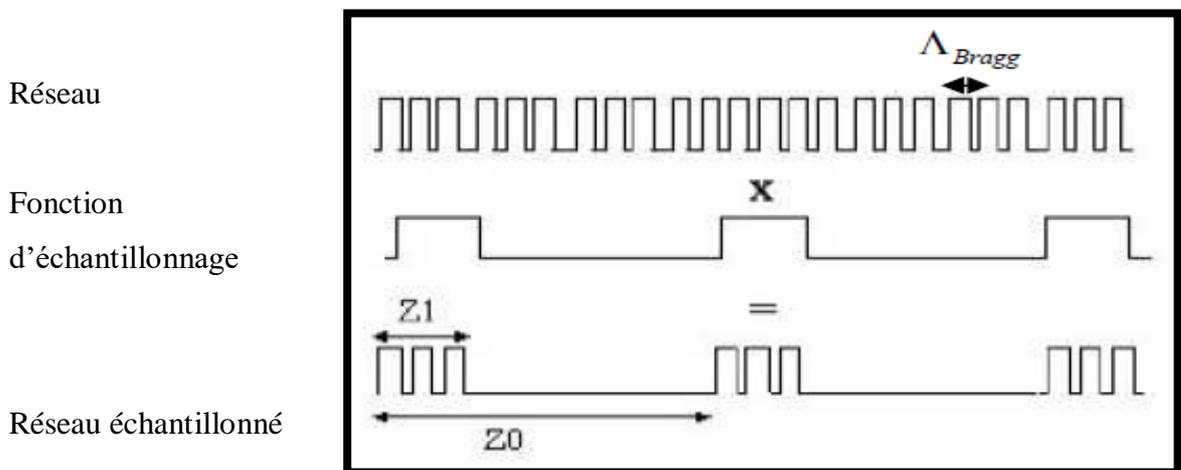


Figure II.15 : Principe de l'échantillonnage

Le réseau échantillonné est obtenu en multipliant une fonction d'échantillonnage et un Réseau [13].

**II.5.6- Réseau de Bragg à saut de phase**

L'insertion de saut de phase dans un réseau de Bragg introduit une résonance étroite à la longueur d'onde centrale, le réseau devient alors un filtre passe-bande très sélectif en longueur d'onde. En effet

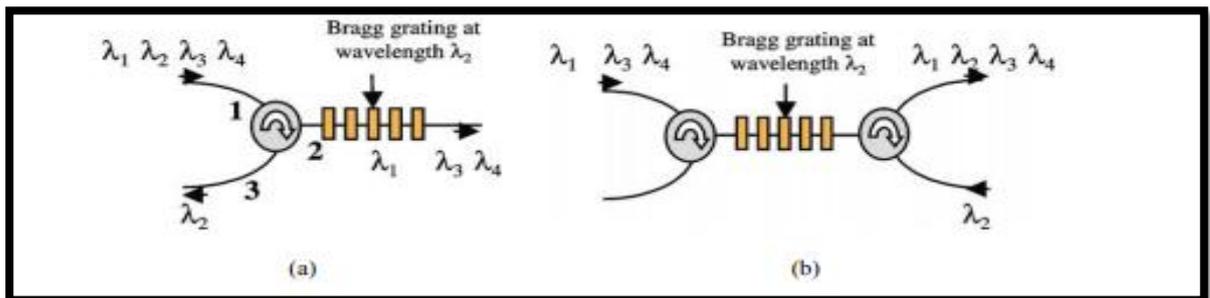
l'introduction d'un saut de phase de  $\lambda/4$  dans un réseau de Bragg correspond à l'insertion d'une section non modulée de longueur égale à  $\lambda/2$  au milieu de réseau.

En conséquence, l'évolution spatiale de la phase le long du réseau présente une rupture à la position du saut de phase et reste invariante ailleurs.

Cette rupture permet d'interpréter le réseau à saut de phase comme étant constitué de deux sous-réseaux adjacents, S1 et S2, séparés par le saut de phase. La distance entre les deux sous-réseaux  $\delta L$  créé par un saut de phase  $\phi$  est donnée par la relation suivante. [11]

### II.6.1. Application des réseaux de Bragg en télécommunication :

Les réseaux de Bragg photo inscrits dans les fibres optiques sont devenus indispensables pour l'égalisation du gain des amplificateurs, la stabilisation en longueur d'onde des pompes ou des sources, et pour les Lasers à fibre. Leurs avantages majeurs sont de faibles pertes d'insertion, une très faible sensibilité à la polarisation et une conception extrêmement flexible. Ces avantages en font également des candidats très attractifs pour les applications de filtrage complexe ou de compensation de dispersion chromatique fine.



**Figure II.16 :** (a) Filtre passe bande fabriqué par un réseau de Bragg associé avec un circulateur ; (b) un multiplexeur OADM fabriqué avec association d'un réseau de Bragg et deux circulateurs.

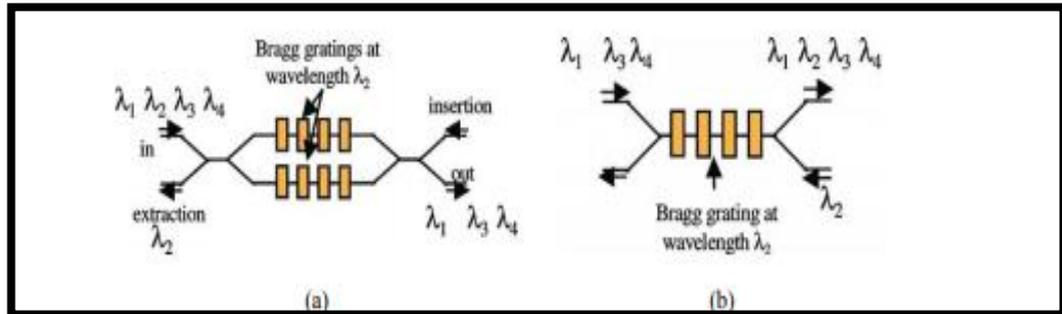
#### II.6.1.1-Filtrage et multiplexage

Agissant en tant que filtres sélectifs de longueur d'onde, les réseaux de Bragg uniformes de courtes périodes ont été visés la première fois vers des applications du filtrage et du multiplexage. Le coefficient de réflexion, est proportionnel à la transformée de Fourier du profil longitudinal de l'indice de réfraction. Le spectre du filtrage peut alors être obtenu, en ajustant la période du réseau et la variation de l'indice de réfraction, pour des rejets élevés, des canaux adjacents, formes rectangulaires, multi crête ...etc.

Aujourd'hui, les techniques avancées d'écriture des FBG permettent la réalisation de presque n'importe quelle forme spectrale désirée en contrôlant la réponse de la phase. Les réseaux de Bragg sur fibres sont donc d'excellents candidats pour les futurs systèmes WDM complexes

mais avec des filtres peu coûteux à adapter à cette conception. Un exemple de filtre déjà démontré contenant un espacement entre canaux de 25 ou de 12.5 GHz montrant simultanément des formes rectangulaires et une dispersion nulle.

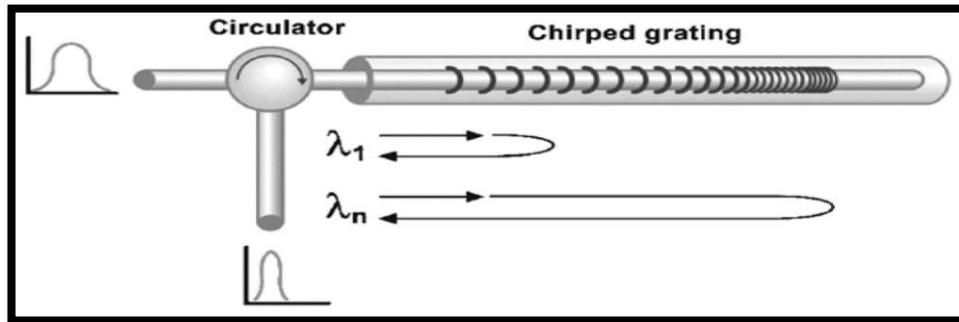
Le réseau de Bragg de périodes courtes réfléchit la lumière près de la longueur d'onde de Bragg et demeure transparente pour les autres. Pour être utilisés dans un réseau, le réseau de Bragg doit s'associer à un autre composant avec plusieurs entrées et sorties pour extraire le signal utile. [2]



**Figure II.17 :** (a) multiplexeur OADM basé sur un interféromètre Mach-Zehnder : deux réseaux de Bragg identiques sont photo imprimés à la longueur  $\lambda_2$  sur les deux bras de l'interféromètre. (b) multiplexeur OADM basé sur un coupleur 0% : le réseau de Bragg est photo imprimé à la longueur  $\lambda_2$  dans la région du couplage, la fonction d'insertion de  $\lambda_2$  est représenté.

### II.6.1.2-Compensation de la dispersion chromatique

Une autre application des RDB indispensable au bon transport de l'information est la compensation de la dispersion chromatique. En effet, une dispersion chromatique est observée lors de la propagation de la lumière sur de longues distances, ce qui limite le débit des données dans la fibre optique. L'information se propage sous forme d'un pulse gaussien qui s'étend sur plusieurs longueurs d'ondes. Ces dernières ne se propagent pas à la même vitesse dans la fibre optique, le signal va se déformer et une superposition des signaux peut ainsi être observée s'ils sont trop proches spatialement. Typiquement, dans une fibre optique monomode utilisée dans les télécommunications, la dispersion chromatique est de 17  $ps/(nm/km)$  pour des longueurs d'onde proches de 1550 nm. Cependant, il est possible de compenser cette dispersion avec à un RDB avec une période augmentant linéairement le long du réseau comme présenté sur la (**figure II.18**)



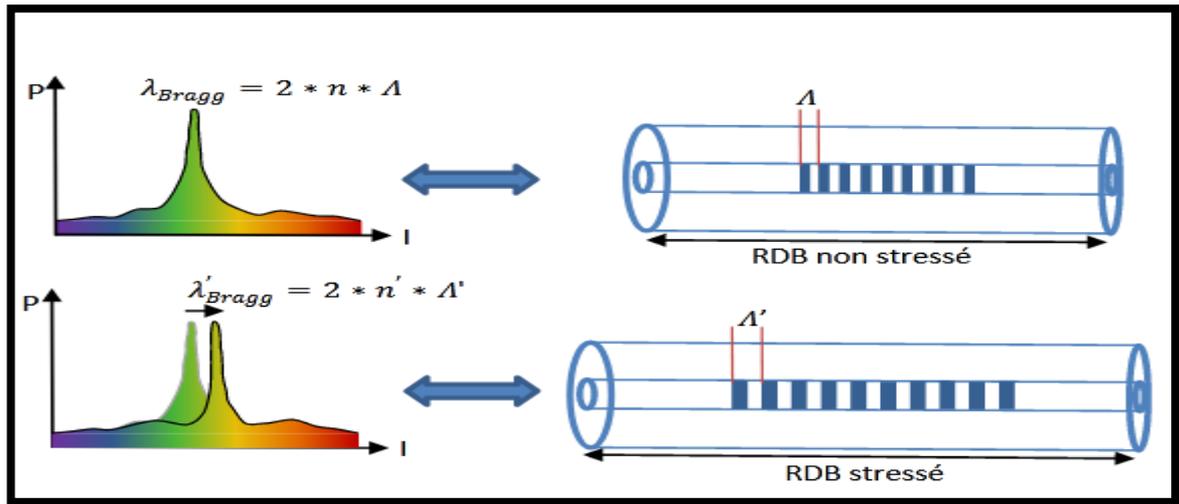
**Figure II.18:** Principe de la compensation de la dispersion chromatique.

Dans un tel réseau, chaque longueur d'onde va être réfléchiée par la section du réseau possédant la période adaptée selon la loi de Bragg. Ainsi, les longueurs d'onde plus courtes sont réfléchies par le début du réseau et donc en premier. Les longueurs d'onde plus élevées sont réfléchies par la fin du réseau provoquant un temps de retard. La dispersion de ce réseau est inversement proportionnelle à l'augmentation de la période (ou pas du réseau) et il devient ainsi possible de compenser la dispersion que le signal a subie dans la fibre sur de très longues distances. Cependant, un compromis doit être fait entre la dispersion et la quantité de longueurs d'onde pouvant être réfléchies (ou bande passante). Il sera démontré par la suite, que l'augmentation de l'un entraîne la diminution de l'autre.

