

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialiste : Système des Télécommunications

Par : RAHMANI KAWTHER

Sujet

Etude et simulation d'un FBG

Soutenu publiquement, le 19 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

Mr S.BAHRI
Mr R.BORSALI
Mr H.CHIKH BLED

MCB
Professeur
MCA

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Année universitaire : 2022 /2023

Résumé

Ce mémoire de master se concentre sur la simulation des réseaux de Bragg en tant que capteurs de température. L'objectif principal de l'étude était d'évaluer la réponse d'un réseau de Bragg aux variations de température. À l'aide de techniques de modélisation numérique, des réseaux de Bragg ont été simulés et leurs réflectivités spectrales ont été analysées. Les résultats obtenus ont démontré une sensibilité significative du réseau de Bragg aux changements de température, avec des décalages caractéristiques observés dans la réflectivité spectrale. Ces observations renforcent la perspective des réseaux de Bragg en tant que capteurs de température précis et fiables. Les applications potentielles de ces capteurs incluent l'industrie, la surveillance environnementale et les dispositifs médicaux. Les résultats de cette étude fournissent des bases solides pour de futures recherches et développements dans le domaine des réseaux de Bragg en tant que capteurs de température avancés.

Mots clés : fibre optique, réseaux de Bragg, filtre optique, capteur de température.

Abstract

This master's thesis focuses on the simulation of Bragg gratings as temperature sensors. The main objective of the study was to evaluate the response of a Bragg grating to temperature variations. Using numerical modeling techniques, Bragg gratings were simulated and their spectral reflectivities were analyzed. The results obtained demonstrated a significant sensitivity of the Bragg grating to temperature changes, with characteristic shifts observed in the spectral reflectivity. These observations strengthen the prospect of Bragg gratings as accurate and reliable temperature sensors. Potential applications for these sensors include industry, environmental monitoring, and medical devices. The results of this study provide a solid foundation for future research and development in the field of Bragg gratings as advanced temperature sensors.

Keywords: optical fiber, Bragg gratings, optical filter, temperature sensor.

ملخص

تركز أطروحة الماجستير هذه على محاكاة شبكات براغ كأجهزة استشعار لدرجة الحرارة. كان الهدف الرئيسي من الدراسة هو تقييم استجابة مقضب براغ للتغيرات في درجات الحرارة. باستخدام تقنيات النمذجة العددية، تمت محاكاة شبكات براغ وتم تحليل انعكاساتها الطيفية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها حساسية كبيرة لشبكة براغ للتغيرات في درجات الحرارة، مع التحولات المميزة التي لوحظت في الانعكاسية الطيفية. تعزز هذه الملاحظات احتمالية وجود حواجز شبكية براغ كأجهزة استشعار دقيقة وموثوقة لدرجة الحرارة. تشمل التطبيقات المحتملة لهذه المستشعرات الصناعة والمراقبة البيئية والأجهزة الطبية. توفر نتائج هذه الدراسة أساساً متيناً للبحث والتطوير المستقبلي في مجال حواجز شبكية براغ كأجهزة استشعار متطورة لدرجة الحرارة.

المفاتيح الكلمات: الألياف الضوئية، حواجز شبكية براغ، مرشح بصري ، مستشعر درجة الحرارة

Remerciements

Je tenais à prendre un moment pour exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements pour votre dévouement, votre expertise et votre soutien tout au long de mes années d'éducation. Votre rôle en tant qu'encadreur, membres du jury et professeurs a été fondamental dans mon parcours académique et personnel.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon encadreur **Mr H.CHIKH-BLED** pour sa guidance précieuse et son accompagnement constant. Vos conseils éclairés, votre disponibilité et votre patience ont été essentiels pour m'aider à surmonter les obstacles et à progresser dans mes études. Votre expertise dans votre domaine m'a inspiré et m'a poussé à me dépasser. Je suis extrêmement reconnaissante d'avoir bénéficié de votre encadrement tout au long de ce projet.

Je voudrais également exprimer ma gratitude envers les membres du jury. Votre expertise, votre rigueur et votre impartialité ont contribué à garantir l'intégrité académique de mon travail. Vos commentaires constructifs et vos questions pertinentes lors de la soutenance ont enrichi ma réflexion et m'ont permis de développer une meilleure compréhension de mon sujet d'étude. Je vous suis reconnaissante pour le temps et l'attention que vous avez consacrés à évaluer mon travail.

Je suis consciente que mon parcours éducatif n'aurait pas été le même sans votre soutien inestimable. Votre dévouement à l'éducation et votre investissement envers les étudiants sont des valeurs qui méritent d'être saluées et reconnues. Je vous suis profondément reconnaissante pour tout ce que vous avez fait pour moi et pour les autres étudiants.

*Veillez accepter mes plus sincères
remerciements et l'expression de ma
profonde gratitude.*

إهداء التخرج

من قال انا لها "نالها" وانا لها وان ابت رغما عنها أتيت بها
إلى الأيادي الطاهرة التي أزلت من طريقي أشواك الفشل...
إلى من ساندني بكل حب عند ضعفي...
إلى من رسمولي المستقبل بخطوط الحب والثقة...
إليكم عائلتي...

أهدي فرحة تخرجي إلى تلك الإنسانية العظيمة التي طالما تمننت أن تقر عينها برؤيتي في يوم كهذا إلى... أمي
وإلى من كلل العرق جبينه وعلمني أن النجاح لا يأتي إلا بالصبر والإصرار... أبي
إلى من كانوا أول الداعمين لي في الأوقات الصعبة سندي ومسندي... أخواتي
إلى من رسموا البسمة وصنعوا اللحظات الجميلة... أصدقائي... نسرين، سيد أحمد، موسى، مليكة، صهيب

Table de matière

Résumé	II
Remerciements	IV
Dédicace	V
Table de matière	VII
Table de figures	X
Liste des tableaux	XII
Introduction générale.....	14
Chapitre I : Généralités sur les fibres optiques	15
I.1 Introduction	16
I.1.1 notions générales	16
I.2 Définition de la fibre optique	18
I.3 Principe.....	18
I.4 Une affaire de mode	19
I.5 Longueur d'onde de coupure et la fréquence normalisée	20
I.6 Type de fibre optique	21
I.6.1 la fibre monomode.....	21
I.6.2 la fibre multimode	22
I.7 Les effets limitent la capacité de transmission.....	24
I.7.1 Les effets linéaires	24
I.7.1.1 Atténuation.....	24
I.7.1.2 La dispersion.....	25
I.7.2 Les effets non linéaires	26
I.7.2.1 L'effet Kerr	27
I.7.2.2 L'effet Raman	27
I.7.2.3 L'effet Brillouin	28
I.8 Avantage de la fibre optique	28
I.9 inconvénient de la fibre optique	29

I.10 Applications de la fibre optique	30
I.11 Architecture d'une ligne de transmission optique.....	30
I.11.1 Définition d'une liaison par fibre optique	30
I.11.2 Architecture d'une liaison optique	31
I.11.2.1 Emetteur.....	31
A. la diode LASER.....	31
B. la diode électroluminescente DEL.....	32
C. Modulateur.....	33
I.11.2.2 Récepteur	33
A. principe des photodiodes	33
B. Photodiode PIN.....	34
I.12 Conclusion.....	34
Bibliographies.....	36
Chapitre II : Etudes des réseaux de Bragg fibrés	37
II.1 Introduction.....	38
II.2 Définition des réseaux de Bragg	38
II.3 Principe de fonctionnement	40
II.4 Caractéristiques des fibres à réseau de Bragg.....	41
II.5 Techniques de fabrication de réseau de Bragg	41
II.5.1 Technique des Masques de Phase	41
II.5.2 Technique de miroir de Lloyd.....	46
II.5.3 Technique d'inscription point-par-point des réseaux de Bragg	47
II.5.4 Méthode holographique.....	48
II.6 Les type de réseau de Bragg	49
II.6.1 Réseau de Bragg uniforme	49
II.6.2 Réseau de Bragg « tilted » ou « blazed »	50
II.6.3 Réseau de Bragg à pas variable ou « chirped ».....	50

II.6.4 Réseau de Bragg «apodisé».....	51
II.6.5 Réseau de Bragg échantillonné	52
II.6.6 Réseau de Bragg à saut de phase.....	53
II.7 Application des réseaux de Bragg.....	53
II.7.1 Application des réseaux de Bragg à la télécommunication.....	53
II.7.2 Autres application de réseau de Bragg	54
II.7.2.1 Tension	54
II.7.2.2 Température.....	54
II.7.2.3 pression.....	55
II.7.2.4 En automobile.....	55
II.8 La théorie des modes couplés	55
II.9 Conclusion	56
Bibliographies.....	57
Chapitre III : Simulation d'un capteur à réseau de Bragg.....	59
III.1 Introduction	60
III.2 Objectif	60
III.3 Présentation de MATLAB.....	61
III.4 La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).....	62
III.4.1 Généralité et historique de la méthode.....	62
III.4.2 principe de la méthode	64
III.4.3 Point de départ : les équations de Maxwell	65
III.5 Partie simulation	66
III.5.1 Etude d'un capteur de température	74
III.6 Conclusion	76
Bibliographies	78
Conclusion générale	80

Table de figures

Chapitre I : généralités sur les fibres optiques

Figure I.1 : Spectre lumineux.....	18
Figure I.2 : Structure de la fibre optique.....	19
Figure I.3 : Fibre monomode et multimode-principe.....	20
Figure I.4 : Fibre monomode.....	21
Figure I.5 : Trajet lumineux dans une fibre monomode.....	22
Figure I.6 : Fibre multimode à saut d'indice.....	22
Figure I.7 : Trajet lumineux dans une multimode à saut d'indice.....	23
Figure I.8 : Fibre multimode à gradient d'indice.....	23
Figure I.9 : Trajet lumineux dans une multimode à gradient d'indice.....	24
Figure I.10 : Atténuation d'une fibre optique.....	25
Figure I.11 : Schéma de base d'une liaison optique.....	31
Figure I.12 : Architecture d'une liaison optique.....	31
Figure I.13 : Principe de fonctionnement d'un LASER.....	32
Figure I.14 : Principe de la photodiode.....	33
Figure I.15 : Structure d'une photodiode.....	34

Chapitre II : étude des réseaux de Bragg fibrés

Figure II.1 : Réseau de Bragg.....	39
Figure II.2 : Structure d'un réseau de Bragg, le spectre transmis et le spectre réfléchi.....	39
Figure II.3 : Structure d'un réseau de Bragg, le spectre transmis et le spectre réfléchi.....	40
Figure II.4 : Montage d'écriture point-par-point. Une impulsion laser est focalisée dans le cœur d'une fibre. Celle-ci est ensuite déplacée le long de son axe et la procédure est répétée jusqu'à l'obtention de la longueur de réseau voulue.....	42
Figure II.5 : Schéma d'un masque de phase de pas Λ et de profondeur de rainure δ , ainsi que son effet diffractif sur un faisceau à incidence normale.....	43
Figure II.6 : Schéma d'un interféromètre de Talbot. [9].....	44
Figure II.7 : Schéma d'un montage de masque de phase utilisé en translation. La longueur du réseau est seulement limitée par la longueur du masque.....	46
Figure II.8 : Vue de profil du montage de masque de phase utilisé en translation montrant un actuateur piézoélectrique sous la lentille permettant de maximiser dans la direction transverse la zone de changement d'indice.....	46
Figure II.9 : Schéma du montage de photo inscription par miroir de Lloyd.....	47
Figure II.10 : Principe d'exposition de RDB par méthode holographique.....	48
Figure II.11 : réseau de Bragg uniforme. [11].....	50
Figure II.12 : réseau de Bragg « tilted ».....	50
Figure II.13 : Réseau de Bragg « chirped ».....	51
Figure II.14 : Réseau apodisé intégré dans un guide d'onde.....	52

Figure II.15 : un réseau de Bragg Echantillonné.....	52
Figure II.16 : Réseau présentant un saut de phase.	53

Chapitre III : simulation d'un capteur à réseau de Bragg

Figure III.1 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour une Période de 320 μm	67
Figure III.2 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour une Période de 340 μm	67
Figure III.3 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour une Période de 370 μm	67
Figure III.4 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour une Période de 400 μm	67
Figure III.5 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde en variant la période.	68
Figure III.6 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour longueur = 40 mm.	69
Figure III.7 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour longueur = 30 mm.	69
Figure III.8 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour longueur = 20 mm.	70
Figure III.9 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour longueur = 10 mm.	70
Figure III.10 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde en variant la longueur.	71
Figure III.11 : La dernière onde dans la figure III.10.	71
Figure III.12 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour $\text{Ind_mod} = 0,25 \cdot 10^{-4}$	72
Figure III.13 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour $\text{Ind_mod} = 0,5 \cdot 10^{-4}$	72
Figure III.14 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour $\text{Ind_mod} = 1 \cdot 10^{-4}$	73
Figure III.15 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour $\text{Ind_mod} = 2 \cdot 10^{-4}$	73
Figure III.16 : Le déplacement de la longueur d'onde de Bragg en variant la température.	75
Figure III.17 : La dernière onde dans la figure III.16.	75

Liste des tableaux

Chapitre I : généralités sur les fibres optiques

Tableau I. 1 : les caractéristiques de FGI 24

Chapitre III : simulation d'un capteur à réseau de Bragg

Tableau III. 1 : Variation de λ en fonction de la Température. 76

Introduction générale

Introduction générale

Ce rapport présente une étude sur les réseaux de Bragg fibrés (FBG) et leur utilisation dans la conception et la simulation d'un capteur de température. Le chapitre I met l'accent sur les généralités des fibres optiques, fournissant ainsi les bases nécessaires à la compréhension des FBG et de leur fonctionnement. Le chapitre II se concentre spécifiquement sur l'étude des réseaux de Bragg fibrés, abordant leur définition, leur principe de fonctionnement, les techniques de fabrication et les différents types de FBG existants. Enfin, le chapitre III aborde la simulation d'un capteur à réseaux de Bragg à l'aide de MATLAB, définissant les objectifs de la simulation, présentant MATLAB comme outil de simulation et détaillant les étapes de la simulation du capteur de température.

Chapitre I : Généralités sur les fibres optiques

Le premier chapitre introduit les concepts de base des fibres optiques, y compris les définitions, les principes fondamentaux et les types de fibres optiques disponibles. Il aborde également les avantages et les inconvénients de l'utilisation des fibres optiques dans diverses applications, ainsi que les différentes architectures des lignes de transmission optique.

Chapitre II : Étude des réseaux de Bragg fibrés

Le deuxième chapitre se concentre sur l'étude détaillée des réseaux de Bragg fibrés. Il définit les réseaux de Bragg, explique leur principe de fonctionnement et examine les caractéristiques des FBG. Il présente également les différentes techniques de fabrication des FBG et explore les divers types de FBG existants. De plus, il met en évidence les applications des FBG dans le domaine des télécommunications et des capteurs.

Chapitre III : Simulation d'un capteur à réseaux de Bragg

Le troisième chapitre est consacré à la simulation d'un capteur à réseaux de Bragg à l'aide de MATLAB. Il introduit les objectifs de la simulation et présente MATLAB comme outil de simulation puissant. Il définit également un capteur de température et explique les étapes nécessaires pour simuler son fonctionnement à l'aide de MATLAB. Enfin, il conclut en résumant les résultats et les conclusions de la simulation.

En conclusion, ce travail offre une vision complète de l'étude des réseaux de Bragg fibrés, en explorant les aspects théoriques, les techniques de fabrication, les applications et la simulation du capteur de température. Il fournit une base solide pour approfondir la compréhension des FBG et leur utilisation dans les domaines des télécommunications et de la détection de température.