### II.6.1.3- Senseurs

Une autre propriété des RDB permet d'obtenir des senseurs de température, de pression, vibrations, d'accélération, de champs électrique et magnétique et même aussi de réaction chimiques si celle-ci modifie l'indice de réfraction de la fibre

En effet, la longueur d'onde réfléchiée par un RDB est précisément liée à la période et à l'indice de réfraction de la fibre. Comme on peut le voir sur la (**figure II.19**), de faibles variations de ces deux paramètres auront une conséquence directe sur les propriétés optiques du RDB. Le senseur peut consister à envoyer un signal lumineux constant à l'aide d'un spectromètre et d'observer la position de la réflexion de Bragg.



**Figure II.19:** Effet du stress sur la réflexion d'un RDB.

Le décalage en longueur d'onde de la réflexion de Bragg est lié directement à la modification du réseau. Afin d'augmenter la sensibilité du senseur, il est possible d'utiliser des réseaux de Bragg à période variable et avec un décalage de phase au centre du réseau. Ce type de réseau exhibe une réflexion avec une perte abrupte de puissance lumineuse à une longueur d'onde précise. [12]

## II.6.2. Autres application de réseau de Bragg

### II.6.2.1- Les réseaux de Bragg dans l'aviation

Les réseaux de Bragg sont couramment utilisés dans l'aviation. Leur utilisation se fait à la fois lors des qualifications de l'avion, mais aussi de manière définitive lors de l'exploitation de celui-ci. Les photographies en (**figure II.20**) représentent une mesure de température réalisée par Airbus A380. Trois fibres optiques de 125 m équipées chacune de 13 réseaux de Bragg ont été utilisées. Ces mesures ont permis de réaliser une cartographie thermique autour de l'avion et ainsi de déterminer son périmètre de sécurité sur les aéroports.



**figure II.20:** Mesure de température autour d'un A380.

### **II.6.2.2- Les réseaux de Bragg dans l'automobile**

Les réseaux de Bragg ainsi que les fibres optiques sont employés depuis quelques décennies dans les domaines cités précédemment. Néanmoins on ne peut pas qualifier ces applications de grand public. Dans le domaine de l'automobile, les réseaux de Bragg peuvent être utilisés pour la qualification des processus et des véhicules, mais pas encore intégrés dans les véhicules de tourisme. Des études en cours permettent néanmoins d'envisager une réduction importante des coûts par le développement d'interrogateurs bas coûts. La fibre utilisée dans les voitures sert aujourd'hui essentiellement pour l'éclairage d'habitacle (fibre plastique) ou encore pour les systèmes multimédia. [2]

### **II.7.La théorie des modes couplés**

La théorie des modes couplés est une méthode générale. Elle est appliquée dans de nombreux domaines (optiques, mécanique, quantique...) où interviennent des propagations d'onde dans un milieu.

Pour appliquer la théorie des modes couplées dans le cas du réseau de Bragg, il faut considérer que la fibre est monomode, sans perte (conservation de l'énergie) et que l'interaction de la lumière à la longueur

d'onde de Bragg est le résultat seulement entre le mode qui se propage dans la fibre « copropagatif » et le mode « contrapropagatif » évoluant en sens inverse.[11]

La théorie des modes couplés est une approche très courante pour décrire les phénomènes physiques qui apparaissent dans les réseaux de Bragg. Le réseau est considéré comme une petite perturbation qui produit le couplage entre les modes aller et les modes retour se propageant dans la structure.

La méthode des modes couplés est une méthode précise, elle prend en considération les paramètres physiques qui apparaissent dans les réseaux de Bragg qui peuvent influencer sur le spectre ; comme la valeur du coefficient de couplage entre les modes aller et retour, la longueur du réseau, la forme du réseau etc ; elle prend en considération les échanges d'énergie entre les différents modes de propagation. [13]

## **II.8 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude des réseaux de Bragg dans un fibre optique .Les réseaux de Bragg sont des composants présents dans les systèmes de communication et sont des fibre idéaux, ils possèdent des caractéristiques élevées (grande flexibilité et conception) qui le rendent compatibles avec différentes applications .En effet, ils facilitent la satisfaction des besoins de l'utilisateur dans les systèmes de communication optique, tels que la compensation de la dispersion chromatique et multiplexage. Le réseau de Bragg joue un rôle important dans les futurs systèmes à capacité élevée nécessitant un contrôle tel que dispersion chromatique.

# Chapitre III

### III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'application du réseau de Bragg dans les fibres optiques et comment il affecte le signal dans la fibre, de sorte que notre application sera simulée par un logiciel appelé « optisystem ». A l'aide de ce logiciel on obtient une simulation innovante à la communication optique.

### III.2. Présentation du logiciel optisystem

Afin de réaliser le lien dans la chaîne de communication optique à grande vitesse, nous utilisons un programme qui a été développé par OptiWave, qui est un outil de simulation optique qui permet de tester, concevoir et d'améliorer tous les types de liens optiques, et a été créé pour répondre aux besoins des chercheurs, ingénieurs en communication optique, étudiants et un groupe d'autres pour les utilisateurs, c'est un produit autonome qui ne dépend pas d'autres cadres de simulation, ses capacités peuvent être facilement étendues avec l'ajout de composants d'utilisateur et peuvent être interfacées de manière transparente avec une large gamme d'outils. Optisystem répond aux exigences du marché en plein essor de la photonique pour un outil de conception de système optique puissant et facile à utiliser.

✚ L'interface graphique d'OptiSystem contient les fenêtres principales suivantes:[14]

- **Project layout (Présentation du projet)**
- **Dockers**
  - a - Component Library (Bibliothèque de composants)
  - b- Project Browser (Navigateur de projet)
  - c- La description

- **Status bar (Barre d'état)**

- **Présentation du projet**

La zone de travail principale dans laquelle vous insérez des composants dans la présentation, modifiez des composants et créez des connexions entre les composants.

- **Dockers**

Utilisez les dockers, situés dans la mise en page principale, pour afficher des informations sur le projet actif (en cours):

**a- Bibliothèque de composants:** Accédez aux composants pour créer la conception du système.

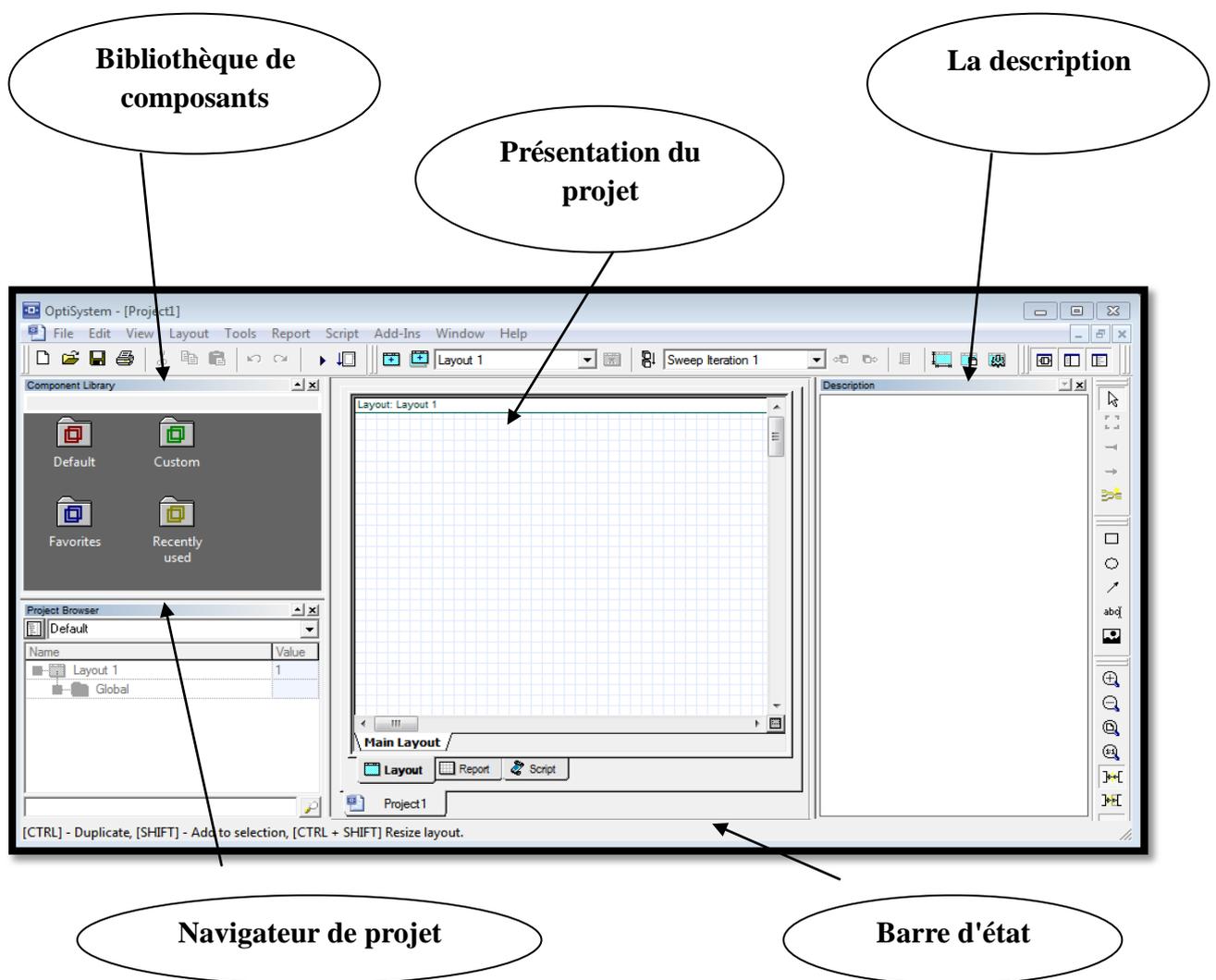
**b- Navigateur de projets:** Organisez le projet pour obtenir des résultats très efficaces et Project Browser répertorie les informations sur le projet, car il parcourt le projet en cours.

vous permet de sélectionner les informations visibles, calculées, utilisées dans les rapports et tracées dans les graphiques.

**c-La description** : Afficher des informations détaillées sur le projet en cours, le menu « Description », vous permet de développer une description détaillée du projet et des composants, y compris des informations techniques détaillées, pour que les autres puissent voir quand ils ouvrent le fichier de projet et utilisent OptiSystem.

- **Barre d'état**

Affiche des conseils utiles sur l'utilisation d'OptiSystem. Situé sous la fenêtre de disposition du projet.



**Figure III.1:** Interface utilisateur graphique (GUI) d'OptiSystem.

### III.3. Edition et simulation

Lors de la conception d'un « layout », il suffit de glisser le composant de la bibliothèque vers le « layout » pour le placer. « OptiSystem » permet aussi le paramétrage pour chaque composant défini dans le « layout ». En effet, un double-clic sur le composant permet l'affichage de ses paramètres. [15]

Par ailleurs, avant de lancer la simulation, le « layout » présente aussi des paramètres qu'on peut contrôler par un simple double-clic dans le layout.

- ✚ Pour lancer la simulation, il suffit de saisir ou bien en tapant simultanément Ctrl+F5 ou bien en accédant directement par le menu Fichier puis « Calculate ».

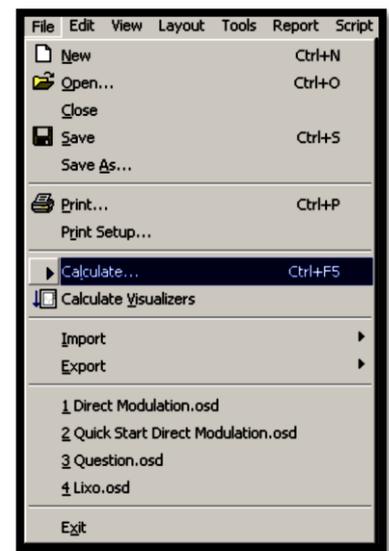
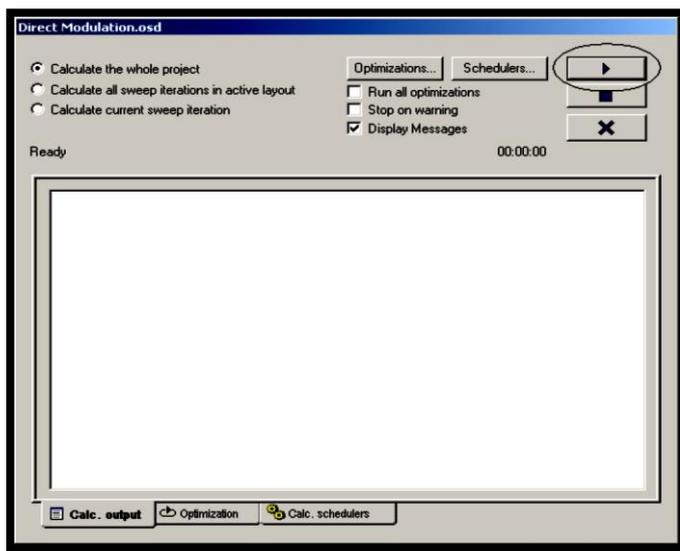


Figure III.2: Boîte de dialogue « Calculs » d'OptiSystem.