Chapitre I :
Généralités sur les fibres optiques

1.1 Introduction

Les fibres optiques sont de fines fibres de verre hautement transparentes qui ont révolutionné les télécommunications depuis leur découverte dans les années 1960. Contrairement aux guides d'onde métalliques et non métalliques qui ont subi de grandes pertes, les fibres optiques sont capables de guider la lumière grâce à un phénomène appelé réflexion interne totale. Cette découverte a rendu les fibres optiques idéales pour les télécommunications, remplaçant ainsi les câbles en cuivre.

Cependant, l'utilisation des fibres optiques ne se limite pas aux télécommunications. Les endoscopes, par exemple, ont commencé à utiliser des fibres optiques dans les années 1950 pour observer l'intérieur du corps humain. De plus, les fibres optiques sont utilisées dans diverses applications, telles que la médecine, l'industrie, la défense et bien d'autres.

Dans ce chapitre, nous allons examiner en détail les différents types de fibres optiques, leurs avantages et inconvénients, ainsi que leurs applications dans divers domaines [1].

1.1.1 notions générales

✓ L'optique

L'optique est une branche de la physique qui étudie les phénomènes lumineux, notamment ceux qui sont perçus par la rétine de l'œil. Elle englobe également l'étude des moyens de transmission des informations par la lumière et de manière plus générale, l'étude de toutes les radiations électromagnétiques.

L'optique peut être divisée en deux branches principales : l'optique géométrique et l'optique physique. L'optique géométrique se concentre sur le trajet des rayons lumineux et ses applications comprennent les instruments optiques traditionnels tels que les lentilles et les prismes. En revanche, l'optique physique étudie la nature de la lumière, son émission, sa propagation dans différents milieux, son absorption par le milieu traversé et les influences subies par la propagation de champs électriques, magnétiques, etc.

En étudiant l'optique physique, nous sommes en mesure de comprendre les propriétés des fibres optiques, qui sont des dispositifs optiques très avancés utilisés pour transmettre l'information via la lumière. Dans les sections suivantes, nous allons nous pencher sur les différentes caractéristiques des fibres optiques et les types de fibres utilisés dans diverses applications. [2]

✓ La lumière

La nature de la lumière a été pendant longtemps un sujet de débat parmi les physiciens. Certains phénomènes tels que la diffraction suggèrent que la lumière est une onde, tandis que d'autres, tels que l'effet photoélectrique, suggèrent que la lumière est constituée de particules

appelées photons. Le physicien français Louis de Broglie (1892-1987) a trouvé un moyen de réconcilier ces deux théories en concluant que la lumière est à la fois une onde électromagnétique et une particule.

Pour décrire la lumière, on utilise généralement sa longueur d'onde λ plutôt que sa fréquence, car cela facilite les calculs et la compréhension. La longueur d'onde correspond à la distance entre deux crêtes ou deux creux consécutifs d'une onde électromagnétique, et elle est exprimée en mètres, nanomètres ou autres unités similaires. Les différentes couleurs de la lumière visible ont des longueurs d'onde différentes, allant du violet (environ 400 nm) au rouge (environ 700 nm).

Cette compréhension de la nature de la lumière est essentielle pour comprendre comment les fibres optiques fonctionnent, car elles exploitent les propriétés ondulatoires et corpusculaires de la lumière pour transmettre l'information. Nous allons explorer ces propriétés plus en détail dans les sections suivantes. [3]

$$\lambda = \frac{C}{F} = CT \quad (\text{Eq I.1})$$

- λ : Longueur d'onde (m)
- T : La période
- C : Célérité $3 \cdot 10^8$ dans le vide
- F : Fréquence du signal lumineux

✓ *Le spectre lumineux*

Le spectre lumineux correspond à l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par les sources lumineuses. L'œil humain peut percevoir les ondes électromagnétiques dont les longueurs d'onde se situent entre environ 400 nm (violet) et 700 nm (rouge). Cela signifie que nous ne sommes capables de voir qu'une petite partie du spectre lumineux, appelée spectre visible.

Les fibres optiques sont capables de transmettre des signaux lumineux sur une gamme de longueurs d'onde bien plus large que le spectre visible. Cela permet d'augmenter la capacité de transmission de données, car plusieurs signaux lumineux peuvent être transmis simultanément à différentes longueurs d'onde. Pour cette raison, on raisonne en termes de longueur d'onde plutôt qu'en termes de fréquence lorsqu'on parle de fibres optiques.

Sur le schéma, on peut voir la gamme de longueurs d'onde qui peut être transmise par une fibre optique typique. Cette gamme, appelée fenêtre de transmission, se situe généralement entre 850nm et 1625 nm. Elle est divisée en plusieurs bandes de longueurs d'onde, chacune pouvant transporter plusieurs signaux lumineux simultanément. Les longueurs d'onde utilisées dépendent du type de fibre optique et de l'application spécifique de la transmission de données.

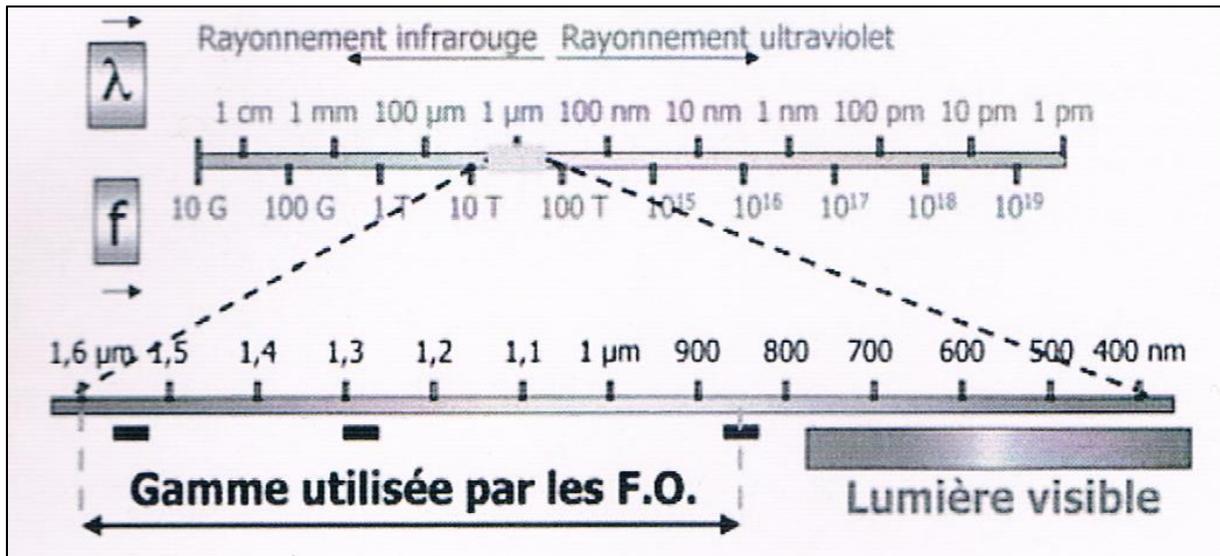


Figure 1.1 : Spectre lumineux.

1.2 Définition de la fibre optique

La fibre optique est un fil transparent très fin qui conduit la lumière. Entourée d'une gaine protectrice, elle peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines voire milliers de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'information. La fibre trouve son utilisation principale dans les réseaux de transmission pour les télécommunications. Moins poétiquement, c'est un guide d'ondes électromagnétiques dans la gamme des longueurs d'ondes lumineuses, en générale de $0.6 \mu\text{m}$ à $2 \mu\text{m}$, bien que certaines applications se dessinent vers $10 \mu\text{m}$; ce milieu est composé au minimum de deux matériaux d'indices différents l'un formant la gaine (indice n_g) et l'autre le cœur (indice n_c).

1.3 Principe

Le fonctionnement de la fibre optique repose sur les propriétés réfractrices de la lumière. En effet, la fibre est constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur a un indice de réfraction plus élevé que la gaine, ce qui permet de confiner la lumière à l'intérieur du cœur en la faisant rebondir plusieurs fois à l'interface entre les deux matériaux, grâce au phénomène de réflexion totale interne. Cela permet de guider la lumière sur de longues distances sans perte significative d'énergie lumineuse. La fibre optique est ainsi un guide d'onde qui assure la transmission des signaux lumineux sur de très longues distances avec une très faible atténuation, ce qui la rend particulièrement adaptée pour les transmissions à haut débit de données numériques.

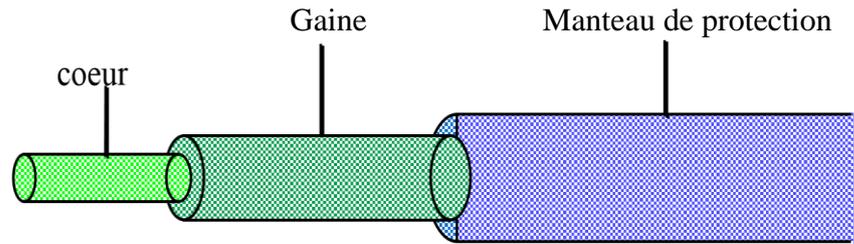


Figure I.2 : Structure de la fibre optique.

Cela est rendu possible grâce au principe de réflexion totale interne qui permet de guider la lumière dans la fibre. Le cœur de la fibre a un indice de réfraction plus élevé que la gaine qui l'entoure, créant ainsi une différence d'indice de réfraction qui permet à la lumière de se réfléchir de manière totale à l'interface entre les deux matériaux. Cette propriété permet à la lumière de rester confinée dans le cœur de la fibre, même lorsqu'elle est courbée, et de se propager sur de longues distances sans perte de signal. La fibre optique permet donc de transmettre des signaux lumineux sur de très longues distances, avec une bande passante beaucoup plus élevée que les autres moyens de transmission tels que les câbles coaxiaux ou les ondes radio.

Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

- la différence d'indice normalisé, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine : $\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c}$, où n_c est l'indice de réfraction du cœur, et n_g celui de la gaine.
- L'ouverture numérique (ON) est un paramètre important dans la caractérisation des fibres optiques, qui mesure leur capacité à propager la lumière. Elle est définie comme le produit de l'indice de réfraction du cœur de la fibre et du sinus de l'angle d'acceptance, c'est-à-dire l'angle maximal d'incidence des rayons lumineux qui peuvent être guidés par la fibre. L'ouverture numérique est donc un indicateur de la capacité de la fibre à collecter la lumière incidente et à la guider à l'intérieur du cœur. Elle est souvent exprimée en pourcentage, et peut varier en fonction de la composition et de la forme de la fibre. Une fibre à grande ouverture numérique permettra de transmettre plus de lumière, avec moins de pertes, que celle à faible ouverture numérique. C'est pourquoi l'ouverture numérique est un critère important dans le choix et la conception des fibres optiques pour des applications de transmission de données, d'imagerie médicale ou industrielle, ou de capteurs optiques. [2]

1.4 Une affaire de mode

En optique, le mode est défini comme le nombre de chemins que peut emprunter la lumière à travers la fibre optique. La fibre multimode permet à la lumière de suivre plusieurs chemins, ce qui peut entraîner des perturbations et des dégradations du signal sur de longues distances,

tandis que la fibre monomode ne permet à la lumière de suivre qu'un seul chemin, assurant ainsi une transmission plus efficace sur de longues distances. Cependant, la fibre monomode nécessite des sources lumineuses plus puissantes pour fonctionner efficacement. Le choix entre une fibre multimode ou monomode dépend donc des besoins de transmission, de la distance et de la qualité du signal nécessaire.

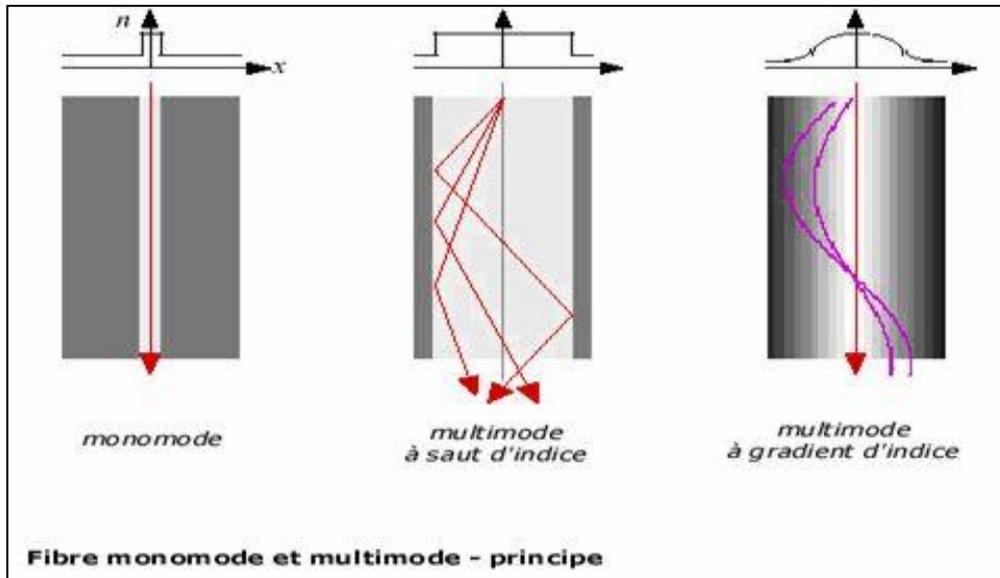


Figure I.3 : Fibre monomode et multimode-principe.

I.5 Longueur d'onde de coupure et la fréquence normalisée

La longueur d'onde et la fréquence sont deux paramètres importants qui sont normalisés dans les fibres optiques pour permettre une transmission efficace des signaux.

- **La longueur d'onde de coupure λ_c :**

La longueur d'onde est une mesure de la distance entre deux crêtes successives d'une onde électromagnétique, exprimée en mètres (m) ou en nanomètres (nm). Dans les fibres optiques, les longueurs d'onde utilisées pour la transmission des signaux sont généralement comprises entre 1300 nm et 1550 nm, bien que d'autres longueurs d'onde soient également utilisées. Ces longueurs d'onde correspondent aux fenêtres de transmission les plus faibles de l'absorption par les fibres optiques et permettent donc une transmission efficace sur de longues distances.

- **La Fréquence Normalisée :**

On peut également déterminer le mode pouvant se propager dans la fibre grâce à la fréquence normalisée V qui dépend de l'ouverture numérique.

Elle a pour expression :

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

Avec a représentant le rayon du cœur de la fibre.

Pour avoir seulement le mode fondamentale LP01 (fibre monomode) qui se propage au sein de la fibre il faut satisfaire la condition : $V < 2,405$.

I.6 Type de fibre optique

Il existe deux principaux types de fibres optiques :

I.6.1 la fibre monomode

En effet, dans une fibre optique monomode, le diamètre du cœur est extrêmement petit, typiquement de l'ordre de quelques micromètres seulement. Cette petite taille limite la propagation de la lumière à un seul mode, ce qui permet d'obtenir une transmission plus efficace et précise des signaux sur de longues distances. Les fibres monomodes sont utilisées dans les réseaux de télécommunications longue distance et les applications nécessitant une transmission de données à haut débit. Elles offrent également une meilleure résolution pour les applications d'imagerie médicale, telles que l'endoscopie et la microscopie optique. Cependant, en raison de leur petite taille, elles sont plus coûteuses à produire et à installer que les fibres multimodes.

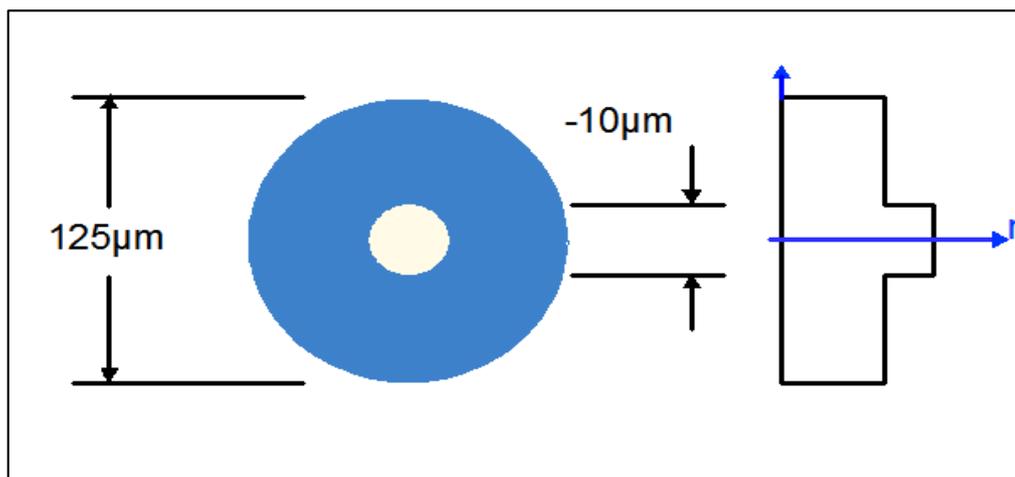


Figure I.4 : Fibre monomode.

Les fibres monomode sont donc souvent utilisées dans les applications de télécommunications à haute vitesse et à longue distance.

Ceci a pour conséquence de faire disparaître le phénomène d'élargissement d'impulsion, d'où une bande passante très grande. De plus, le faisceau émergent est cohérent spatialement, et temporellement si la source l'est également.



Figure I.5 : Trajet lumineux dans une fibre monomode.

I.6.2 la fibre multimode

Ces fibres ont un diamètre de cœur plus important, ce qui leur permet de transporter plusieurs modes de lumière en même temps.

Dans ces fibres, il existe également d'autres types :

- ✓ La fibre multimode à saut d'indice

Les premières fibres optiques produites étaient des fibres multimodes à saut d'indice. Elles sont constituées d'un cœur d'indice uniforme n et d'une gaine d'indice n' , avec une rupture d'indice, ou saut, à la frontière cœur-gaine. La lumière est guidée par réflexion interne totale à l'interface cœur-gaine, elle suit donc un chemin zigzag.

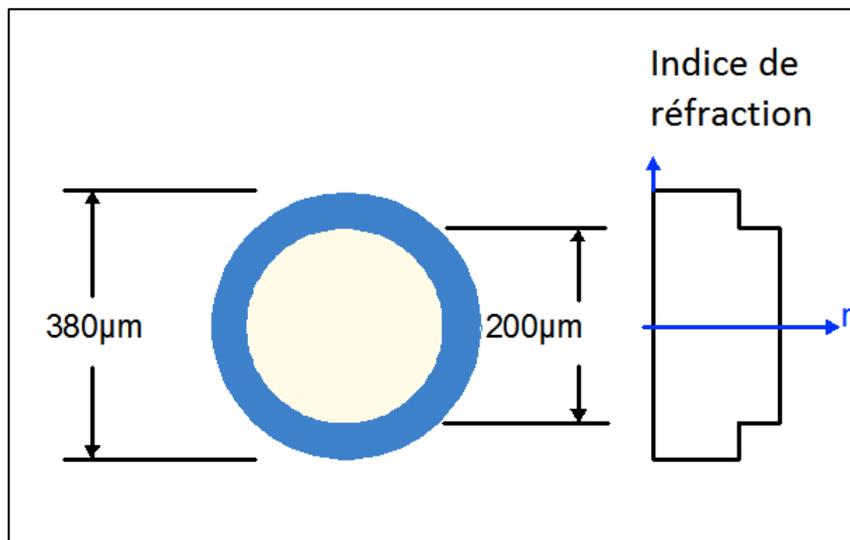


Figure I.6 : Fibre multimode à saut d'indice.

L'inconvénient de ce type de fibre résulte de l'écart important de temps de parcours des différents rayons lumineux et donc d'un élargissement conséquent de l'impulsion de départ, ce qui limite le produit bande passante x longueur d'une telle fibre ($\approx 100\text{MHz.km}$).

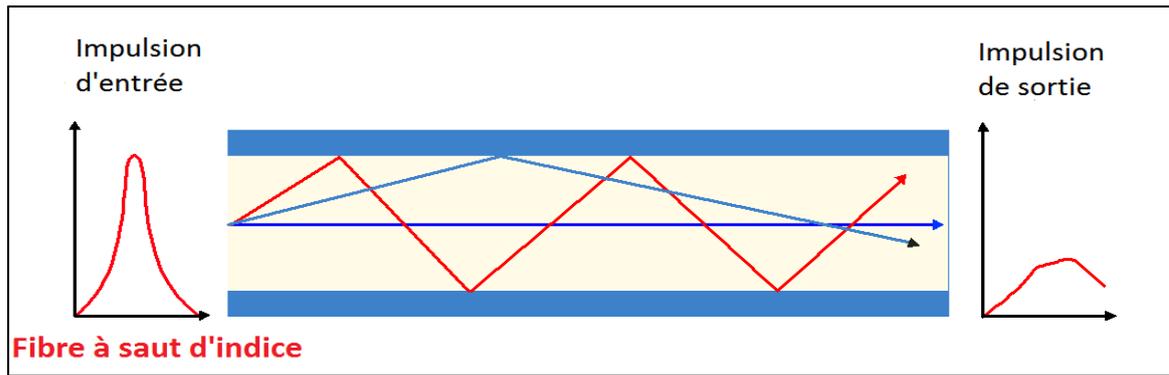


Figure I.7 : Trajet lumineux dans une multimode à saut d'indice.

Les principales caractéristiques sont :

- Affaiblissement : 6 dB/Km à 850 nm.
- Bande passante : 20 MHz.Km à 850 nm.
- Ouverture numérique : 0,37.

✓ La fibre multimode à gradient d'indice :

Afin de limiter le phénomène d'élargissement d'impulsion, les fibres à gradient d'indice ont été développées. Dans ce type de fibre, l'indice du cœur diminue graduellement depuis l'axe jusqu'à la gaine selon une loi parabolique donnée par :

$$n(r) = n_c \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{r_c}\right)^g} \tag{Eq I.3}$$

Où g représente le paramètre de profil.

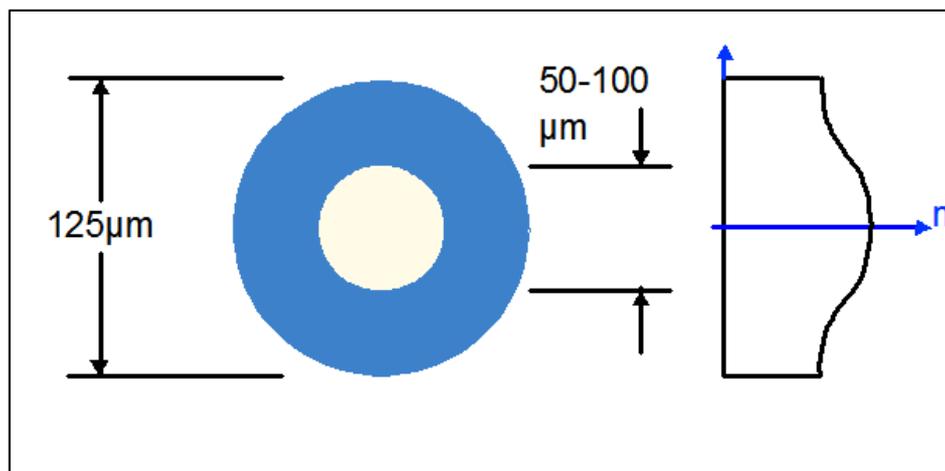


Figure I.8 : Fibre multimode à gradient d'indice.

Les conséquences en sont que les rayons ne se propagent plus en zigzaguant mais en ondulant autour de l'axe, avec une vitesse d'autant supérieure que le rayon est éloigné de l'axe. Ceci permet de ramener tous les temps de propagation des différents rayons à des valeurs très proches les unes des autres [4].

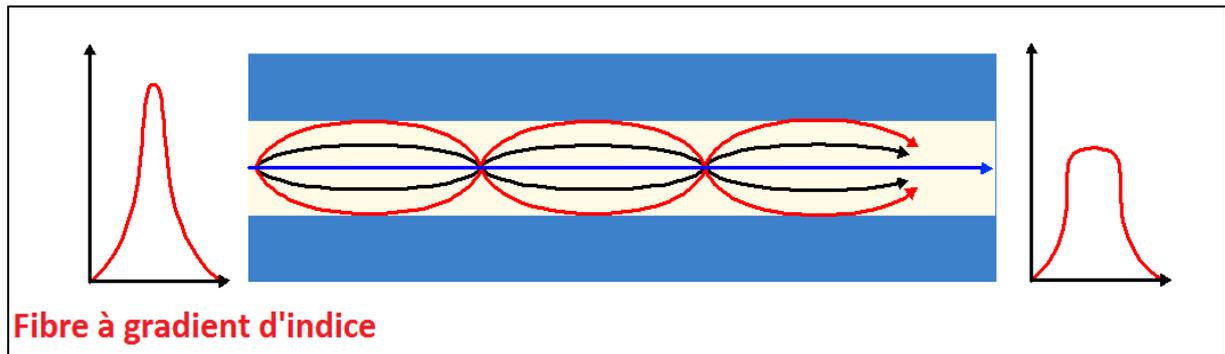


Figure I.9 : Trajet lumineux dans une multimode à gradient d'indice.

Les principales caractéristiques sont :

Diamètre Cœur/gaine/revêt	Affaiblissement à 850/1300 nm	Ouverture numérique	Bande passante à 850 nm
50/125/250	2,4 / 1 dB	0,2	600 MHz.Km
62,5/125/250	3 / 1 dB	0,275	>200 MHz.Km
100/140/250	4,5 / 2 dB	0,3	300 MHz.Km

Tableau I. 1 : les caractéristiques de FGI

1.7 Les effets limitent la capacité de transmission

1.7.1 Les effets linéaires

1.7.1.1 Atténuation

L'atténuation est la perte de puissance d'un signal optique le long d'une fibre. Le système optique illustré à la figure 1.7 montre comment cette perte est due aux impuretés résiduelles et au phénomène de dispersion. L'atténuation est mesurée en décibels par kilomètre (dB/km). Contrairement à l'atténuation relative mesurée en dB, qui est une mesure relative de la perte de puissance par rapport à la puissance d'entrée, l'atténuation absolue est mesurée en dBm (décibels par milliwatt) et correspond à la perte de puissance absolue en milliwatts [5].

Soit 0dBm = 1mW, 10dBm = 10mW

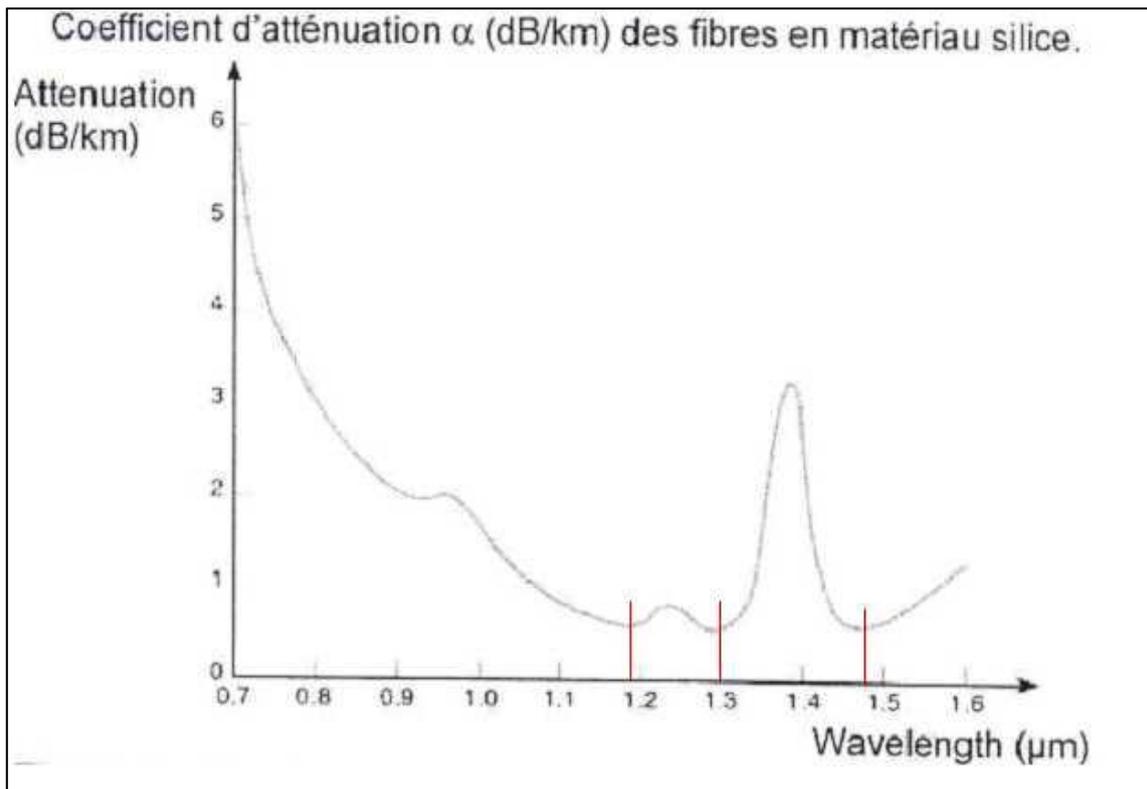


Figure I.10 : Atténuation d'une fibre optique.

1.7.1.2 La dispersion

La dispersion est un phénomène qui affecte la transmission de signaux optiques à travers les fibres optiques. Elle se produit lorsque les différentes composantes d'une impulsion optique se propagent à des vitesses légèrement différentes dans la fibre. Il en résulte une distorsion de l'impulsion optique à la sortie de la fibre, qui peut affecter la qualité et la fiabilité de la transmission.

Il existe deux principaux types de dispersion : la dispersion intermodale et la dispersion chromatique. La dispersion intermodale est due à la différence de temps de propagation des modes de polarisation différents dans une fibre optique multimode. La dispersion chromatique, quant à elle, est due à la variation de l'indice de réfraction de la fibre en fonction de la longueur d'onde de la lumière. La dispersion chromatique est souvent la principale cause de dispersion dans les systèmes de communication modernes en raison de l'utilisation de fibres optiques monomodes.

La dispersion est un défi pour les concepteurs de systèmes de communication optique car elle limite la distance de transmission et le débit de données pouvant être transmis sur une fibre optique. Cependant, il existe des techniques pour minimiser les effets de la dispersion, comme l'utilisation de fibres optiques spéciales, de pré-compensation de dispersion, ou encore de

techniques de multiplexage en longueur d'onde pour augmenter la bande passante de la fibre optique.