Figure III.3: Menu Fichier.

- ✚ Enfin, pour visualiser les diverses analyses, un double-clic sur l'appareil de mesure pour afficher la simulation en 2D ou en 3D.

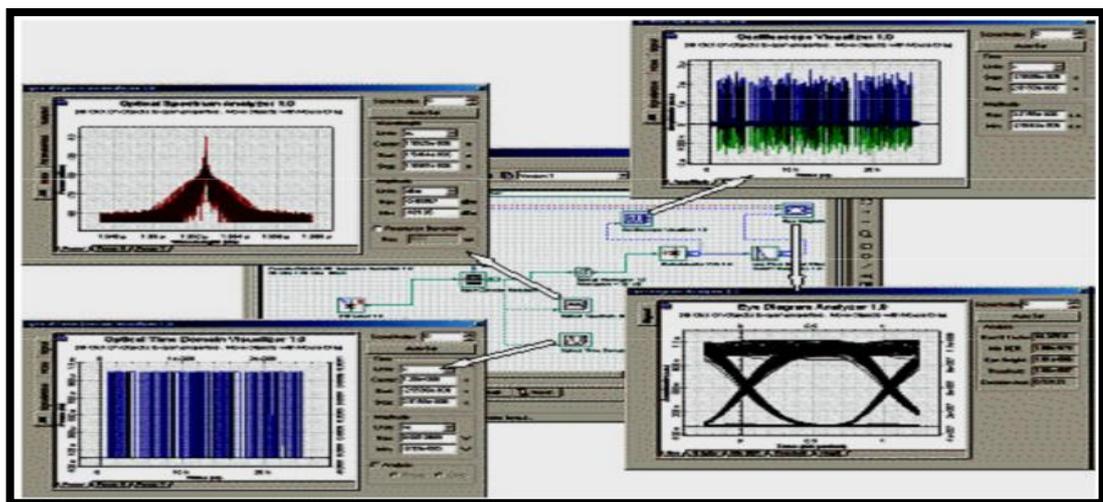


Figure III.4: Affichage des résultats de la simulation.

### **III.4. Les Avantages**

- Prototypage rapide et économique.
- Aperçu global des performances du système.
- Accès simple à vastes ensembles de données de caractérisation du système.
- Analyse et optimisation automatiques des paramètres.
- Évaluation des sensibilités des paramètres facilitant les spécifications de tolérance de conception.
- Réduction spectaculaire du risque d'investissement et du délai de mise sur le marché.
- Représentation visuelle des options de conception et des scénarios à présenter aux clients potentiels. [16]

### **III.5. Les Applications**

OptiSystem permet l'automatisation de la conception et l'application de n'importe quel type de liaison optique dans la couche physique, et l'analyse d'un large spectre de réseaux optiques, des systèmes longue distance aux MAN et LAN. [16]

La large gamme d'applications d'OptiSystem comprend:

- Conception du système de communication optique du niveau composant au niveau système au niveau de la couche physique.
- Conception de réseau CATV ou TDM / WDM.
- FTTx basé sur les réseaux optiques passifs (PON).
- Systèmes optiques en espace libre (FSO).
- Systèmes radio sur fibre (ROF).
- Conception de bague SONET / SDH.
- Conception de l'émetteur, du canal, de l'amplificateur et du récepteur.
- Conception de cartes de dispersion.
- Estimation du BER et des pénalités du système avec différents modèles de récepteurs.
- BER système amplifié et calculs de budget de liaison.

### **III.6. Résultats de simulation**

#### **III.6.1. Paramètres de qualité d'une liaison optique**

Pour mesurer la qualité de transmission optique afin d'évaluer le bon fonctionnement d'un système, trois critères principaux s'imposent : le facteur de qualité, le taux d'erreur binaire et le diagramme de l'œil. [17]

**a- Le facteur de qualité:**

Le facteur de qualité, appelé facteur Q, est un paramètre caractérisant la qualité d'un signal lors d'une transmission donné par la relation suivante :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\delta_1 - \delta_0} \quad (\text{Eq III.1})$$

Où  $I_1$  et  $I_0$  sont les valeurs moyennes des photocourants du symbole 1 et 0,  $\delta_1$  et  $\delta_2$  sont les racines carrées des variances des densités de probabilité des symboles 1 et 0.

La mesure expérimentale du facteur Q d'un signal est difficile c'est-à-dire  $I_1$ ,  $I_0$ ,  $\delta_1$  et  $\delta_2$ , ne sont souvent pas directement mesurables.

Afin de résoudre ce problème, on peut utiliser la relation du TEB (Taux D'erreur Binaire) optimal en fonction du facteur Q à condition des distributions gaussiennes de probabilités des niveaux du signal :

$$\text{TEB} = \frac{1}{2} [\text{erfc} (Q/\sqrt{2})] \quad (\text{Eq III.2})$$

Avec **erfc** est la fonction d'erreur complémentaire.

**b- Le taux d'erreur binaire:**

Une transmission de données numériques dans un système de communication est une succession de 0 et de 1, pour évaluer la performance de celui-ci, il est nécessaire de faire une comparaison entre les bits transmis et celui reçus autrement dit le taux d'erreur binaire (BER) qui fait le rapport entre le bit reçu et bit erroné. Le « 1 » est détecté parfois en lieu et à la place d'un « 0 » réciproquement dû à la déformation du signal sous l'effet du bruit et de la propagation. La probabilité d'une prise de décision erroné sur un l'élément binaire est définie par BER, tel :

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombre de bit erroné}}{\text{Nombre de bit transmis}} \quad (\text{Eq III.3})$$

Un système est suivant considéré de bonne qualité en transmission optique si ce BER est inférieur à une valeur de  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$  ou  $10^{-15}$ .

**c- Le diagramme de l'œil:**

Le diagramme de l'œil représente la superposition synchrone de tout le symbole binaire de la séquence transmise pour estimer la qualité d'un signal d'une manière visuelle (**voir figure III.5**).

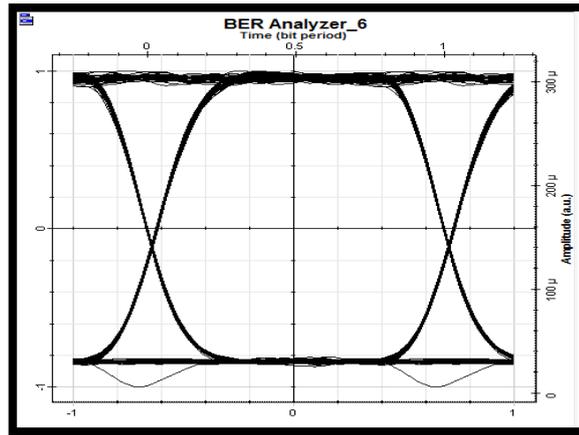


Figure III.5: Diagramme de l'œil.

Ce diagramme est caractérisé par :

- ✓ L'élargissement temporel des impulsions du signal dû à la dispersion chromatique causé par les interférences entre les symboles.
- ✓ Gigue temporelle provoqué par la dispersion et couplage entre les impulsions et le bruit d'émission amplifiée.
- ✓ Dans la liaison, le bruit d'amplitude qui résulte de l'accumulation du bruit d'émission amplifiée sur signal tout au long de son parcours.[17]

### III.6.2. Système de communication à base de fibre optique

Les systèmes de communication avancés nécessitent une large bande passante, des données élevées et une vitesse élevée vers une autre destination. Le système de communication à fibre optique tel que représenté sur la (figure III.6) est l'un des liens les plus importants qui utilisent le support à fibre optique dans le système de communication.

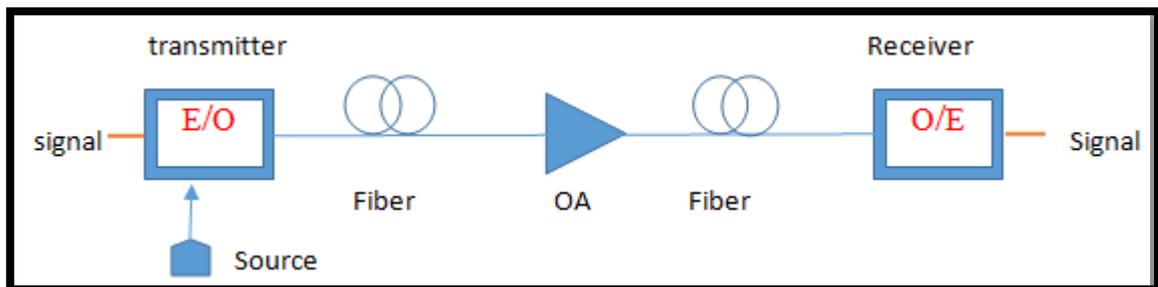
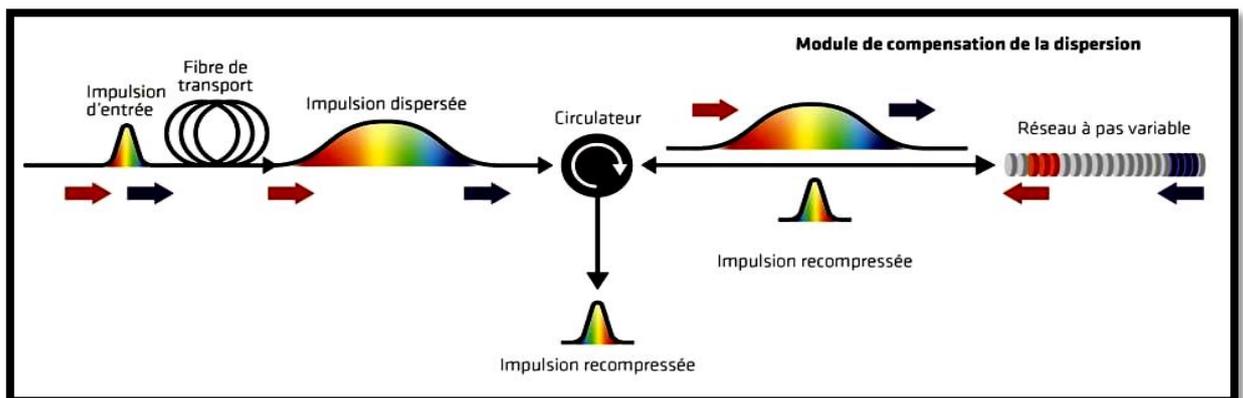


Figure III.6 : Système de communication à base de fibre optique [18].

Bien que de nombreux avantages ci-dessus de la communication par fibre optique, la dispersion est le principal facteur limitant les performances. Le réseau de Bragg à fibre avec amplificateurs est équipé pour la conception des systèmes de communication optique à longue distance, grâce à le coût faible du filtre pour la longueur d'onde sélectionnée et les

pertes d'insertion minimisées, en plus grâce à son spectre de réflexion personnalisé et sa large bande passante [19]. La fibre à dispersion compensée (DCF) est une méthode efficace pour mettre à niveau les liaisons par fibre monomode. Cependant, la limitation de l'utilisation de la transmission de lumière sur le composant (DCF) est due à la puissance d'entrée optique, où les dégradations non linéaires créeront une perte d'insertion élevée sur la liaison [20]. Le réseau de Bragg à fibre (FBG) fournit la dispersion pour la transmission à longue distance avec le facteur de gain obtenu. Une caractéristique importante du (FBG) en tant que compensateur de dispersion, comme une non-linéarité négligeable, une petite taille et une faible perte d'insertion, peut éventuellement avoir un impact sur les performances du système en augmentant la capacité du réseau de fibre à longue distance. L'utilisation d'un (FBG) peut facilement avoir un impact sur les performances du système [21]. La simulation du système de fibre optique a été discutée en analysant les valeurs et en évaluant la qualité à travers le BER (Bit Error Rate). Ce paramètre est le rapport entre le nombre de bits avec des erreurs et le nombre total de bits transmis pendant un espace de temps étudié, qui a été étudié en utilisant différents paramètres. [22]

Les réseaux de Bragg, à pas variable ou non, sont très utiles : ils compensent ou intensifient la dispersion chromatique en reflétant diverses longueurs d'onde à différents points de la fibre. Ceux à pas variable peuvent réfléchir le rouge avant ou après le bleu selon le résultat souhaité : s'il est réfléchi avant, le rouge peut rattraper le bleu, et l'impulsion se recomprime; s'il est réfléchi après, l'impulsion s'étire davantage.



**Figure III.7:** Compression et étirement des impulsions au moyen des réseaux de Bragg.

### III.6.3. Réseau de Bragg à fibre (FBG) modèle de compensation de dispersion

Le modèle illustre comment compenser la dispersion des fibres à l'aide du composant de réseau de Bragg à fibre. Ici, le composant de fibre de compensation à un réseau de Bragg avec

des indices de réfraction différents, qui donnent des vitesses différentes pour différents modes de signaux lumineux afin de compenser le retard entre deux modes différents. [19]

La longueur d'onde de Bragg varie le long de la longueur du réseau de sorte que différentes composantes de fréquence du faisceau incident sont réfléchies. [23]

$$\lambda_B = 2 n \Lambda \quad (\text{Eq III.4})$$

La dispersion du réseau,  $D_g$ , est exprimée par

$$D_g = 2 n / c (\Delta\lambda) \quad (\text{Eq III.5})$$

Où  $n$  est l'indice de mode moyen,  $\Delta\lambda$  est la largeur de bande du réseau et  $c$  est la vitesse de la lumière.

### III.6.4. Etapes de simulation du système de communication à base de réseau de Bragg à fibre optique

La première étape de la conception d'un système de communication optique consiste à décider comment le signal électrique serait converti en un train de bits optiques.

Normalement, la sortie d'une source optique telle qu'un laser à semi-conducteur est modulée en appliquant le signal électrique directement à la source optique ou à un modulateur externe.

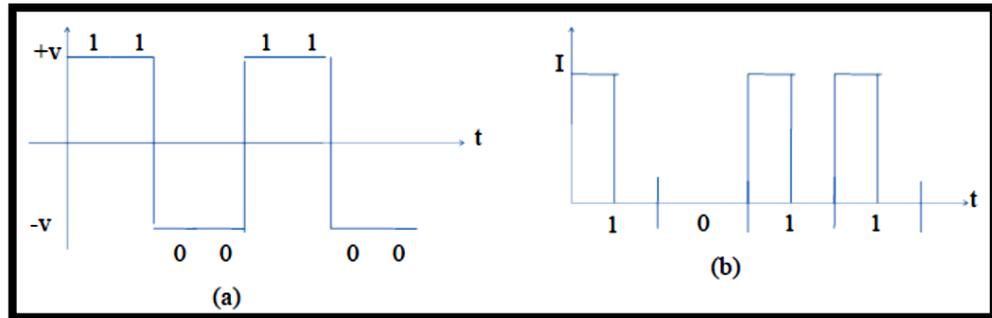
Il y a deux choix pour le format de modulation du train de bits optique résultant. Ceux-ci sont connus comme les formats de retour à zéro (RZ) et de non-retour à zéro (NRZ).

Les systèmes de transmission par fibre optique sont conçus pour faire propager une séquence de données binaires « 1 » et « 0 » par voie optique, cette séquence est d'abord sous la forme d'un signal électrique. La forme de ce dernier, en termes d'amplitude et de phase, est appelée format de modulation. Le format de modulation le plus simple est le format OOK (On/Off Keying), et il repose sur le principe d'une modulation de l'amplitude du signal électrique. Ainsi, un minimum d'amplitude correspond au bit « 0 », et un maximum d'amplitude correspond à un bit « 1 ».

Pour une séquence temporelle donnée, et donc une succession de bits, il existe deux manières de moduler les impulsions d'un format de modulation donné: la technique de retour à zéro (RZ, Return-to-Zéro), et la technique de non-retour à zéro (NRZ, Non-Return-to-Zéro) [24].

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

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



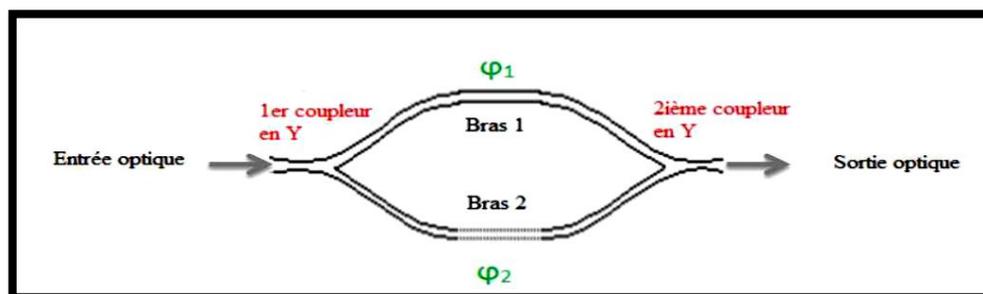
**Figure III.8:** (a) format NRZ (b) format RZ.

Dans notre travail sur Fibre on n'utilise que le format NRZ, sachant qu'avec le format RZ on n'obtient pas de bons résultats.

Le signal NRZ électrique code le signal optique grâce à un modulateur d'intensité de type interféromètre de Mach-Zehnder (MZI). Le signal en sortie est un signal NRZ optique modulé en intensité au débit des données [25].

Dans notre étude, la partie émission est composée principalement des lasers qui fonctionnent en régime continu (CW-Laser), des modulateurs externes. Les modulateurs externes sont eux aussi composés de générateurs binaires (PRBS ou Pseudo-Random Binary Sequence), de générateurs NRZ et de modulateurs Mach-Zehnder.

La modulation par Mach-Zehnder (MZI) est la mise en série de deux coupleurs entre lesquels on introduit un déphasage commandé par une tension électrique [26].



**Figure III.9:** Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder [27].

La technique utilisée pour moduler l'amplitude d'un faisceau consiste à lui faire traverser un interféromètre de Mach-Zehnder dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras [27].

La lumière est couplée dans deux guides par un coupleur en Y. Les deux faisceaux se recombinaison ensuite dans un deuxième coupleur en Y. L'indice de réfraction du matériau électro-optique, placé sur l'un des bras de l'interféromètre (ou même sur les deux bras), est modifié par l'application d'une tension, entraînant ainsi un déphasage entre les deux faisceaux.

Suivant leur différence de marche (ou phase relative), les deux faisceaux interfèrent de manière constructive (dans ce cas on retrouve toute la puissance optique disponible en sortie) ou destructive (dans ce cas aucune lumière n'est injectée dans le guide de sortie) [27].

Les composants utilisés sont: Pseudo - Bit aléatoire pour brouiller le signal de données en termes de bits aléatoires de séquence (0 ou 1), générateur d'impulsions NRZ pour contrôler la bande passante, (MZ) Mach Zender - Modulateur qui a deux entrées (optique et électrique) et le signal de sortie est optique, utilisée pour moduler le signal laser d'entrée (CW). Une diode laser (CW) utilisée pour générer des signaux optiques de longueur d'onde de 1550 nm (fréquence  $f=193.1$  THz,  $f=c/\lambda \Rightarrow \lambda =c/f \Rightarrow \lambda=3*10^8 / 193.1*10^{12} =1.55*10^{-6} m=1550nm$ ). Avec une puissance d'entrée de 10 dBm. Une fibre optique monomode utilisée comme liaison de transmission pour un débit de données plus élevé et moins de dispersion sur une longue distance avec un coefficient d'atténuation à une section de câble de 0,2 dB / km. Le réseau de Bragg à fibre (FBG) est utilisé comme compensateur de dispersion. (EDFA) amplificateur à fibre est utilisé pour amplifier le signal optique et surmonter les pertes de fibre avant la réception par la partie récepteur, qui comprend un photodétecteur (PIN) pour convertir le signal optique en un signal électrique. Enfin, un analyseur de spectre optique (OSA) utilisé pour la surveillance des signaux de sortie après chaque composant. En outre, différents instruments de mesure utilisés tels que le wattmètre, l'analyseur de spectre optique, l'analyseur (BER) et l'analyseur de diagramme de l'œil.

### III.6.5.Simulation 1 : réseau de Bragg à pas variable

Cette simulation démontre la possibilité de compensation de dispersion à l'aide du réseau de Bragg à fibre. Ce composant permet la conception de réseaux de fibres apodisés et chirpé (à pas variable) qui sont capables de fournir une compensation de dispersion dans le système optique. L'idée physique derrière de cette compensation est la suivante: la création d'un réseau chirpé et apodisé linéairement, nous permet de créer un retard entre les différentes composantes spectrales du signal.

Par exemple, dans SMF (single mode fiber) à 1,55  $\mu m$ , la dispersion de vitesse de groupe crée un gazouillis négatif des impulsions, ce qui signifie que les fréquences les plus élevées (qui se propagent plus rapidement) sont dans la partie avant de l'impulsion et la plus basse (se propageant plus lentement) dans l'arrière.

En raison de cette vitesse différente de propagation des différentes composantes spectrales, l'impulsion se propage. Si nous créons un réseau à fibres avec une période diminuant linéairement le long du réseau, parce que les fréquences plus élevées se refléteront après une

propagation plus longue dans le réseau, un délai entre les composantes de fréquence inférieure et supérieure apparaîtra qui est juste opposé à celui créé dans le SMF. Par conséquent, propager et refléter notre poulx dans cet appareil permettra de compenser l'élargissement de la dispersion.

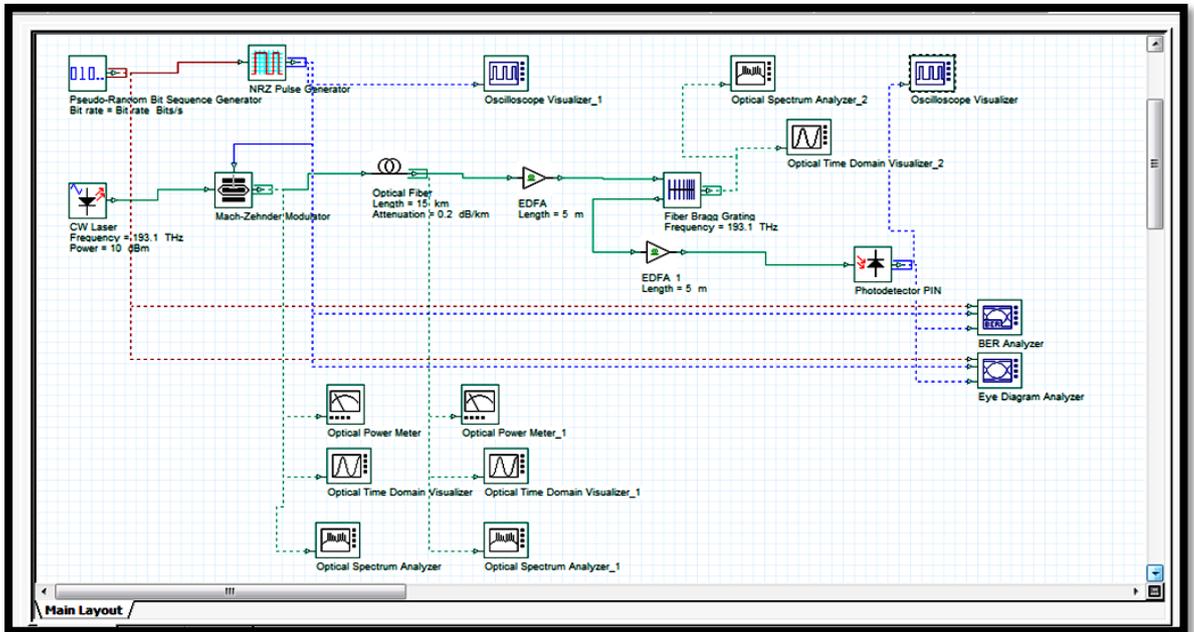
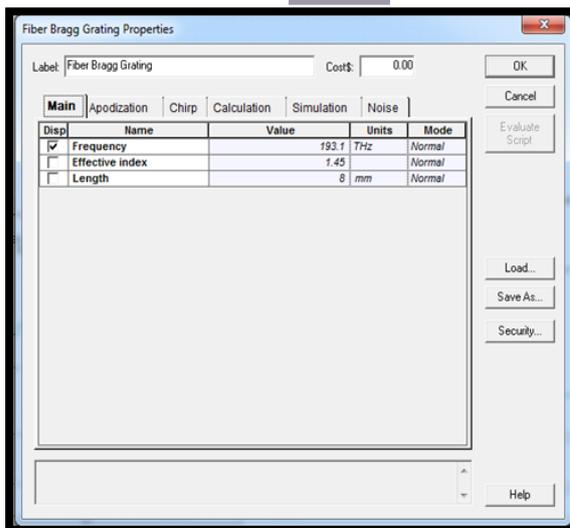


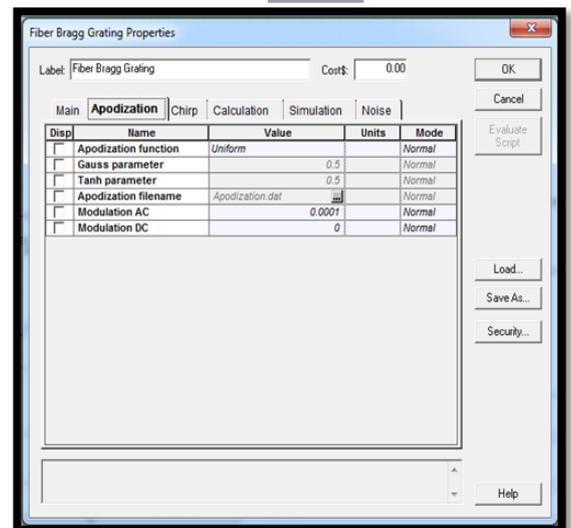
Figure III.10: Schéma du réseau Bragg à pas variable à fibre optique (fibre Bragg grating).