✓ *Dispersion intermodale*

La différence de temps de trajet entre deux rayons lumineux dans une fibre optique due à la dispersion intermodale est donnée par la formule :

$$\Delta t = L * \Delta n / c \quad (\text{Eq I.4})$$

Où L est la longueur de la fibre, Δn est la différence d'indice optique entre le mode le plus rapide et le mode le plus lent, et c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Cette dispersion intermodale est plus importante dans les fibres multimodes que dans les fibres monomodes, car les fibres multimodes ont un diamètre de cœur plus grand, ce qui permet à plusieurs modes de se propager simultanément dans la fibre, avec des angles d'incidence différents, conduisant à des différences de temps de trajet plus importantes.

✓ *Dispersion chromatique*

La dispersion chromatique est une perte de qualité du signal optique due aux vitesses différentes des différentes longueurs d'onde qui le composent. En effet, aucun émetteur n'est capable de fournir un signal lumineux pur, chacun ayant une largeur de bande centrée autour de la longueur d'onde nominale. Cette dispersion peut être calculée à partir de la variation de l'indice de réfraction de la fibre optique en fonction de la longueur d'onde, donnée par la relation

$$N = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (\text{Eq I.5})$$

Où n est l'indice de réfraction de la fibre, λ la longueur d'onde et $\frac{dn}{d\lambda}$ sa variation. Dans la silice pure, on sait que n varie d'environ 0,5% entre une longueur d'onde de 600 nm et une longueur d'onde de 1000 nm. Pour un trajet d'un kilomètre, la lumière émise à 1000 nm aura donc une avance sur celle émise à 600 nm de 27 ns. Cette avance crée une distorsion temporelle du signal, limitant la distance de transmission possible sans régénération du signal [6].

1.7.2 Les effets non linéaires

Les effets non linéaires dans les fibres optiques sont des phénomènes qui ne suivent pas une relation de proportionnalité directe entre l'entrée et la sortie, contrairement aux phénomènes linéaires tels que la réflexion, la réfraction et la diffusion. Ces effets non linéaires sont généralement très faibles, mais peuvent être observés dans les fibres monomode à des puissances relativement peu élevées, pour deux raisons principales : la très faible section de cœur de la fibre, qui génère des intensités lumineuses élevées, et la grande longueur d'interaction, car la lumière se propage avec peu de pertes sur de très longues distances.

Les effets non linéaires peuvent causer des perturbations dans la transmission optique, en particulier lorsque les puissances optiques sont élevées. Ces seuils de puissance sont plus élevés que la puissance habituelle des sources, mais on peut s'en approcher dans les systèmes à amplification optique et à multiplexage en longueur d'onde. Cependant, ces effets non linéaires ouvrent également de nouvelles possibilités pour des applications innovantes dans les communications optiques, comme le changement d'indice, le changement de fréquence, le contrôle de la polarisation et l'interaction entre deux ondes sous l'effet de la lumière.

L'optique non linéaire est devenue une discipline à part entière, qui permet de développer de nouvelles technologies pour le traitement, la communication et le stockage optique des informations. Des recherches sont en cours pour exploiter ces effets non linéaires afin de développer de nouvelles technologies de communication optique à haut débit, telles que les réseaux de capteurs optiques et les réseaux optiques haut débit pour les centres de données. De plus, l'optique non linéaire est également utilisée dans des applications médicales, comme la microscopie à fluorescence et l'imagerie optique cohérente.

1.7.2.1 L'effet Kerr

L'effet Kerr en optique géométrique est une extension de la loi de réfraction de la lumière lorsqu'elle se propage à travers des milieux d'indice de réfraction variable. L'indice de réfraction peut être exprimé par l'équation non linéaire $n = n_0 + n^2$, qui est proportionnelle à la puissance optique. Où n_0 est une constante et n^2 est une fonction quadratique de la puissance. Les non-linéarités provoquent une modulation de phase croisée et des phénomènes connus sous le nom de mélange à trois ou quatre ondes, qui sont responsables de l'intermodulation entre différents canaux dans les systèmes de transmission à plusieurs longueurs d'onde.

1.7.2.2 L'effet Raman

L'effet Raman est un phénomène optique non linéaire qui résulte de la diffusion inélastique de la lumière par les molécules d'un matériau. Lorsqu'une onde électromagnétique, appelée onde pompe, traverse un matériau, une petite fraction de la lumière est diffusée à des longueurs d'onde légèrement différentes. Cette différence de longueur d'onde est due à l'interaction entre la lumière et les vibrations des molécules du matériau, appelées phonons. Lorsque la lumière diffusée est de fréquence inférieure à celle de l'onde pompe, on parle de diffusion Raman Stokes. Lorsque la lumière diffusée est de fréquence supérieure, on parle de diffusion Raman anti-Stokes.

Le spectre Raman est constitué des fréquences de vibration moléculaire qui sont détectées lors de la diffusion Raman. La position des pics du spectre dépend de la composition chimique du matériau et peut être utilisée pour identifier les molécules présentes dans le matériau. Le spectre

Raman est souvent utilisé en spectroscopie pour analyser des échantillons solides, liquides ou gazeux. En plus de la spectroscopie, l'effet Raman est également utilisé en optique pour des applications telles que l'amplification optique, la conversion de longueurs d'onde et la génération de nouvelles fréquences optiques.

1.7.2.3 L'effet Brillouin

La diffusion Brillouin suit un mécanisme de même nature que la diffusion de Raman, mais l'interaction se fait avec des phonons acoustiques, c'est-à-dire des vibrations du matériau provoquées par l'intensité de la lumière, et s'y propageant avec la vitesse V_a des ondes acoustiques, de plusieurs milliers de m/s dans le verre.

On observe principalement une rétrodiffusion Brillouin (en sens inverse) avec un changement de fréquence $\delta\nu_B$ déterminé par l'accord de phase entre les ondes optique et acoustiques :

$$\delta\nu_B = 2\nu_p \frac{n}{c} V_a \quad (\text{Eq I.6})$$

Cette onde est amplifiée avec un gain Brillouin sensiblement plus élevé que le gain Raman. A partir d'un certain seuil plus faible que pour l'effet Raman, on est en régime de diffusion Brillouin stimulée (SBS, stimulated Brillouin scattering). Du fait du faible décalage en fréquence, il n'est sensible, en pratique, que pour les transmissions cohérentes.

Il est principalement utilisé en capteurs, où la variation du décalage de fréquence $\delta\nu_B$, de 10 à 100 MHz, est due aux variations de température ou aux contraintes qui modifient V_a . Ces variations peuvent être observées à distance et localisées grâce à la rétrodiffusion [7].

1.8 Avantage de la fibre optique

Les avantages de la fibre optique sont nombreux :

- Performances de transmission : l'atténuation est très faible, la bande passante est très grande, et il est possible de multiplexer de nombreux signaux et utilisateurs en utilisant différentes longueurs d'onde. Cela permet des systèmes portés (plus de 100 km entre l'émetteur et le récepteur) et de débit (plus de 10 Tbit/s sur une même fibre) très supérieurs à ceux des câbles conducteurs. En revanche, le délai de transmission, lié à la vitesse des ondes, n'est pas significativement différent.
- Avantages de mise en œuvre : la fibre optique est légère, de très petite taille, et très souple, ce qui permet des courbures plus fortes que celles du cuivre. Cela facilite l'installation et réduit fortement la longueur des câbles, que ce soit pour les télécommunications, les réseaux, le câblage des véhicules (aéronautique, ferroviaire, automobile), les installations médicales, industrielles, domotiques, le raccordement d'abonnés, etc. Parallèlement, la mise en œuvre de la fibre optique, notamment le

raccordement, est devenu beaucoup plus facile et moins coûteuse que dans les premières applications, bien que cette image reste attachée à tort à la fibre. De plus, ses faibles pertes contribuent à de sensibles économies d'énergie dans les technologies de l'information.

- Sécurité électrique : il y a une isolation totale entre les terminaux, ce qui permet une utilisation en ambiance industrielle explosive, sous forte tension, en application médicale, etc. La fibre n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même, ce qui facilite le déploiement car elle peut être disposée sans problème à proximité de câbles et de machines électriques. Inversement, les puissances optiques utilisées sont faibles et non dangereuses, sauf à la sortie des amplificateurs optiques, mais ceux-ci sont équipés de connecteurs assurant la sécurité laser. On peut y ajouter une inviolabilité (presque) totale : il est pratiquement impossible d'écouter le signal sur une fibre optique sans être repérable ; les recherches sur la cryptographie quantique ont pour but de renforcer encore cette sécurité.
- Avantage économique : le coût du support de la fibre est bien moins cher que celui du cuivre, et le coût global d'un système sur fibre optique (prenant en compte les interfaces, les raccordements, ainsi que l'installation et les équipements annexes nécessaires) est souvent inférieur à celui d'un système sur cuivre. De plus, la fibre optique contribue significativement à la réduction de la consommation d'énergie. Même si les derniers mètres ou la paire torsadée (le plus souvent, le sans-fil) sont encore largement concurrentiels, l'augmentation continue des débits incite à utiliser l'optique sur des distances de plus en plus courtes [8].

1.9 inconvénient de la fibre optique

Bien que la fibre optique soit largement considérée comme une technologie de transmission de données de haute qualité, il y a quelques inconvénients à prendre en compte :

- Fragilité : La fibre optique est très fine et fragile, elle peut se casser facilement s'il y a des mouvements brusques ou des chocs, ce qui nécessite des réparations coûteuses.
- Exigences d'entretien : Les câbles en fibre optique nécessitent un entretien régulier pour maintenir leur qualité de transmission de données, ce qui peut être coûteux.
- Disponibilité limitée : La fibre optique n'est pas encore largement déployée dans toutes les zones géographiques, ce qui signifie que certains endroits n'ont pas encore accès à cette technologie

1.10 Applications de la fibre optique

En effet, la fibre optique est utilisée dans de nombreuses applications, en voici quelques exemples :

- Les réseaux de télécommunications : la fibre optique est largement utilisée pour transmettre des informations sur de longues distances à grande vitesse dans les réseaux de télécommunications. Elle est utilisée par les entreprises de télécommunications pour offrir des services haut débit à leurs clients.
- Les réseaux de données : les entreprises utilisent la fibre optique pour transmettre des informations à grande vitesse entre les serveurs et les ordinateurs dans les centres de données.
- Les applications médicales : la fibre optique est utilisée en médecine pour les endoscopies et les examens non invasifs. Les fibres optiques permettent de transmettre la lumière à l'intérieur du corps humain, ce qui facilite la visualisation des organes internes.
- La télévision par câble : les fournisseurs de services de télévision par câble utilisent la fibre optique pour transmettre les signaux de télévision à leurs abonnés. La fibre optique offre une qualité d'image supérieure à celle des câbles coaxiaux traditionnels.
- Les capteurs : les fibres optiques peuvent également être utilisées comme capteurs pour mesurer la température, la pression et d'autres variables physiques. Les fibres optiques sont utilisées dans l'industrie automobile, l'aérospatiale, la surveillance des structures et d'autres applications.
- Les applications militaires : les forces armées utilisent la fibre optique pour les communications sécurisées et pour les systèmes de surveillance. La fibre optique est utilisée dans les avions, les navires et les véhicules militaires pour transmettre des données rapidement et en toute sécurité [9].

1.11 Architecture d'une ligne de transmission optique

1.11.1 Définition d'une liaison par fibre optique

Le principe dans les communications optiques consiste à transporter de l'information sous forme lumineuse. Tout système de transmission d'information possède un émetteur et un récepteur. Pour un lien optique, deux fibres sont nécessaires. L'une gère l'émission, l'autre la réception. Il est aussi possible de gérer émission et réception sur un seul brin mais cette technologie est plus rarement utilisée car l'équipement de transmission est plus onéreux [10].

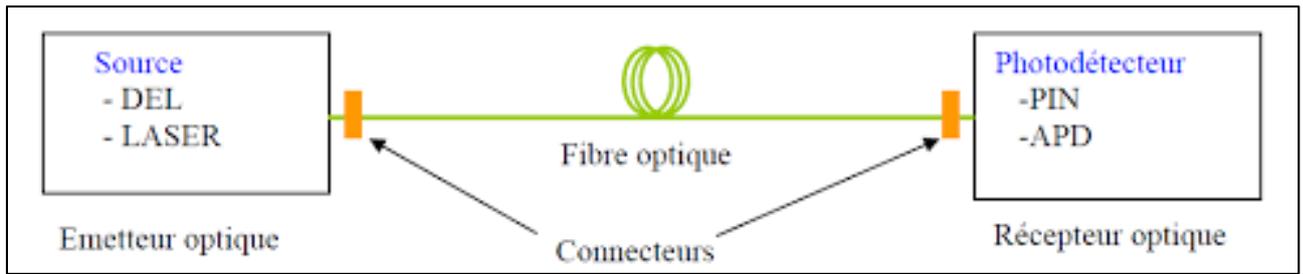


Figure I.11 : Schéma de base d'une liaison optique.

I.11.2 Architecture d'une liaison optique

Dans cette architecture les signaux optiques sont transmis, transférés, régénérés si nécessaire et détectés à l'aide de composants optiques ou optoélectroniques.

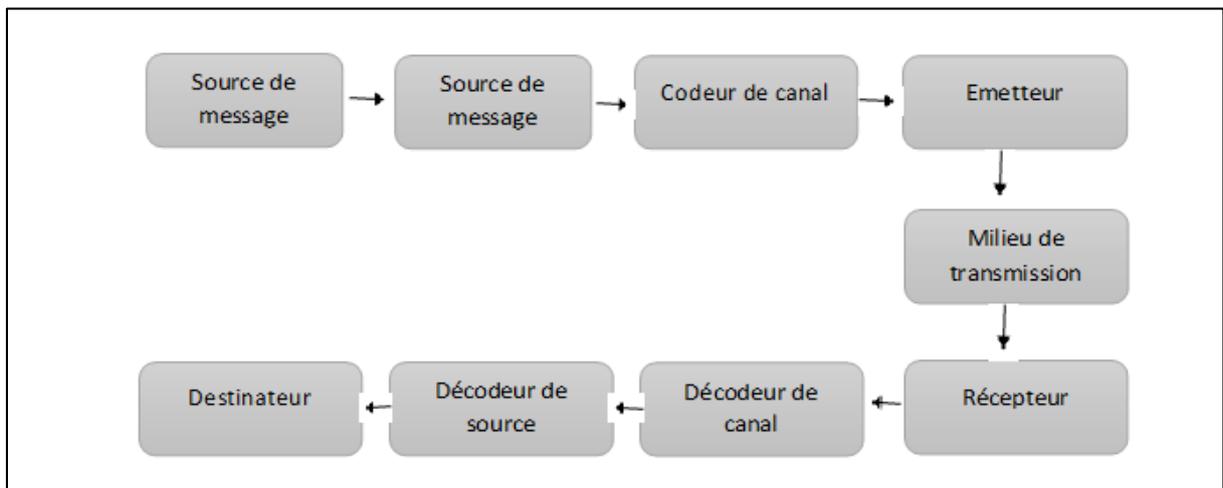


Figure I.12 : Architecture d'une liaison optique.

I.11.2.1 Emetteur

Une source lumineuse est un composant actif dans les communications par fibre optique. Leur fonction est de convertir l'énergie électrique en énergie optique avec des performances satisfaisantes et d'assurer un bon couplage avec la fibre. Être exploitable avec une certaine qualité.

A. la diode LASER

(Amplification de **L**umière par **E**mission **S**timulée de **R**ayonnement)

La DL est une source cohérente et est principalement utilisée dans les systèmes de transmission sur de très longues distances (largeur spectrale étroite ⇒ bande passante élevée). Les diodes laser sont les meilleures sources de communication optique car elles permettent la plus grande efficacité de couplage optique avec les fibres. En pratique, cela consiste à faire passer plusieurs fois le signal optique dans un amplificateur grâce à une boucle de contre-réaction.