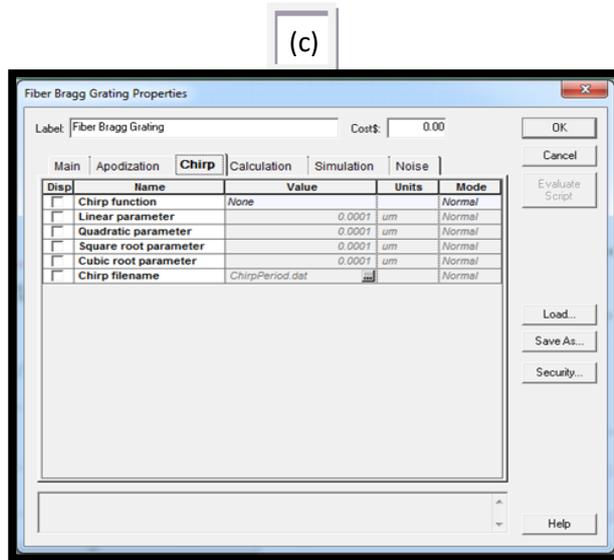
Les propriétés de ce réseau dont l'apodization et le pas (chirp) sont représentées dans la figure suivante telle que l'apodization est uniforme tandis que le pas ou la période est varié par  $0.0001\mu\text{m}$ , afin de compenser la dispersion du signal le long de la fibre optique.

(a)



(b)





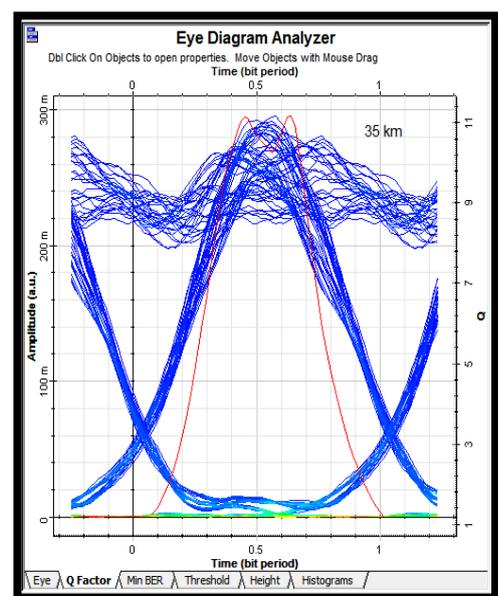
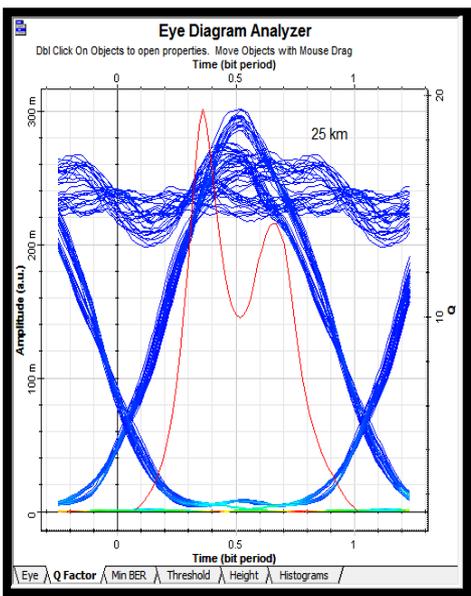
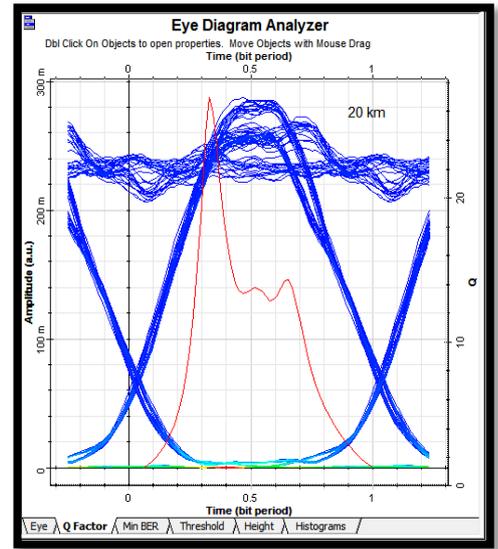
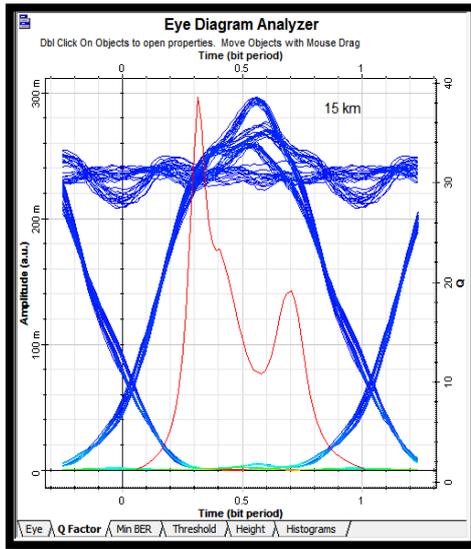
**Figure III.11:** (a, b et c) propriétés du réseau Bragg à pas variable à fibre optique (fibre Bragg grating).

Les résultats de simulation sont indiqués dans le (tableau III.1) et la figure à différentes longueurs de la fibre optique, le diagramme de l'œil s'est amélioré plusieurs fois comme le montre la figure pour la variation de la longueur qui s'étend du 15Km jusqu'à 75 Km.

| Power (cw laser) | Length Optical fibre | Length fibre Bragg grating | Optical power meter before optical fibre | Optical power meter after optical fibre | Min BER           | Max Q factor |
|------------------|----------------------|----------------------------|--|---|-------------------|--------------|
| 10 dbm           | 15 km                | 8 mm                       | $4.766e^{-3}w$                           | $2.389e^{-3}w$                          | 0                 | 38.5341      |
| 10 dbm           | 20 km                | mm8                        | $4.766e^{-3}w$                           | $1.897e^{-3}w$                          | $2.26157e^{-160}$ | 26.9497      |
| 10 dbm           | 25 km                | 8 mm                       | $4.766e^{-3}w$                           | $1.507e^{-3}w$                          | $5.59276e^{-084}$ | 19.3709      |
| 10 dbm           | 35 km                | mm8                        | $4.766e^{-3}w$                           | $950.961e^{-6}w$                        | $2.64098e^{-029}$ | 11.1533      |
| 10 dbm           | 50 km                | mm8                        | $4.766e^{-3}w$                           | $476.609e^{-6}w$                        | $2.82572e^{-016}$ | 8.07875      |
| 10 dbm           | 75 km                | mm8                        | $4.766e^{-3}w$                           | $150.717e^{-6}w$                        | $2.40108e^{-009}$ | 5.85145      |

**Tableau III.1:** résultats du réseau Bragg à pas variable à fibre optique (fibre Bragg grating).

Le « Eye Diagramme Analyzer » représente l'évolution du facteur de qualité Q et du diagramme d'œil selon une variation de distance comme le montre des figures suivantes:



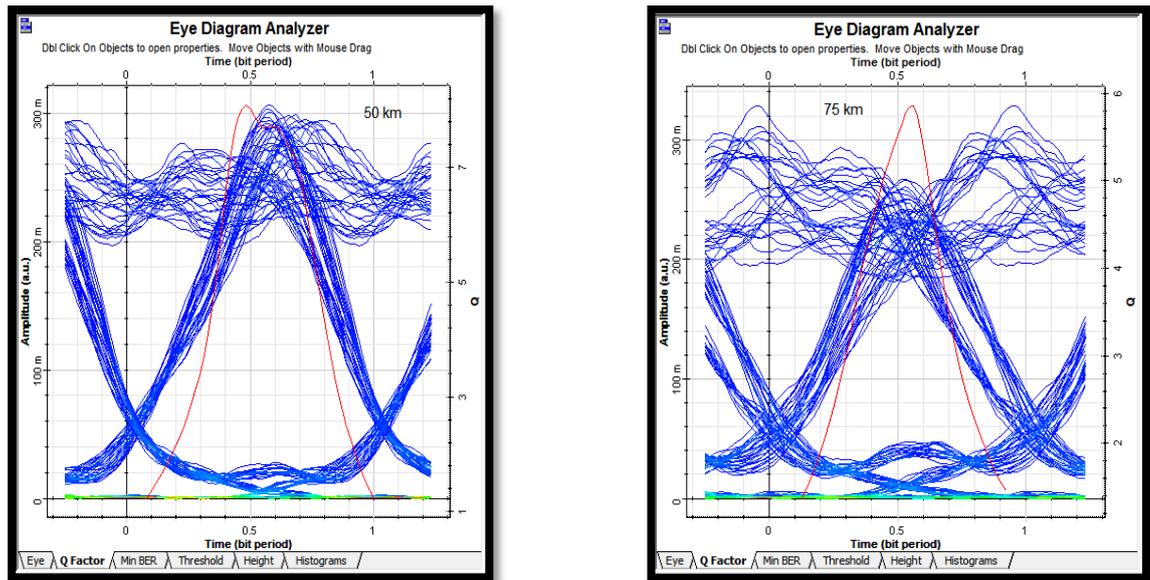


Figure III.12 : Diagramme de l'œil du réseau de Bragg à pas variable avec la variation de la distance.

- ✚ Notez que lorsque la distance de la fibre optique augmente, le facteur de qualité diminue et la valeur de BER change. à la distance 15 km nous enregistrons la valeur la plus élevée pour le facteur de qualité et la valeur de BER est nulle.

### III.6.6. Simulation 2 : réseau de Bragg avec une compensation de dispersion idéale

Dans cette simulation on utilise les mêmes composants de la première simulation, on change seulement le type réseau de Bragg par un autre type. Qui est le réseau de Bragg avec une compensation de dispersion idéale (idéal Dispersion compensation FBG) (Dispersion =  $-350$  ps / nm et fréquence =  $193.1$  THz).

Après 10 km de propagation en SMF, la dispersion accumulée est de  $350$  ps / nm. Afin de compenser cette dispersion accumulée, l'option correspondante Dispersion dans l'onglet Principal du composant Compensation de dispersion idéale est fixée à  $-350$  ps / nm.

Le résultat de la compensation de dispersion effectuée avec le réseau de Bragg de compensation de dispersion idéale est illustré à la **figure III.13**.

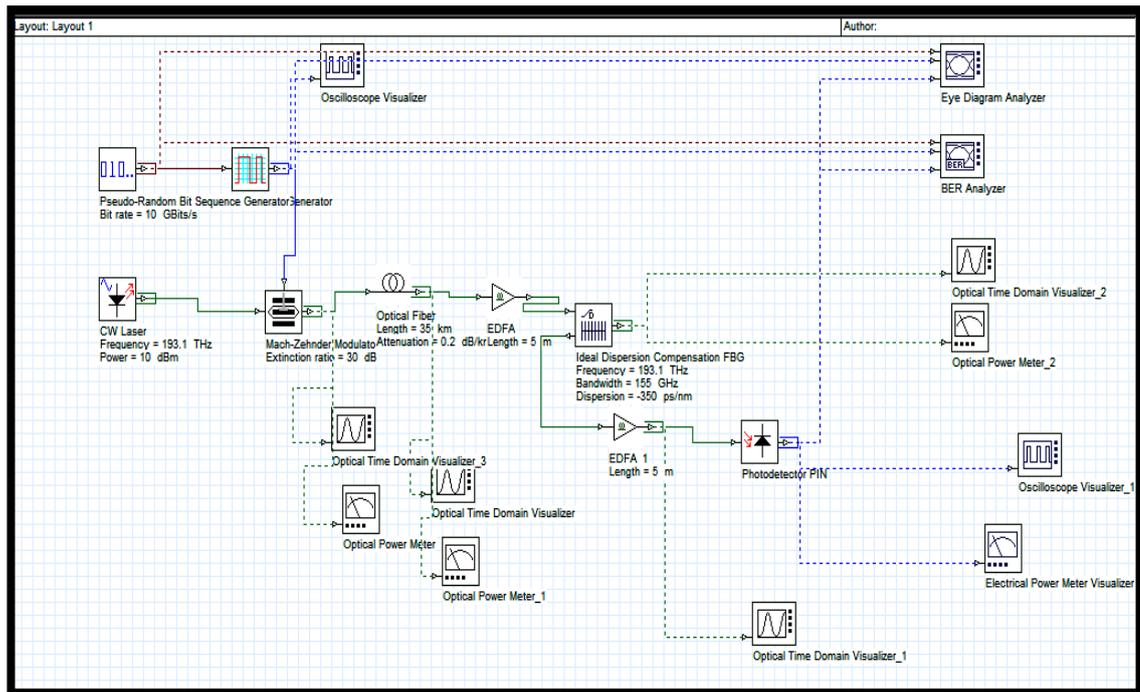
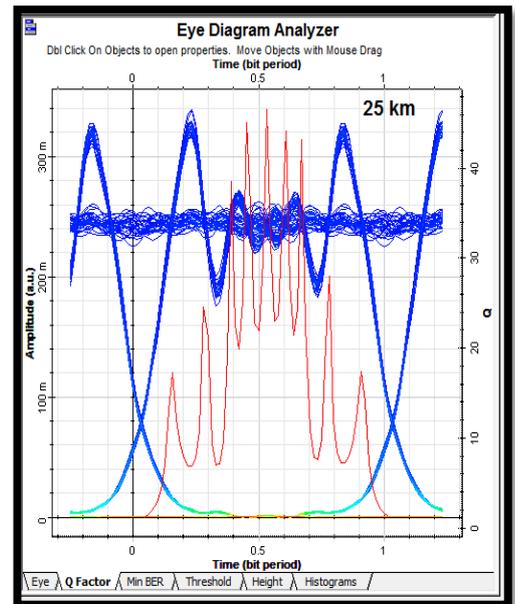
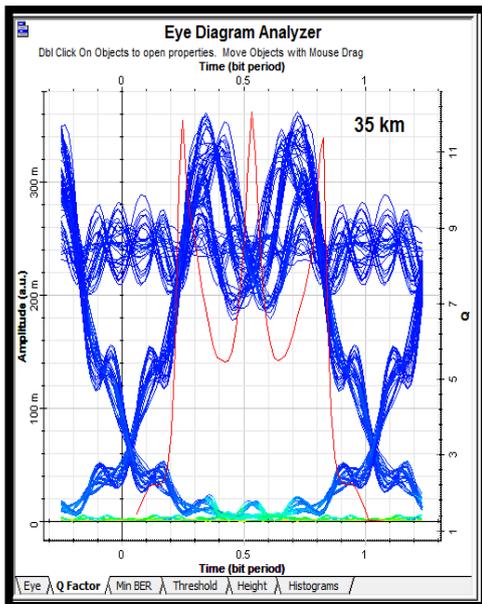
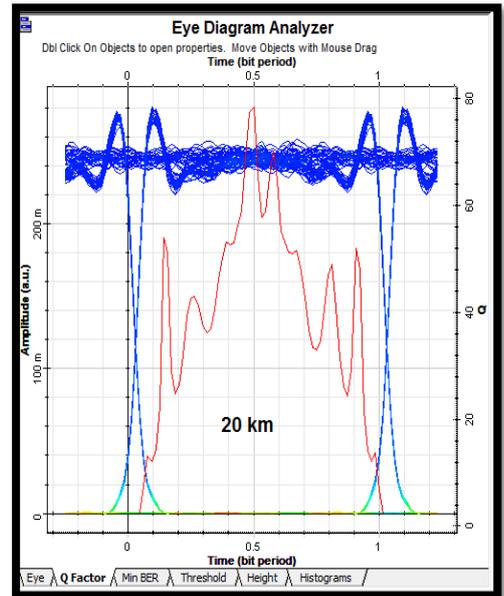
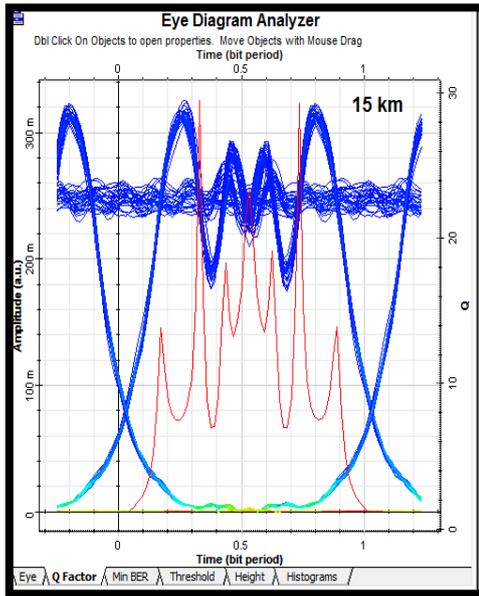


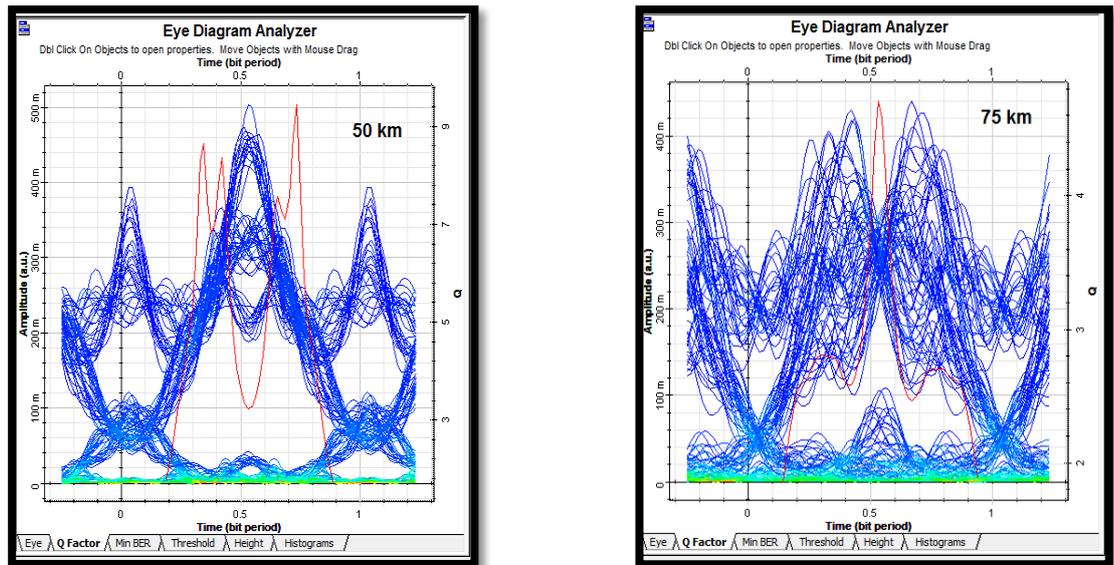
Figure III.13: réseau de Bragg avec une compensation de dispersion idéale (ideal Dispersion compensation FBG).

| Power (cw laser) | Length Optical fibre | Bandwith FBG (GHz) | Optical power meter before optical fibre | Optical power meter after optical fibre | Min BER            | Max Q factor |
|------------------|----------------------|--------------------|--|---|--------------------|--------------|
| 10 dbm           | 15 km                | 155                | $4.766e^{-3}w$                           | $2.389 e^{-3}w$                         | $5.09 e^{-191}$    | 29.4479      |
| 10 dbm           | 20 km                | 155                | $4.766e^{-3}w$                           | $1.897 e^{-3}w$                         | 0                  | 78.3423      |
| 10 dbm           | 25 km                | 155                | $4.766e^{-3}w$                           | $1.507 e^{-3}w$                         | 0                  | 46.4846      |
| 10 dbm           | 35 km                | 155                | $4.766e^{-3}w$                           | $950.961 e^{-6}w$                       | $8.417 e^{-034}$   | 12.054       |
| 10 dbm           | 50 km                | 155                | $4.766e^{-3}w$                           | $476.609 e^{-3}w$                       | $1.60766 e^{-021}$ | 9.4327       |
| 10 dbm           | 75 km                | 155                | $4.766e^{-3}w$                           | $150.717 e^{-3}w$                       | $1.27766 e^{-006}$ | 4.7036       |

Tableau III.2 : résultats du réseau de Bragg avec une compensation de dispersion idéale (idéal Dispersion compensation FBG).

Le « Eye Diagramme Analyzer » représente l'évolution du facteur Q et du diagramme de l'œil selon une variation de distance comme le montre des figures suivantes:





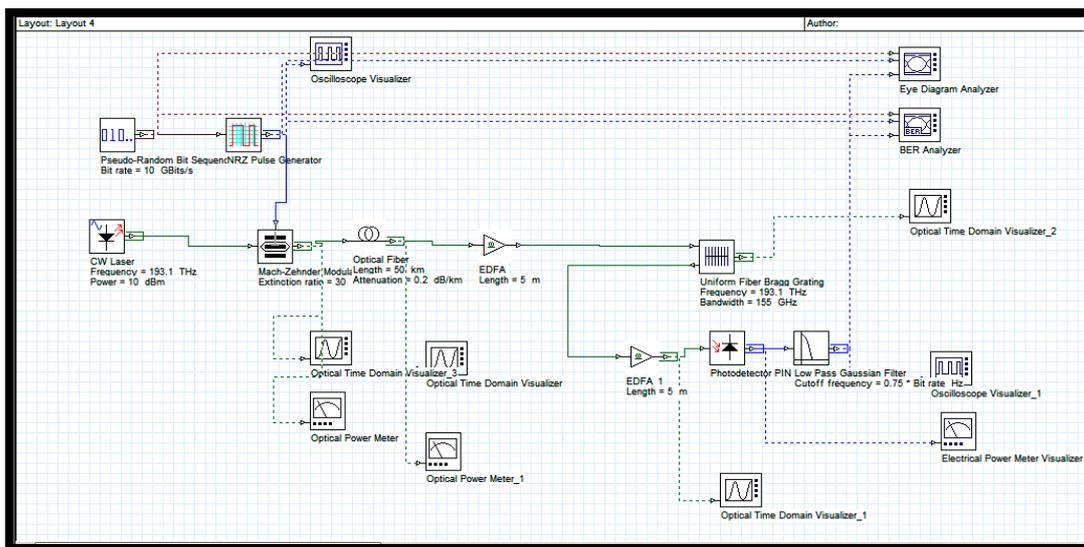
**Figure III.14:** Diagramme de l’œil du réseau de Bragg avec une compensation de dispersion idéale (idéal Dispersion compensation FBG) avec la variation de la distance.

✚ Notez qu’à certaines distances entre l’émetteur et le récepteur (20Km-25Km), le facteur de qualité de réception est une bonne valeur, et la valeur de la BER est nulle.

### III.6.7.Simulation 3 : réseau de Bragg uniforme

Dans cette simulation on change seulement le réseau de Bragg, on utilise ici le réseau de Bragg uniforme. La fréquence utilisée  $f = 193.1 \text{ THz}$  c.-à-d. la Longueur d’onde égale à  $1550 \text{ nm}$  ( $f = c/\lambda \Rightarrow \lambda = c/f \Rightarrow \lambda = 3 \cdot 10^8 / 193.1 \cdot 10^{12} = 1.55 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1550 \text{ nm}$ ).