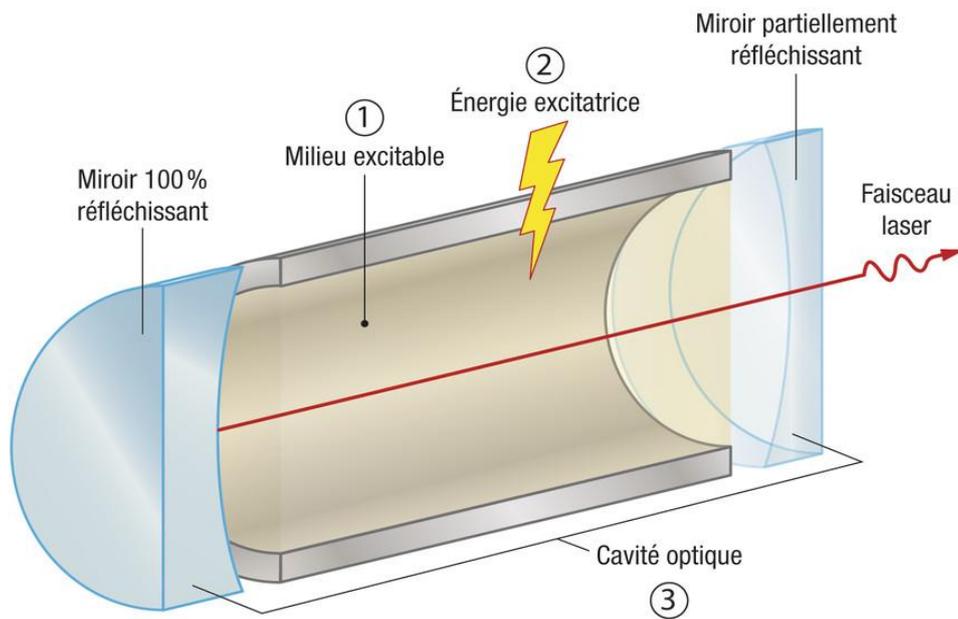


Figure I.13 : Principe de fonctionnement d'un LASER.

B. la diode électroluminescente DEL

Les LED sont des sources lumineuses incohérentes et sont notamment utilisées dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très larges bandes passantes (spectre d'émission assez large \Rightarrow bande passante étroite). L'électroluminescence est le résultat de la recombinaison radiative d'électrons et de trous dans le matériau. Les électrons excités libèrent de l'énergie. Une forme de photons (lumière). Préalablement à la recombinaison, les électrons et les trous sont séparés les uns des autres par induction au sein du matériau (semi-conducteur) pour former une jonction (LED) ou par excitation par bombardement électronique à haute énergie accéléré par un fort champ électrique [11].

Par rapport aux lasers, les LED ont les caractéristiques suivantes :

- Une puissance optique couplée plus faible (quelques μW).
- Une faible fréquence de modulation (50 MHz).
- Une facilité de fabrication (pas de miroirs).
- Un faible coût.
- Une faible dépendance en température [12].

C. Modulateur

Pour transmettre des informations dans des systèmes numériques optiques, c'est nécessaire. Imprimez le signal à transmettre sur la fibre. C'est ce qu'on appelle la modulation. C'est une caractéristique essentielle de tout système de transmission.

I.11.2.2 Récepteur

La fonction des composants de réception est, à l'inverse des émetteurs, de convertir le flux lumineux qui les atteint en énergie électrique. Le plus courant est la photodiode qui convertit le flux incident en courant, photodiode existant en deux types utilisés pour les applications à fibre optique : la photodiode PIN et la photodiode à avalanche.

A. principe des photodiodes

Le principe de la photodiode est l'inverse du principe de la diode lumineuse. Lorsqu'un photon frappe la photodiode, un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction, créant ainsi une paire électron-trou, phénomène appelé absorption intrinsèque. Sous l'influence d'une tension appliquée à la photodiode, l'électron libre va induire un courant dans le circuit externe. Ce courant est proportionnel à la puissance du flux lumineux.

La photodiode de base se compose de deux zones dopées respectivement P et N. lorsqu'une tension inverse est appliquée, un courant infime circule et génère une zone de déplétion de chaque côté de la jonction p-n. la résistance de la zone de déplétion devient très importante. Si des photons viennent à pénétrer dans cette zone de déplétion, les paires électron-trou vont se séparer et chaque composant va rejoindre sa zone respective, créant ainsi le courant électrique.

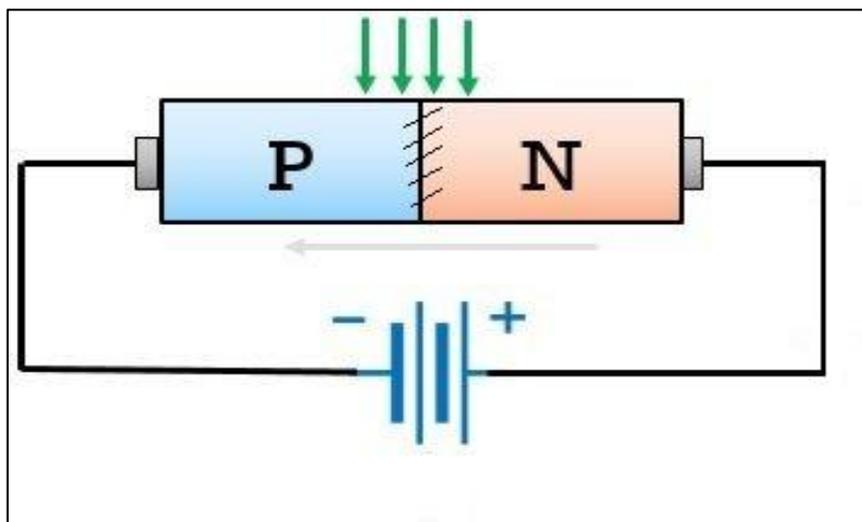


Figure I.14 : Principe de la photodiode.

Les inconvénients de la photodiode ne la rendent pas utilisable telle quelle. Du fait de la petite taille de la zone de déplétion par rapport au volume de la diode, la plupart des photons absorbés ne génèrent pas de courant externe : les électrons libres et les trous créés se

recombinent aussitôt. Il faut donc un flux lumineux très important. De plus, la réponse de cette photodiode est trop lente pour supporter des applications supérieures à quelques KHz. Les photodiodes PIN et avalanche ont été développées pour effacer ces inconvénients.

B. Photodiode PIN

La structure de la photodiode PIN diffère de la structure de base par la présence d'une zone faiblement dopée comprise entre la zone dopée N et une zone fortement dopée P+. Cette zone I, appelée zone intrinsèque, a un comportement tel qu'elle ne sera ni fortement N ni fortement P et elle se comporte ainsi comme la zone de déplétion. Ne disposant pas de porteurs libres, sa résistance est élevée. Les porteurs libérés par les photons incidents sont très rapidement capturés par le champ électrique pour rejoindre les zones N ou P suivant leur charge.

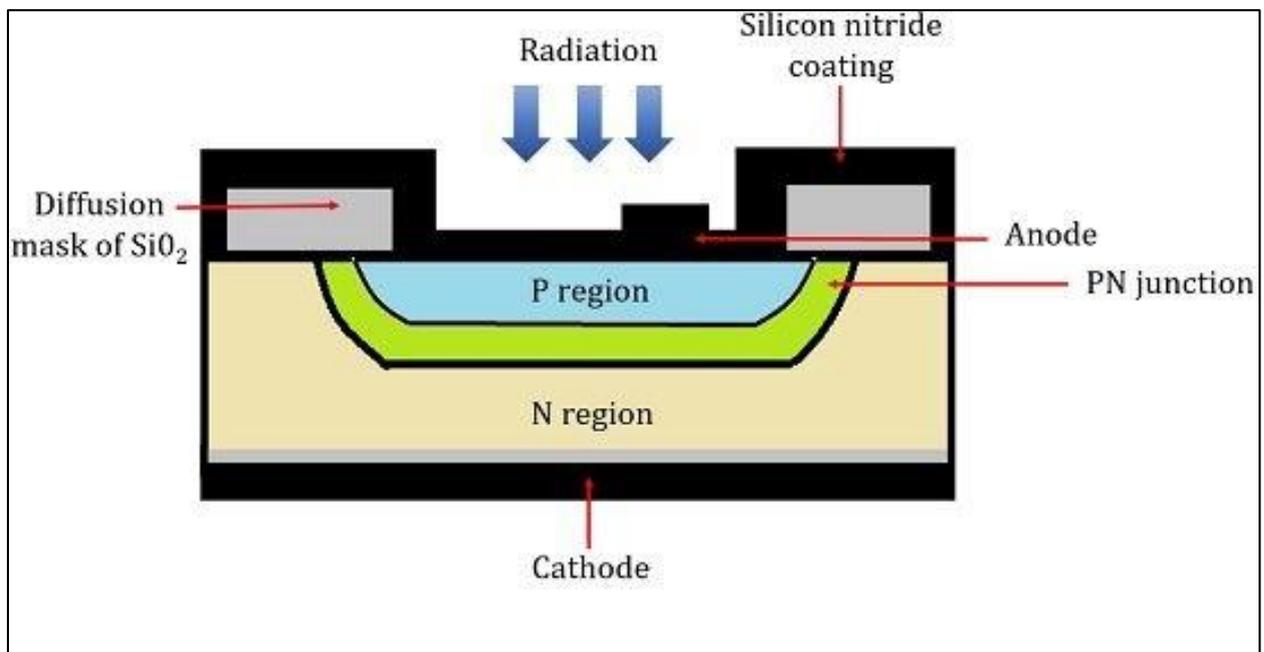


Figure I.15 : Structure d'une photodiode.

Un compromis doit être trouvé pour obtenir une photodiode PIN efficace : pour avoir un bon rendement, la zone de déplétion doit être suffisamment grande, mais la vitesse est ralentie par l'augmentation de cette taille.

I.12 Conclusion

Les fibres optiques ont révolutionné les communications modernes en offrant une bande passante supérieure, une transmission rapide et fiable, une sécurité accrue, une immunité aux interférences électromagnétiques et une distance de transmission plus élevée que les autres moyens de transmission de données. Cela a conduit à leur adoption dans de nombreux domaines, tels que les télécommunications, les centres de données, la télémédecine, la surveillance vidéo, et bien d'autres applications. Avec la demande croissante de connectivité à

haut débit, les fibres optiques continueront d'être un élément clé pour soutenir la croissance de l'Internet et des applications numériques dans les années à venir. Il est donc crucial de comprendre leur fonctionnement et leur utilisation afin de rester à la pointe de la technologie.

Bibliographies

- [1] : PIERRON, 'La refraction - la réflexion totale', Physique – Chimie, Programme : BO spécial n° 4 du 29 avril 2010.
- [2] : Dodo Alexis Déaloué, «télécommunications par fibres optiques», EDiLivre, P19.
- [3] : Dr Z. Sidi Ali Mebarak, «télécommunications optiques», place centrale de Ben-Aknoun (Alger), office des publications universitaires, P24.
- [4] : Philippe Surmely, «la fibre optique technologie et applications», Paris, Milan, Barcelone, Masson, 1995, P31.
- [5] : Experide, « Guide de la fibre optique-2001», édition 2008, 32 rue de l'Avenir 69740 Genas - FRANCE, Vol.45.
- [6] : Philippe Surmely, «la fibre optique technologie et applications», Paris, Milan, Barcelone, Masson, 1995, P15.
- [7] : Pierre Lecoy, «communications sur les fibres optiques», Paris, Lavoisier, 2015, P55.
- [8] : Pierre Lecoy, «communications sur les fibres optiques», Paris, Lavoisier, 2015, P2.
- [9] : Pierre Lecoy, «communications sur les fibres optiques», Paris, Lavoisier, 2015, P4.
- [10] : Togniclo. C, « Etude d'un système de transmission sur fibre optique plastique à saut d'indice »,2011.
- [11] : Transport dans les semi-conducteurs Emmanuel Rosencher, université de Luxemburg, 2010
- [12] : Dr Z. Sidi Ali Mebarak, «télécommunications optiques», place centrale de Ben-Aknoun (Alger), office des publications universitaires, P97.

Chapitre II :
Etudes des réseaux de Bragg fibrés

II.1 Introduction

Lorsque la fibre optique est utilisée pour transmettre des signaux sur de longues distances et à des débits élevés, des altérations du signal en sortie de la fibre peuvent survenir. Bien que l'altération relative à l'amplitude du signal soit facile à corriger, l'étalement temporel provoque une interférence inter-symbole qui rend le signal inintelligible. Pour corriger cela, l'utilisation de réseaux de Bragg est indispensable. Ces réseaux, qui consistent en un court segment de fibre optique d'environ 5 cm, permettent de compenser la dispersion chromatique en forçant les rayons les plus rapides à parcourir une distance supplémentaire par rapport aux rayons les plus lents. Ainsi, la correction de la dispersion chromatique est obtenue et les rayons arrivent en même temps en sortie. De plus, les réseaux de Bragg peuvent être utilisés comme capteurs pour mesurer certaines grandeurs physiques.

Dans ce chapitre, nous présenterons un bref historique des travaux réalisés sur les réseaux de Bragg, ainsi que les notions théoriques sur le phénomène physique et les méthodes d'inscription des réseaux dans les fibres. Nous étudierons également les différents types de réseaux, leurs caractéristiques et leurs applications.

✓ *Historique sur les réseaux de Bragg*

Hill et al. [1] ont découvert la photosensibilité des fibres optiques germano-silicatées en 1978. Deux ondes contre-propageant d'un laser à 488 nm ont créé un motif d'interférence dans la fibre, ce qui a induit la structure de réseau de Bragg de la fibre. La technique d'écriture latérale a facilité la production de FBG et a permis la création de FBG à des longueurs d'onde de télécommunication. Bien que souvent attribuée à Meltz et al [2], cette technique était déjà utilisée au début des années 70 par Laming et al. [3] et Moran et al [4] pour l'enregistrement de réseaux de diffraction holographiques. Depuis lors, les FBG dans les fibres germano-silicatées ont été largement utilisés comme filtres et capteurs. En revanche, les réseaux de Bragg de fibre optique dans les POF ont été présentés pour la première fois en 1999 [5] et, bien que de nombreux efforts de recherche aient été déployés dans ce domaine, ils n'ont pas encore atteint la maturité pour être utilisés dans des applications commerciales.

Ce chapitre décrit plus en détail les réseaux de Bragg à fibre. Cette explication commence par la découverte de celles-ci, du mode de fabrication et de quelques éléments théoriques.

II.2 Définition des réseaux de Bragg

Un réseau de Bragg (Fiber Bragg Grating) est un fragment de fibre optique présentant une structure périodique ou quasi-périodique modifiant l'indice de réfraction du cœur [6]. Lorsqu'un signal optique est transmis à travers ce réseau, il subit des réflexions cohérentes et successives

le long de sa structure (Figure II.1). En d'autres termes, le réseau de Bragg agit comme un miroir pour une bande spectrale spécifique centrée autour d'une longueur d'onde appelée longueur d'onde de Bragg (Figure II.2), tout en restant transparent pour les autres longueurs d'onde. On peut considérer le réseau de Bragg comme un réseau de diffraction unidimensionnel qui diffracte la lumière du mode aller vers le mode retour.