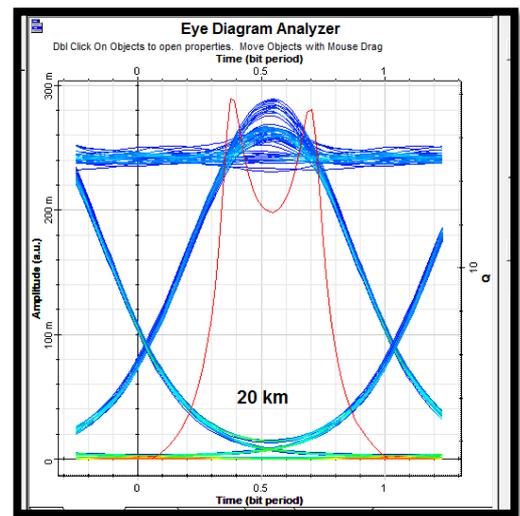
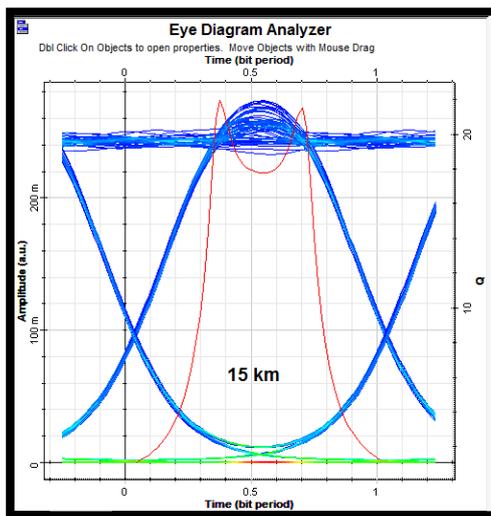
**et un filtre passe bas (Low pass gaussien filter):** du type Bessel permettant d’extraire l’information utile d’une fréquence de coupure  $= 0.75 \cdot \text{symbole rate}$  (taux du symbole).

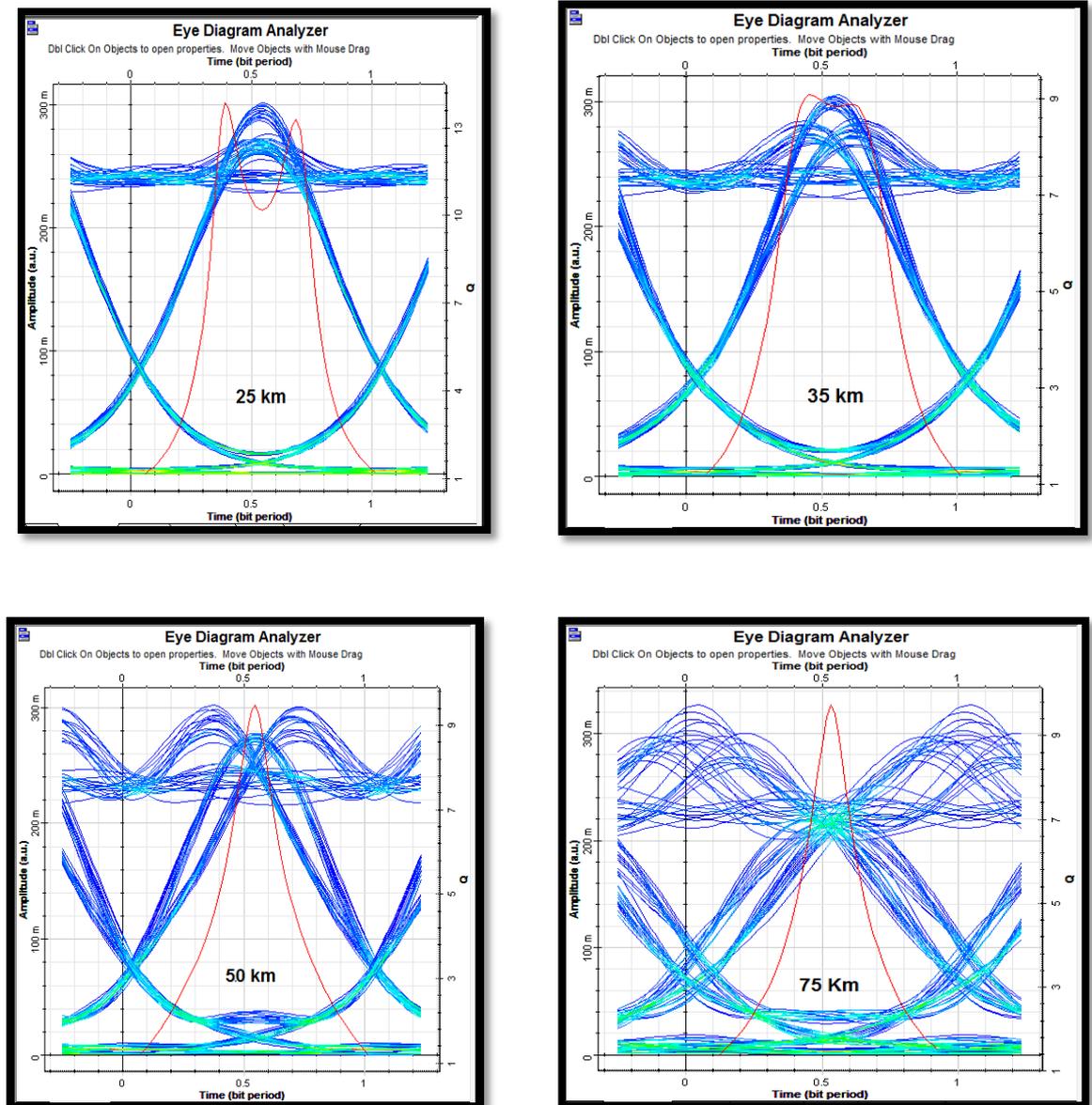


**Figure III.15:** réseau de Bragg uniforme à fibre optique (Uniform Fibre Bragg grating).

| power (dBm) | Length fibre optique (Km) | Bandwith (GHz) | Optical power meter before optical fibre | Optical power meter after optical fibre | Min BER        | Q factor |
|-------------|---------------------------|----------------|--|---|----------------|----------|
| 10          | 15                        | 155            | $4.844e^{-3}$                            | $2.428e^{-3}$                           | $6.3e^{-107}$  | 21.9296  |
| 10          | 20                        | 155            | $4.844e^{-3}$                            | $1.928e^{-3}$                           | $5.4e^{-071}$  | 17.7744  |
| 10          | 25                        | 155            | $4.844e^{-3}$                            | $11.53e^{-3}$                           | $7.54e^{-044}$ | 13.8377  |
| 10          | 35                        | 155            | $4.844e^{-3}$                            | $966.517e^{-6}$                         | $5.21e^{-020}$ | 9.0733   |
| 10          | 50                        | 155            | $4.844e^{-3}$                            | $484.406e^{-6}$                         | $1.39e^{-021}$ | 9.46943  |
| 10          | 75                        | 155            | $4.844e^{-3}$                            | $153.183e^{-6}$                         | $1.21e^{-022}$ | 9.72005  |

Tableau III.3 : résultats du réseau de Bragg uniforme à fibre optique (Uniform Fibre Bragg grating).





**Figure III.16 :** Diagramme de l'œil réseau de Bragg uniforme à fibre optique (Uniform Fibre Bragg grating) avec la variation de la distance.

- ✚ Nous remarquons dans cette simulation que lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente, le facteur de qualité de réception diminue dans des proportions proches, tandis que les meilleures valeurs de la BER augmentent avec l'augmentation de la distance.

### III.6.8.Simulation 4 : réseau de Bragg avec OptiGrating

Dans cette simulation on change seulement le réseau de Bragg, on utilise les outils de logiciel optiwave (OptiGrating) à la place de réseau de Bragg uniforme (simulation 3), un amplificateur optique (optical amplifieur) et un filtre gaussien passe-bas (low pass gaussian filter).

La différence entre uniforme Fiber Bragg grating (simulation 3) et OptiGrating (cette simulation) réside dans les dimensions de chacun tel que réseau de Bragg à fibre ne possède aucun substrat, il intègre directement dans la fibre, tandis que OptiGrating possède un substrat, il est considéré comme un réseau de Bragg planaire.

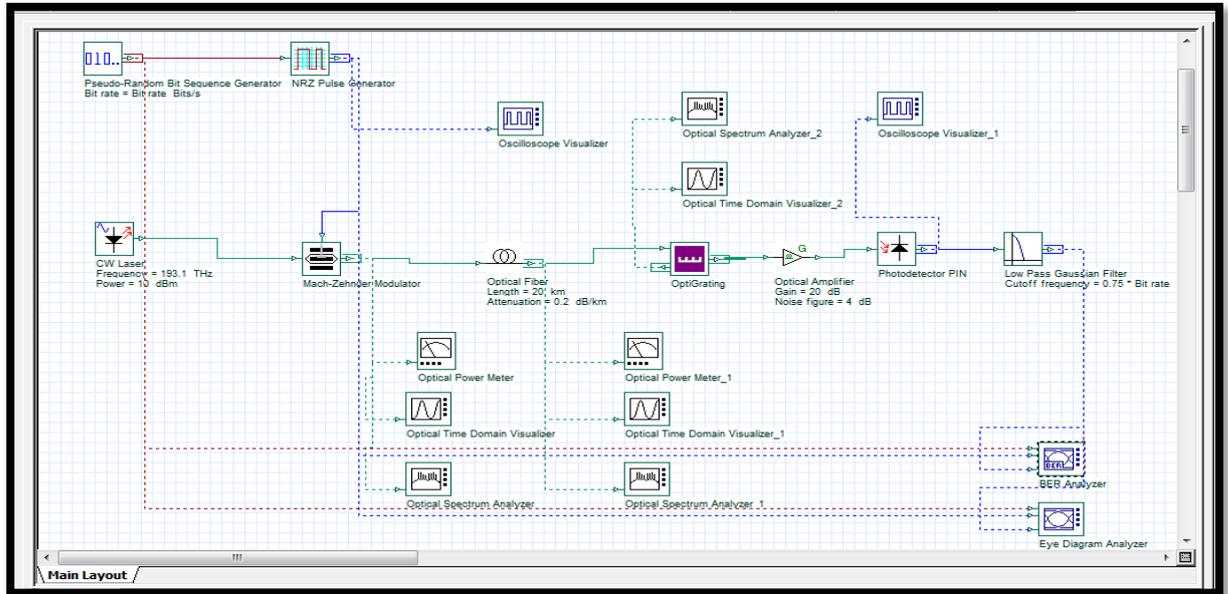


Figure III.17: réseau Bragg à fibre optique (OptiGrating).

| Power (cw laser) | Length optical fibre | Optical power meter befor optical fibre | Optical power meter after optical fibre | MIN BER           | Max Q factor |
|------------------|----------------------|---|---|-------------------|--------------|
| 10 dbm           | 15 km                | $4.766e^{-3}w$                          | $2.389e^{-3}w$                          | $6.09035e^{-113}$ | 22.5519      |
| 10 dbm           | 20 km                | $4.766e^{-3}w$                          | $1.897e^{-3}w$                          | $3.31654e^{-077}$ | 18.5595      |
| 10 dbm           | 25 km                | $4.766e^{-3}w$                          | $1.507e^{-3}w$                          | $4.2447e^{-046}$  | 14.2052      |
| 10 dbm           | 35 km                | $4.766e^{-3}w$                          | $950.961e^{-6}w$                        | $1.67756e^{-020}$ | 9.19709      |
| 10 dbm           | 50 km                | $4.766e^{-3}w$                          | $476.609e^{-6}w$                        | $1.0584e^{-021}$  | 9.49859      |
| 10 dbm           | 75 km                | $4.766e^{-3}w$                          | $150.717e^{-6}w$                        | $4.48987e^{-021}$ | 9.34547      |

tableau III.4: résultats de réseau Bragg à fibre optique (OptiGrating).

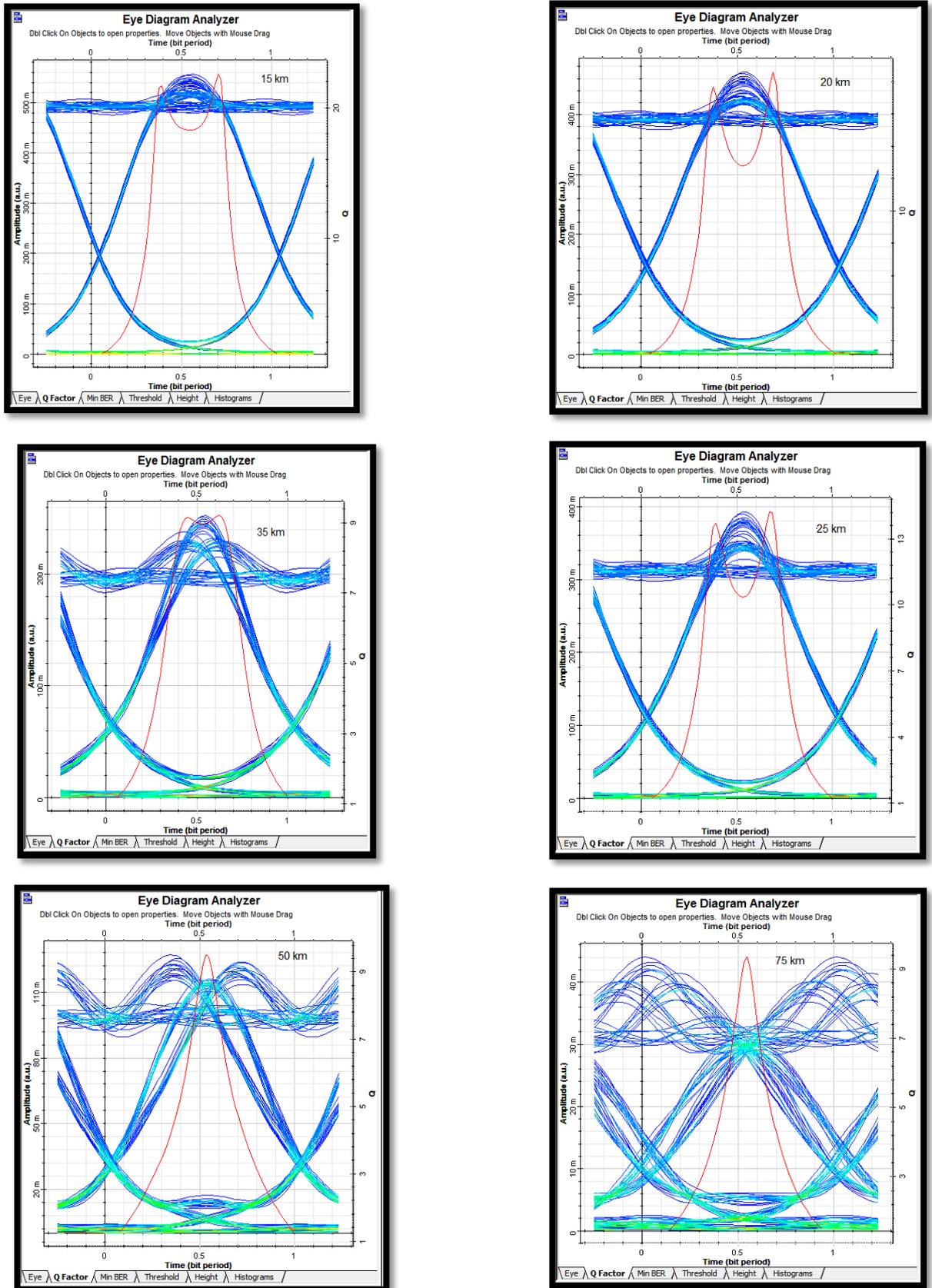


Figure III.18 : Diagramme de l'œil du réseau Bragg à fibre optique (OptiGrating) avec la variation de la distance.

- ✚ Notez que lorsque la distance de la fibre optique augmente, le facteur de qualité diminue et les valeurs de BER se changent.

**Grâce à ces simulations, nous sommes parvenus aux conclusions suivantes:**

- Lorsque la longueur de la fibre optique augmente, la valeur du facteur de qualité diminue, provoquant un flou de Ey diagramme.
- La longueur de la fibre optique a un effet sur la valeur de BER, donc plus la fibre optique est basse la valeur de BER est zéro.
- Pour obtenir un bon signal, nous augmentons la valeur du power.
- Dans le réseau de Bragg avec compensation de dispersion idéale, nous avons enregistré la valeur la plus élevée pour le facteur de qualité et valeur de BER nulle par rapport aux autres filtres (réseau de Bragg à pas variable (fibre bragg grating), réseau de Bragg uniforme (uniform Fibre Bragg grating), réseau de Bragg planaire (optigrating)).

**IV. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons simulé à l'aide d'un logiciel optisystem. Ce logiciel nous a aidés à créer, concevoir et simuler dans le moins de temps possible et de manière innovante, dans le but d'étudier les différences entre les types de réseaux de Bragg réseau de Bragg avec compensation de dispersion idéale, réseau de Bragg à pas variable (fibre bragg grating), réseau de Bragg uniforme (uniform Fibre Bragg grating) et réseau de Bragg planaire (optigrating).

ainsi que de connaître le rôle qu'ils acquièrent dans la fibre optique en augmentant la distance de la fibre optique pour réduire les problèmes rencontrés sur la ligne de transmission.

La conception et la simulation d'un système de communication par réseau de Bragg à fibre optique (FBG) en tant que compensateur de dispersion à l'aide du logiciel Optisystem, montre l'effet de l'amélioration des performances de BER dans la liaison par fibre optique. Le facteur de qualité Q du système a été nettement augmenté avec l'utilisation de FBG, tandis que le minimum (BER) du système a été réduit de manière significative. Les résultats numériques indiquent que les performances du BER peuvent être améliorées de manière significative et que la dispersion peut être compensée à l'aide d'un compensateur basé sur FBG.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Grâce à ce que nous avons fait dans ce travail, nous avons pu fournir et enrichir nos connaissances dans le domaine de la communication optique, de sorte que l'utilisation des fibres optiques de nos jours est devenue dans de nombreux domaines de la vie quotidienne. Ceci afin de lui permettre de prouver qu'il s'agit d'une technologie de base pour les réseaux de transmission longue et haute capacité. La distance pour qu'il puisse remplacer tous ceux qui existaient avant lui, en termes de capacité et de qualité de transmission de grandes quantités d'informations.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des informations sur la fibre optique en mentionnant les bases de celle-ci. Nous avons également pu connaître la différence entre ses différents types. La fibre optique monomode est utilisée pour les longues distances, tandis que la fibre optique multimode est utilisée sur de courtes distances, nous avons également traité de la dispersion qui est l'un des obstacles face à la fibre optique, donc plus la longueur de la fibre optique est grande, plus la dispersion est grande, car on peut citer deux types principaux de dispersion. La dispersion modale dans la fibre optique multimode, tandis que la dispersion chromatique est due à la différence de vitesse de propagation au sein de la fibre optique due à la différence de longueur d'onde l'une des applications les plus importantes de la fibre optique est la communication longue distance avec une faible perte de données.

Dans le deuxième chapitre, nous avons concentrés sur une étude détaillée du réseau de Bragg. Nous avons expliqué le réseau de Bragg, sa localisation dans les fibres optiques et le principe de son travail car leur utilisation au sein de la fibre optique réduit les problèmes auxquels elle est confrontée.

Dans le dernier chapitre, nous avons effectué une simulation des réseaux de Bragg dans la fibre optique à l'aide du programme optisystem. Nous avons utilisé différents types de réseau de Bragg, parmi eux (réseau de Bragg avec compensation de dispersion idéale, réseau de Bragg à pas variable (fibre Bragg grating), réseau de Bragg uniforme (uniform Fibre Bragg grating) et réseau de Bragg planaire (optigrating)). Afin de trouver la différence entre eux et le rôle de chacun qui peut jouer dans la fibre optique. Ceci conduit à une augmentation de la valeur du facteur de qualité  $Q$  et à une diminution de la valeur de BER (Bit Error Rate), afin d'obtenir une bonne transmission entre l'expéditeur et le destinataire.

De cela, nous avons déduit de notre étude que le réseau de Bragg est une technologie qui utilise des fibres optiques pour maintenir l'intégrité des données sur de longues distances.

# **Bibliographie**

- [1] MEZGHICHE KAMEL, Etud et caractérisation des réseaux de Bragg fibrés «Fiber BraggGratings», THESE Doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA,2011.
- [2] «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.
- [3] « Etude d'une Chaîne de Télécommunication Optique» ,Année : 2012 /2013 Université Abderrahmane Mira de Bejaia .
- [4] «Microlentillage d'une FIBRE OPTIQUE»,Soutenu le 04 /01/2011, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF UFAS (ALGERIE), Par Mme : SLIMI Ouidette.
- [5] «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 .
- [6] Standards and Technology Department. Measurement of the Effective Area of Single-Mode Optical Fiber. Arlington 1998.
- [7] Kitayama K, Shibata N and Masaharu O 1985 Two-core optical fibers: experiment J. Opt. Soc. Am. A **1** 85-89.
- [8] Wikipedia ,wiki /Fibre\_ optique.
- [9] Mr KARIM Feth-Allah, «Caractérisation d'un réseau de Bragg à pas variable Application à la compensation de la dispersion chromatique»,Mémoire de Magister en télécommunications, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID TLEMEN,2008.
- [10] <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00817846>Submitted on 25 Apr 2013>,Xunqi WU, «Etude de cavités optiques formées de miroirs de Bragg à réseaux à pas variable: application aux filtres et lasers» THÈSE DE DOCTORAT, Ecole Doctorale« Énergie, Mécanique et Matériaux », 11 Janvier 2012 .
- [11] Mlle CHETTOUH Saida, «Etude des propriétés spectrales des réseaux de Bragg pour codeurs/décodeurs optiques», THESE Doctorat EN SCIENCE, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2018.
- [12] Pierre Vinchon, «Optimisation de Masques de Phase pour l'exposition de Réseaux de Bragg à périodesvariables sur fibre optique», Université du Québec,2015.
- [13] Melle: GOURMALA Ouassila, «Etude et Réalisation des Réseaux de Bragg pour des Applications Photoniques», Thèse de Magister, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID–TLEMEN,2006.

- [14] OptiSystem User's Reference Optical Communication System Design Software  
Software Copyright © 2008 Optiwave.
- [15] «Analyse des performances d'un système de communication optique en utilisant différents canaux : FSO, OWC et SMF», diplôme de MASTER, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 08 / 06 / 2017.
- [16] OptiSystem Getting Started Optical Communication System Design Software  
Copyright © 2014 Optiwave.
- [17] «Etude et planification du réseau FTTH pour les transmissions optiques à haut débit»  
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, Mémoire du Projet de Fin d'Etudes Pour  
l'obtention du diplôme de Master, Année Universitaire: 2017/2018.
- [18] Govind P. Agrawal, « Fiber-Optic Communications Systems », Third Edition, (2002).
- [19] Bibhu Prasad 1,, Dr. K. C. Patra2,, Dr. N.K Barpanda3(2016) Performance Analysis of  
Fiber Optical Communication using Fiber Bragg Grating as Dispersion Compensator,  
International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation  
Engineering ,Vol. 5, Issue 4, April 2016
- [20] Gopika P1 , Sunu Ann Thomas« Performance Analysis of Dispersion Compensation  
using FBG and DCF in WDM Systems» International Journal of Advanced Research in  
Computer and Communication Engineering Vol. 4, Issue 10, October 2015.
- [21] Waldemar Wójcik, Piotr Kisała, Gulbahar Yussupova,  
Nazym Kussambayeva, Gulzhan Kashaganova and Damian Harasim Analysis of the  
Possibilities for Using a Uniform Bragg Grating in a Tunable Dispersion Compensator, Intl  
Journal Of Electronics And Telecommunications, 2015, Vol. 61, No. 4, Pp. 381-387 .
- [22] Navneet Singh Aulakh, «Investigations on fiber bragg gratings for fiber optic  
communication systems» ,department of electronics & communication engineering thapar  
university 2010.
- [23] Gnanam Gnanagurunathan and Faidz Abd. Rahman, «Comparing FBG and DCF as  
dispersion compensators in the long haul arrowband WDM systems», IFIP International  
Conference on Wireless and Optical Communications Networks, IEEE, 2006.
- [24] M. LEFRANÇOIS, « Etude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes  
de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s », Thèse de  
Doctorat de l'université Paris-Sud, décembre 2007 .
- [25] Jérémie PRADES « Conception d'un modulateur électro-optique Mach Zehnder 100».

- [26] KHEMIRI, S. « Génération d'impulsions optiques brèves à 40 GHz». Rap. de Proj. De fin d'étude. Ing. Télécom.
- [27] LEVASSEUR, J. Filtres passe-bas. 2006.