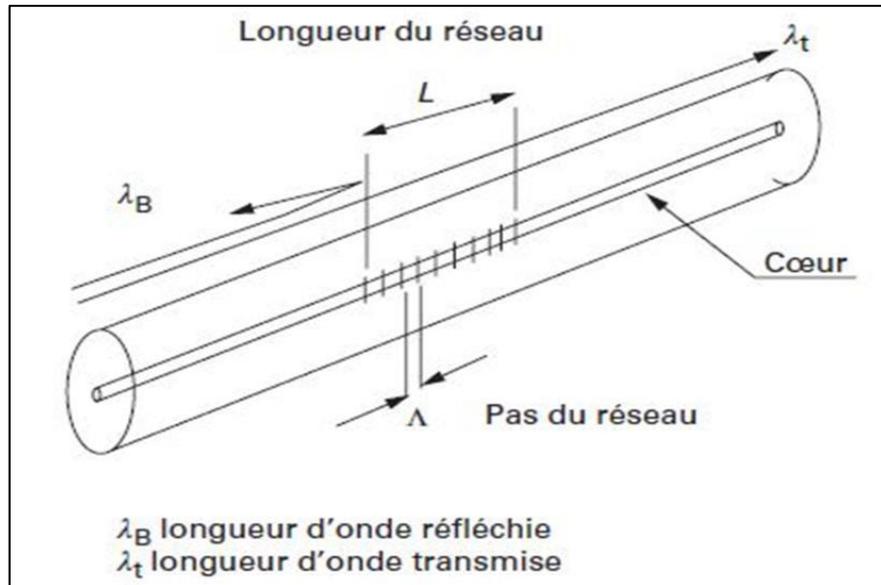


Figure II.1 : Réseau de Bragg.

L'origine des réseaux de Bragg découle de l'application de la théorie de couplage des modes dans la fibre optique. Pour que la lumière soit diffractée de manière efficace dans la direction opposée, la condition de Bragg doit être remplie, ce qui implique que les réflexions issues de chaque période élémentaire doivent être en interférence constructive. Ceci veut dire que la période de Bragg Λ doit respecter la relation suivante :

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{Eq II.1}$$

Où :

- Λ : La période de la modulation d'indice.
- n_{eff} : L'indice effectif de la fibre.
- λ_B : La longueur d'onde de Bragg.

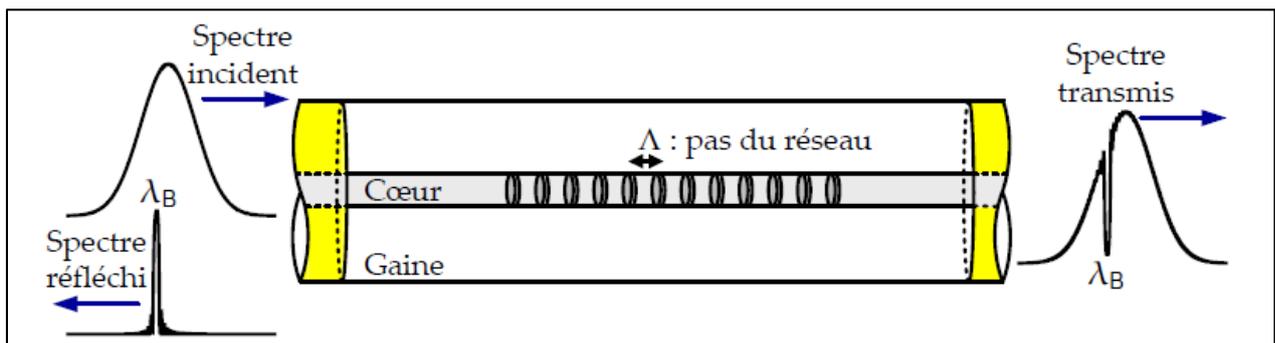


Figure II.2 : Structure d'un réseau de Bragg, le spectre transmis et le spectre réfléchi.

II.3 Principe de fonctionnement

Les réseaux de Bragg à fibre agissent comme des miroirs sélectifs en longueur d'onde très précis. Filtre à bande étroite. Cela signifie que lorsque la lumière d'une source à large bande traverse une fibre optique, seule une largeur spectrale très étroite centrée autour de la longueur d'onde du réseau de Bragg est réfléchi. La lumière restante se déplace le long de la fibre jusqu'au réseau de Bragg suivant sans perdre de puissance. La longueur d'onde d'un réseau de Bragg est essentiellement déterminée par la période de la microstructure et l'indice de réfraction du cœur. Un réseau de Bragg est une structure symétrique, il réfléchit donc toujours la lumière en fonction de sa longueur d'onde, quelle que soit l'origine de la lumière. Différents capteurs issus de réseaux avec des longueurs d'onde spécifiques peuvent être implémentés en série sur la même ligne optique (typiquement jusqu'à 16).

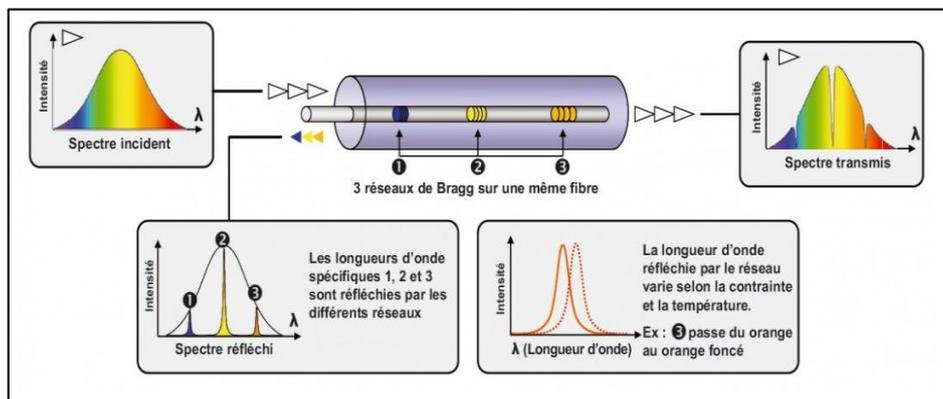


Figure II.3 : Structure d'un réseau de Bragg, le spectre transmis et le spectre réfléchi.

La figure II.3 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 :

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

- Δn_{moy} : La variation de l'indice moyen
- Δn_{mod} : L'amplitude de la modulation
- z : La position dans le réseau
- Λ : La période ou pas de variation de l'indice de réfraction. [7]

II.4 Caractéristiques des fibres à réseau de Bragg

Un des principaux avantages de cette technologie est sa possibilité intrinsèque de multiplexage. En fait, des centaines de réseaux de Bragg peuvent être inscrits sur une simple fibre optique, qui peuvent être étroitement rapprochés de plusieurs millimètres jusqu'à quelques kilomètres. Avec le conditionnement approprié, chacune de ces microstructures peut être sensible aux paramètres autres que la température ou la contrainte, par exemple à la pression, l'accélération, le déplacement, etc. Offrant aux capteurs un large panel de caractéristiques multifonctionnelles. Il est important de souligner que tous les capteurs peuvent être actifs en utilisant une simple source optique. En outre, la possibilité d'ajouter de plus en plus de capteurs sur une même fibre a seulement pour conséquence une perte mineure et aucune interférence sur la bande spectrale de la lumière réservée pour chaque sonde [8].

II.5 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 [9].

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 [10].

II.5.1 Technique des Masques de Phase

L'un des moyens les plus efficaces de créer des réseaux de Bragg à fibres consiste à utiliser un masque de phase comme élément interférant. Le masque de phase est caractérisé par une série de sillons de période Λ et de profondeur δ . Son but est de dévier le faisceau incident selon différents ordres de diffraction (figure II.5). Il existe deux méthodes, la gravure de la résine photosensible avec un faisceau électronique et l'utilisation de l'holographie. L'avantage de la méthode de gravure est que les propriétés du réseau peuvent être ajustées librement. D'autre part, l'erreur de position absolue du faisceau d'électrons est d'environ 5 nm, ce qui est significatif par rapport aux distances courantes dans les FBG. En plus de l'erreur de positionnement, la variation d'uniformité du substrat ou la dissolution de la résine crée des variations de périodicité dans la structure, des phénomènes appelés désadaptations ou erreurs de couture, qui sont transposés lors du recalage du réseau. Les méthodes holographiques ignorent la plupart de ces

problèmes car elles utilisent l'interférométrie, qui garantit la régularité de la période de réseau. En revanche, la réalisation de masques à longue phase peut être problématique car elle nécessite de grandes dimensions et des composants optiques d'excellente qualité (lentilles, miroirs, etc.).

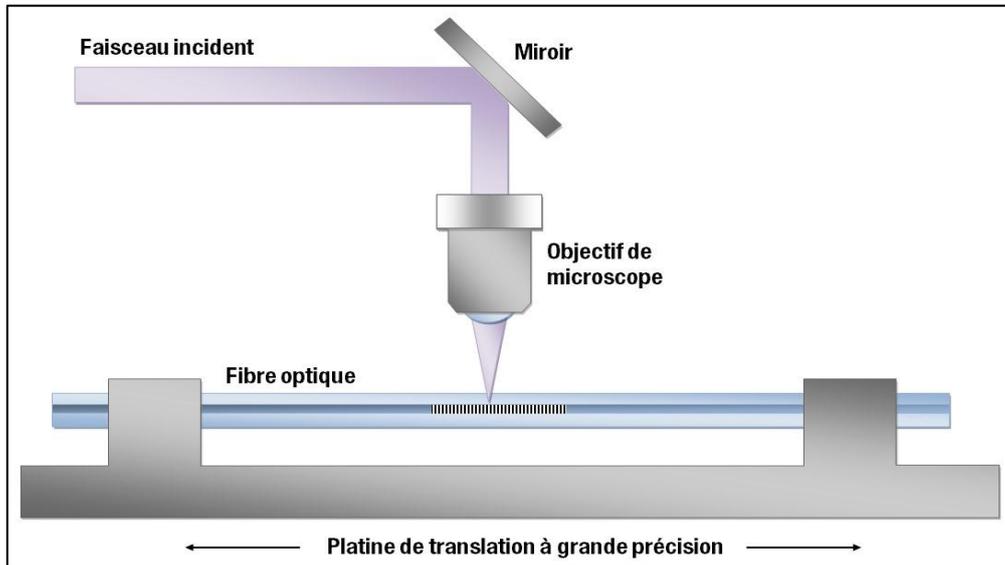


Figure II.4 : Montage d'écriture point-par-point. Une impulsion laser est focalisée dans le cœur d'une fibre. Celle-ci est ensuite déplacée le long de son axe et la procédure est répétée jusqu'à l'obtention de la longueur de réseau voulue.

Principes de description des réseaux à l'aide de masques de phase Bragg est très simple. Tout d'abord, il faut savoir qu'il est généralement préféré Utiliser un masque de phase perpendiculaire au faisceau incident. Cette volonté Obtenir les ordres de diffraction $m = 0$ et $m = \pm 1$. De plus, connaissez le pitch de Longueurs d'onde du masque et du faisceau incident, angles de diffraction des ordres m se calculent facilement grâce à la relation :

$$\sin\left(\frac{\theta_m}{2}\right) = m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad \text{(Eq II.3)}$$

Où $\frac{\theta_m}{2}$ est l'angle de diffraction de l'ordre m .

En quittant le masque, les ordres $m = \pm 1$ se superposent pour créer une figure d'interférence dont la période est égale à :

$$\Lambda_{rés} = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta_m/2)} \quad \text{(Eq II.4)}$$

En choisissant $m = 1$ et en comparant (Eq II.3) et (Eq II.4), on obtient :

$$\Lambda_{rés} = \frac{\Lambda}{2} \quad \text{(Eq II.5)}$$

C'est-à-dire que le pas du réseau est égal à la moitié du pas du masque quelle que soit la longueur d'onde d'exposition. Finalement, on se rappelle que la longueur d'onde de Bragg est liée au pas du réseau. Ainsi, on peut écrire :

$$\Lambda_{rés} = \frac{N\lambda_B}{2n_{eff}} = \frac{\Lambda}{2} \tag{Eq II.6}$$

Cette relation est très utile car elle nous permet de calculer la longueur d'onde. Bragg avec des paramètres faciles à comprendre.

Par ailleurs, il faut noter que les ordres $m \neq \pm 1$ sont nuisibles à la figure d'interférence puisqu'ils dégradent la visibilité des franges. Or, les ordres supérieurs à $m = \pm 1$ sont généralement beaucoup plus faibles en intensité que ces derniers ce qui n'est pas nécessairement le cas pour l'ordre $m = 0$ que l'on doit minimiser. Pour cela, nous ajustons la profondeur de rainure du masque en utilisant la relation

$$\delta(n_{mp} - 1) = \frac{\lambda}{2} \tag{Eq II.7}$$

- n_{mp} est l'indice de réfraction du matériau (généralement de la silice) qui constitue le masque de phase.

Cette relation est également valable pour les sources monochromatiques sans divergence. En réalité, la source n'est jamais complètement monochromatique et privée de divergence. Par conséquent, même s'il est possible de le réduire à un niveau en-deça de 0,5%, il ne peut être totalement éliminé.

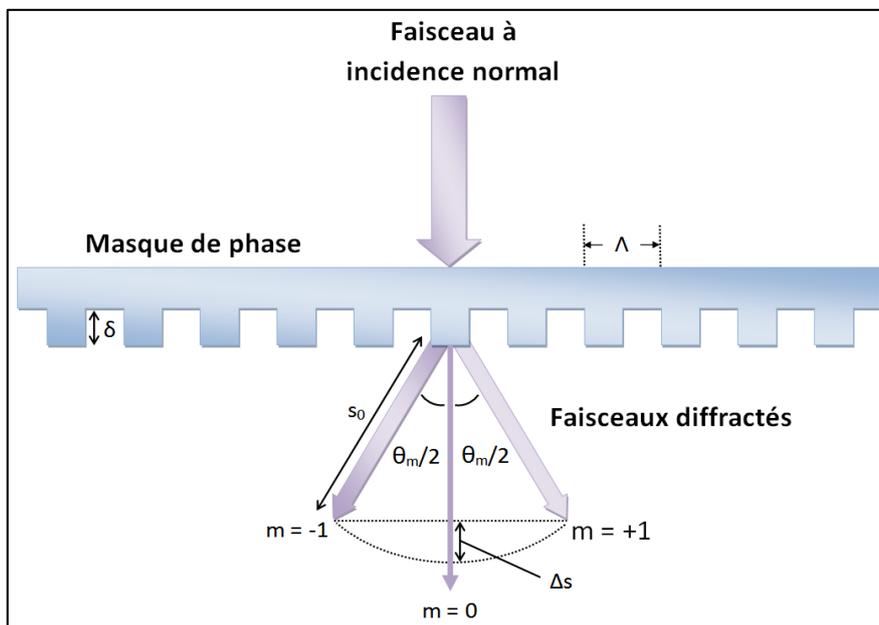


Figure II.5 : Schéma d'un masque de phase de pas Λ et de profondeur de rainure δ , ainsi que son effet diffractif sur un faisceau à incidence normale.

Un moyen simple de s'affranchir de son effet est tout simplement de le bloquer par un obstacle. En contrepartie, il faudra le faire contourner par les ordres de diffraction ± 1 à l'aide de deux miroirs solidaires. Cette configuration est appelée interféromètre de Talbot (figure II.6).

Les deux miroirs intégrateurs peuvent être déplacés latéralement et tournés sur eux-mêmes,

permettant un certain réglage de la longueur d'onde de Bragg selon (Eq II.4). L'avantage d'éloigner la zone d'interférence du masque est que le risque d'endommagement du masque est considérablement réduit. En effet, le faisceau incident est généralement focalisé au niveau de la fibre grâce à une lentille cylindrique placée en amont du masque. Ceci permet une densification de l'intensité laser qui augmente le taux de repérage. D'autre part, si le masque est trop proche de la fibre, la plus grande densité optique peut provoquer une modification permanente de l'indice de réfraction dans le masque.

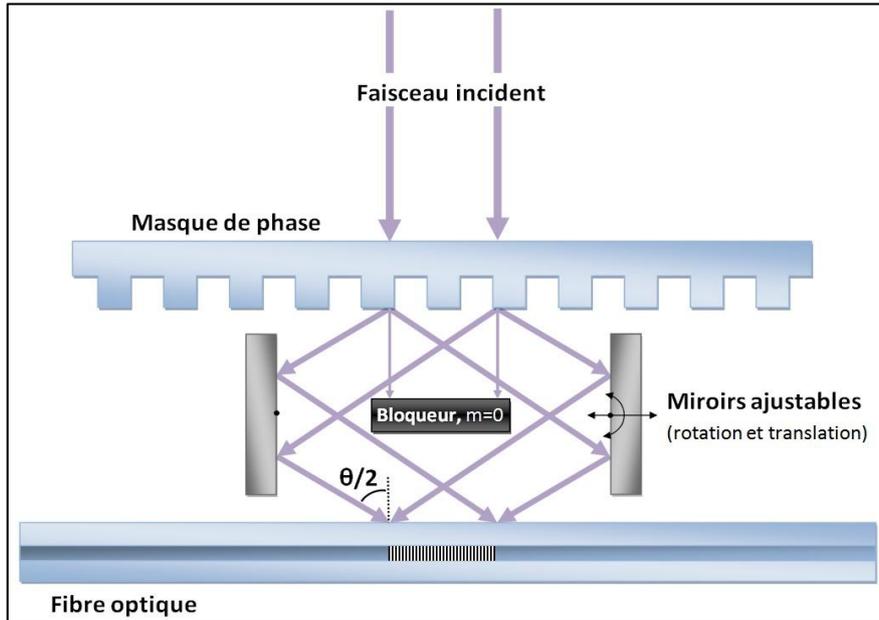


Figure II.6 : Schéma d'un interféromètre de Talbot. [9]

Malgré ce fait, le masque de phase est souvent utilisé seul (figure II.7) et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, même avec des focales relativement courtes (≈ 10 mm), la distance masque-fibre d peut être de quelques millimètres sans danger pour le masque tout en obtenant une bonne modulation d'indice du réseau. Deuxièmement, même si l'interféromètre de Talbot est considéré comme stable, le retrait des miroirs et la plus petite distance de parcours dans l'air rendent la technique par masque de phase encore plus avantageuse au niveau de la stabilité. Un avantage fortuit de ce type de montage, lorsque la source d'inscription est un laser femtoseconde, est qu'il utilise l'effet de séparation des ordres (walk-off effect) pour s'affranchir de l'influence de l'ordre zéro de diffraction. En se basant sur la figure II.4, on peut montrer par un simple argument géométrique que la distance de séparation des ordres Δs varie en fonction de l'angle de diffraction $\theta_m/2$ et la distance de propagation s_0 selon

$$\Delta s = s_0 \left(1 - \cos \frac{\theta_m}{2} \right) \quad \text{(Eq II.8)}$$

Ainsi, pour une certaine propagation s_0 , la distance de séparation des ordres Δs devient suffisamment large pour dépasser l'étalement spatial de l'impulsion. Pratiquement, cela

implique que des ordres de diffraction de valeurs différentes ne peuvent plus interférer. À titre d'exemple, pour un faisceau d'inscription de 400 nm avec une largeur d'impulsion de 120 fs, l'interaction entre les ordres ± 1 et 0 devient inexistante après une propagation de $s_0 = 230\mu\text{m}$. Typiquement la fibre est placée à des distances de l'ordre du mm du masque. Par conséquent, l'ordre 0 de diffraction ne peut nuire à l'interférence des premiers ordres de diffraction et la visibilité des franges en sera maximisée.

Le masque de phase peut être utilisé de façon statique, mais aussi balayé sur toute sa surface par le faisceau d'inscription. En déplaçant ce dernier relativement au masque de phase, il est possible d'écrire des réseaux beaucoup plus longs et plus réfléchifs (figure II.7). Cette technique est appelée balayage du masque de phase (scanned phase-mask interferometer ou phase-mask scanning) et a été proposée par Martin et al. en 1994. La longueur du réseau, L , est alors donnée par

$$L = L_t + L_i \quad (\text{Eq II.9})$$

Où L_t est la distance de translation et L_i la longueur de la zone d'interférence donnée par

$$L_i = 2W - 2d \tan\left(\frac{\theta_m}{2}\right) \quad (\text{Eq II.10})$$

Où W est le rayon du faisceau au niveau du masque. Elle peut aussi servir pour l'inscription de réseaux à pas variables. De plus, en plaçant un actuateur piézoélectrique sous la lentille placée en amont du masque de phase, il est possible de maximiser la couverture du cœur dans la direction transverse de la fibre (figure II.8). Des conditions quant à la fréquence de balayage et la vitesse de translation du faisceau d'inscription doivent toutefois être respectées pour obtenir un profil d'indice uniforme [9].

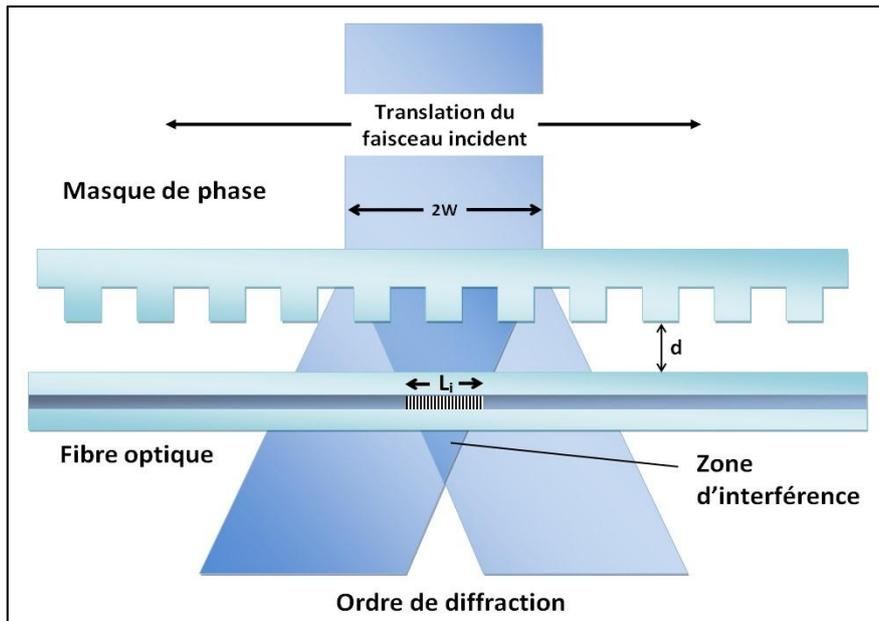


Figure II.7 : Schéma d'un montage de masque de phase utilisé en translation. La longueur du réseau est seulement limitée par la longueur du masque.

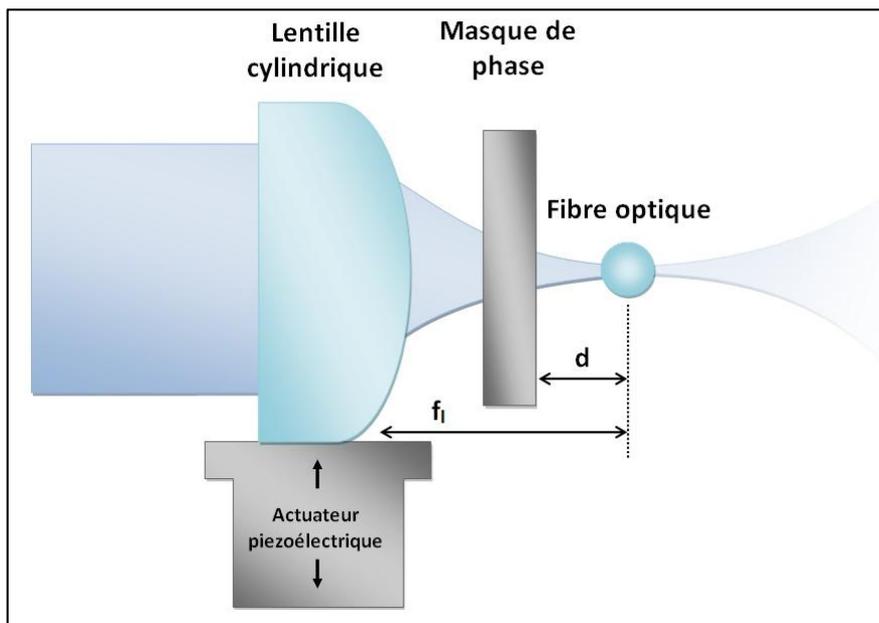


Figure II.8 : Vue de profil du montage de masque de phase utilisé en translation montrant un actuateur piézoélectrique sous la lentille permettant de maximiser dans la direction transverse la zone de changement d'indice.

II.5.2 Technique de miroir de Lloyd

Pour agrandir le faisceau laser UV dans le plan horizontal, un télescope cylindrique afocal est utilisé afin d'obtenir une taille deux fois plus grande que le réseau souhaité, comme le montre la figure II.9. Ensuite, une lentille cylindrique parallèle à la fibre est utilisée pour focaliser le faisceau dans le plan vertical sur le cœur à photo-inscrire. La fibre est ensuite positionnée de

manière à être exposée à la fois par le faisceau incident et le faisceau réfléchi par le miroir de Lloyd. Ce dernier est ajusté pour refléter la moitié du faisceau incident.

Lorsque les deux faisceaux se croisent sur la fibre, des franges d'interférence se forment, ce qui entraîne une modulation de l'indice proportionnelle à la quantité d'insolation UV reçue [11].

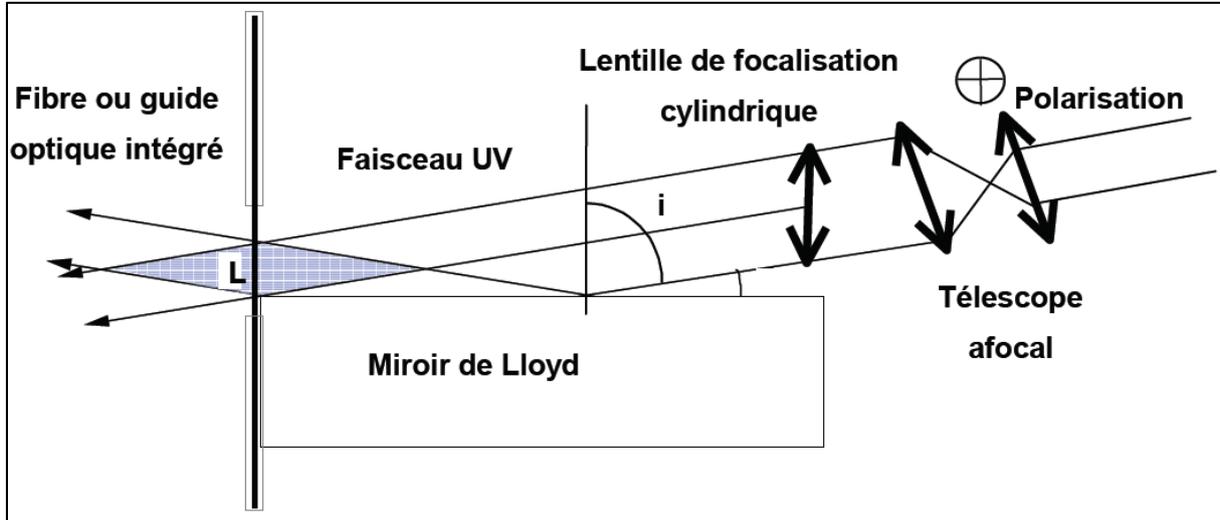


Figure II.9 : Schéma du montage de photo inscription par miroir de Lloyd.

II.5.3 Technique d'inscription point-par-point des réseaux de Bragg

La technique d'écriture point-par-point [12] consiste à focaliser fortement un faisceau laser à l'aide d'un objectif de microscope à grande ouverture numérique ($NA > 0,4$) à l'intérieur du cœur d'une fibre (voir figure II.4). La fibre est ensuite déplacée d'une distance Λ_g le long de son axe. Cette distance correspond au pas du réseau. Une seconde exposition est effectuée à la nouvelle position. Ces étapes sont répétées jusqu'à l'obtention de la longueur de réseau voulue. L'avantage principal de cette technique est sa grande versatilité. En effet, parce que le réseau est bâti une frange à la fois, il est possible de personnaliser le profil d'écriture. Par exemple, en ajustant la distance Λ_g entre chaque exposition, un réseau à pas variable peut être fabriqué.

En contrepartie, l'inconvénient majeur de cette technique est la nécessité d'utiliser une platine de translation de très haute précision (surtout pour les pas plus courts). La stabilité de la période Λ_g et, par la même occasion, des caractéristiques du réseau en dépendent. Cette faiblesse explique pourquoi elle a couramment été employée pour l'écriture de LPG même s'il a été possible d'écrire des FBG depuis le début des années 90 [12]. Il est possible de contourner ce problème en modulant la sortie du laser à l'aide, par exemple, d'un obturateur. L'obturateur, plus précis, permet l'écriture d'un réseau de pas $\Lambda_g = \vartheta/f_0$ contrôlé par sa vitesse de translation ϑ et sa fréquence d'ouverture f_0 avec une bonne répétabilité. Cette technique est plus particulièrement utilisée dans le cas d'inscription de LPG. Pour les FBG, l'approche par

impulsion unique est préférable. La modulation se fait alors par le laser impulsionnel lui-même et la période du réseau est donnée par $\Lambda_{rés} = \vartheta / f_{laser}$ où f_{laser} est la fréquence de répétition du laser. [13]

II.5.4 Méthode holographique

Le principe de cette méthode d'inscription transverse est basé sur la division d'un champ ultraviolet selon deux faisceaux qui interfèrent, pour former des franges d'interférences sur la partie de la fibre insolé et induisent ainsi une modulation de l'indice de réfraction. Le montage expérimental utilisé est décrit sur la figure II.10. En utilisant des miroirs orientés vers la zone à graver et un champ d'interférences produit par deux faisceaux (UV) cohérents à 244 nm, les auteurs ont permis de graver un (FBG) transverse à la fibre, de longueur 4.4 mm, avec une modulation d'indice de réfraction d'environ 3.10^{-5} [2][14].

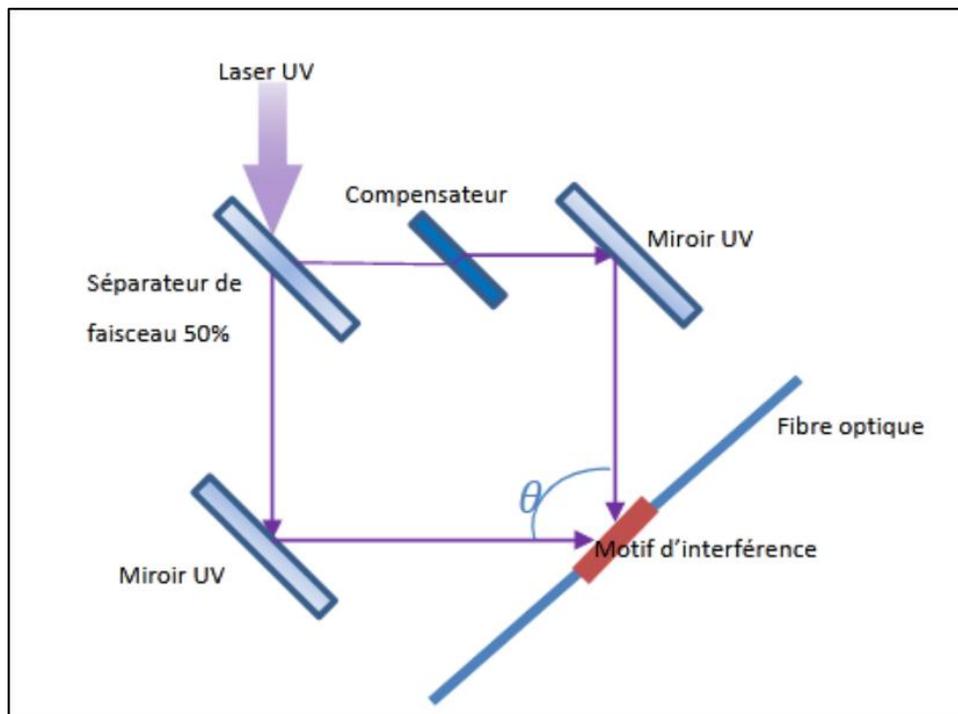


Figure II.10 : Principe d'exposition de RDB par méthode holographique.

La longueur d'onde de Bragg du réseau photo inscrit par cette méthode étant lié à l'angle que font les deux faisceaux qui interfèrent, permet la fabrication de réseaux de Bragg à des pas différents et avec des caractéristiques appropriées pour des applications dans le domaine des télécommunications et le domaine des capteurs. La longueur d'onde de Bragg est donnée par cette relation :

$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \lambda_{uv}}{n_{uv} \sin(\theta/2)} \quad (\text{Eq II.11})$$

Où :

- n_{eff} est l'indice de réfraction effectif du cœur de la fibre,
- λ_{uv} est la longueur d'onde du laser
- n_{uv} est l'indice du milieu (l'air) d'où passe le faisceau laser [15].

II.6 Les types de réseaux de Bragg

Les réseaux de Bragg permettent de sélectionner une longueur d'onde ultra précise grâce à un miroir optique qui a d'abord été photo-imprimé dans une fibre optique. Différents types de profils FBG existent.

II.6.1 Réseau de Bragg uniforme

La théorie des modes couplés permet de dériver les propriétés optiques des réseaux de Bragg. Cette section présente une dérivation sommaire des principales quantités importantes dans l'analyse des réseaux de Bragg uniformes. Un réseau de Bragg consiste généralement en un changement d'indice sinusoïdal au cœur de la fibre. Selon la théorie des modes couplés, cette perturbation périodique entraîne un couplage entre différents modes de propagation si la condition d'accord de phase est respectée :

$$\beta_1 = \beta_2 \quad (\text{Eq II.12})$$

Où β_1 et β_2 représentent les constantes de propagation des modes se propageant dans les directions opposées dans le cas des réseaux de Bragg. Cette condition est l'analogie optique de la conservation de la quantité de mouvement. Le désaccord de cette condition s'exprime comme étant :

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (\text{Eq II.13})$$

Pour obtenir $\Delta\beta = 0$, on ajoute un terme associé à la perturbation périodique du réseau de Bragg :

$$\Delta\beta = \beta_1 \pm \beta_2 - \frac{2\pi N}{\Lambda} \quad (\text{Eq II.14})$$

Où Λ est la période de la perturbation et N un nombre entier. Dans le cas d'un réseau de Bragg, le signe d'Eq II.14 sera positif de par le sens de propagation opposé. Dans le cas où l'on couplerait deux modes se propageant dans la même direction, l'Eq II.14 entraîne que la période nécessaire soit beaucoup plus longue, on aura alors un réseau à longs pas [16].

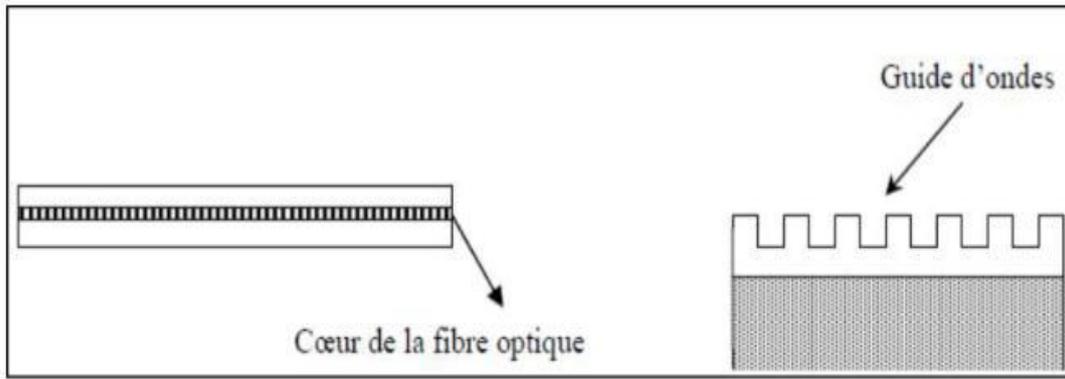


Figure II.11 : réseau de Bragg uniforme. [11]

II.6.2 Réseau de Bragg « tilted » ou « blazed »

Dans ce type, la variation de l'indice de réfraction est inclinée à un angle par rapport à l'axe central de la fibre, la quantité d'inclinaison affecte la longueur d'onde réfléchie et la largeur de bande, Figure II.12 :

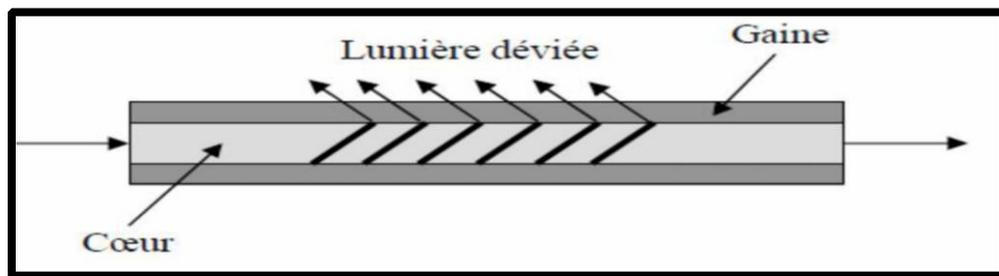


Figure II.12 : réseau de Bragg « tilted »

II.6.3 Réseau de Bragg à pas variable ou « chirped »

Ils présentent un pas de modulation d'indice continûment variable (Chirped Grating). Leur structure n'étant pas rigoureusement périodique (le pas de la modulation d'indice augmente, par exemple, continûment d'un bord du réseau à l'autre), leur réponse spectrale est élargie, ce qui permet de réaliser des filtres large bande jusqu'à plusieurs dizaines de nanomètres. En effet, cette variation continue du pas du réseau entraîne un étalement du pic réfléchi [le pas variant de Λ_{min} à Λ_{max} , le spectre s'étale de λ_{min} à λ_{max} telles que $\lambda_i = 2 n_e \Lambda_i$ (i variant de min à max)]. Le spectre de ce type de filtre présente des fronts montant et descendant s'étalant sur plusieurs nanomètres ; il peut être utilisé comme discriminateur de raie spectrale. Ces réseaux peuvent également être mis à profit pour réaliser des compensateurs de dispersion chromatique ; c'est-à-dire pour contrebalancer l'élargissement des impulsions dans les transmissions numériques à haut débit, la dispersion conduit à une redistribution des composantes spectrales lors de la propagation (les composantes hautes fréquences – de plus faibles longueurs d'onde –

composent le front des impulsions et réciproquement, suivant une répartition quasi linéaire). Les réseaux de Bragg à pas variable compensent cet effet néfaste. Puisque la longueur d'onde la plus élevée est retardée, elle compense le retard de longueur d'onde inférieur qui précède l'impulsion en la réfléchissant au début du réseau. Enfin, l'impulsion est ajustée après réflexion parfaite dans le réseau. Les effets de dispersion sont au moins partiellement compensés. Selon l'état actuel de la technique, des retards supérieurs à 1 ns peuvent ainsi être compensés [17].

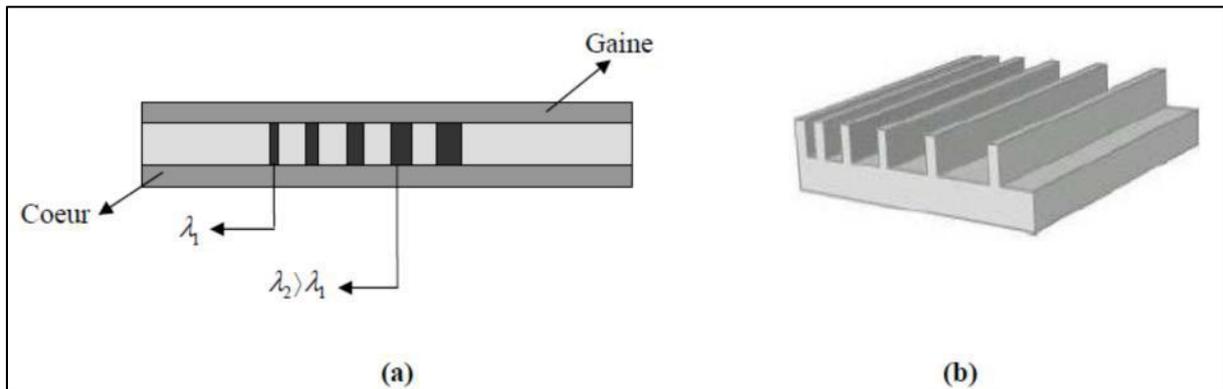


Figure II.13 : Réseau de Bragg «chirped».

II.6.4 Réseau de Bragg «apodisé»

Le profil d'indice d'un réseau de Bragg peut être modélisé de la façon suivante :

$$\delta n(z) = \left[\overline{\Delta n} + \Delta n \cos \left(\left(\frac{2\pi N}{\Lambda} \right) z + \varphi(z) \right) \right] \quad \text{(Eq II.15)}$$

On peut relier Δn à $\overline{\Delta n}$ l'aide de la visibilité tel que $\Delta n = v \overline{\Delta n}$. L'équation devient alors :

$$\delta n(z) = \overline{\Delta n} \left[1 + \frac{v}{2} \cos \left(\left(\frac{2\pi N}{\Lambda} \right) z + \varphi(z) \right) \right] \quad \text{(Eq II.16)}$$

Dans le cas d'un réseau uniforme, la visibilité V est constante tout au long du réseau, mais il est possible de fabriquer des réseaux ayant une visibilité variable $v(z)$ • On parlera alors d'un réseau apodisé.

L'effet de ces modifications devient évident lorsque l'on considère les réflexions de réseau dans l'analyse de Fourier. Une telle analyse est justifiée dans le cas des réseaux de Bragg faibles, comme expliqué dans la section précédente. Un réseau unitaire a une longueur finie, il a donc un début et une fin abrupts. La transformation d'une telle structure rectangulaire donne un spectre en forme de sinus cardinal, comme le montre la figure 6. De même, un profil de visibilité gaussien se traduit également par un spectre d'aspect gaussien, éliminant ainsi les lobes secondaires dans le spectre de réflectance, comme le montrent Matsubara et al. Certaines des fonctions d'apodisation les plus couramment utilisées comprennent le cosinus surélevé, la tangente hyperbolique et les fonctions gaussiennes. L'apodisation d'un réseau de Bragg élimine

non seulement les lobes latéraux du spectre réfléchi, mais affecte également sa dispersion. L'apodisation est très utile dans les systèmes de démultiplexage où les lobes secondaires limitent la séparation spectrale, car des interactions indésirables peuvent exister entre des lobes de signal adjacents [18].

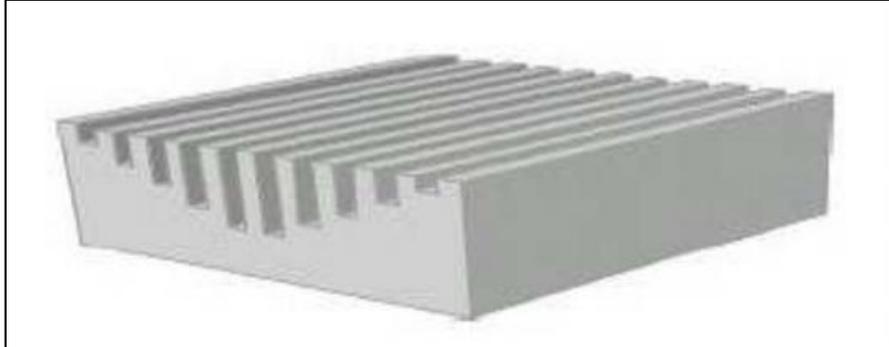


Figure II.14 : Réseau apodisé intégré dans un guide d'onde.

Dans la Figure II.14, on peut observer un réseau sur semi-conducteur qui présente une apodisation. Cette apodisation est caractérisée par une variation du coefficient de couplage le long de la structure, qui est obtenue grâce à une modification de la profondeur de gravure.

II.6.5 Réseau de Bragg échantillonné

Un réseau échantillonné est constitué d'un réseau droit, à la longueur d'onde prédéfini, multiplié par la fonction d'échantillonnage. Ça peut modélisant la réflectance complexe d'un réseau échantillonné à partir de la théorie de Mode couplé ou Théorie des matrices de transfert, mais surtout nécessaire définir les paramètres clés en modifiant ses propriétés en phase et en amplitude.

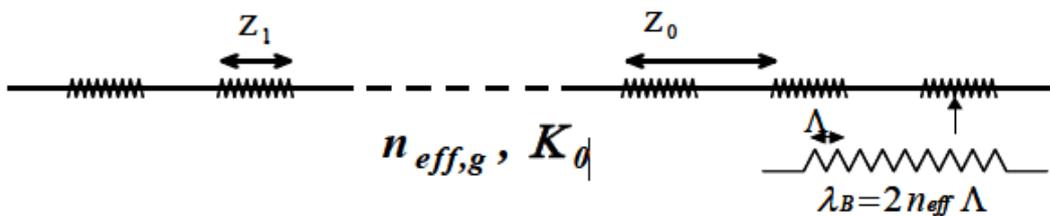


Figure II.15 : un réseau de Bragg Echantillonné.

Un réseau de bragg à la longueur d'onde λ_B (définie par le pas Λ et l'indice effectif n_{eff}), est localisé sur une longueur Z_1 avec un coefficient de couplage k_0 [19]. Le réseau est ensuite répété m fois (nombre de période d'échantillonnage) avec une période Z_0 . La longueur totale de réseau échantillonné est donc $L_{SBG} = mZ_0$. La réponse spectrale de ce réseau étant la transformée de Fourier de son profil d'indice, le résultat donne un peigne de réflecteurs de

Bragg, espacés régulièrement de la fréquence d'échantillonnage ISL_{SBG} le plus souvent exprimée en GHz (Eq II.17) [20].

$$ISL_{SBG} = \frac{c}{2n_{eff}z_0} \quad (\text{Eq II.17})$$

II.6.6 Réseau de Bragg à saut de phase

Les sauts de phase se produisent lorsqu'il y a une discontinuité dans la phase du réseau de Bragg, ce qui peut avoir un impact significatif sur le spectre de réflexion du réseau.

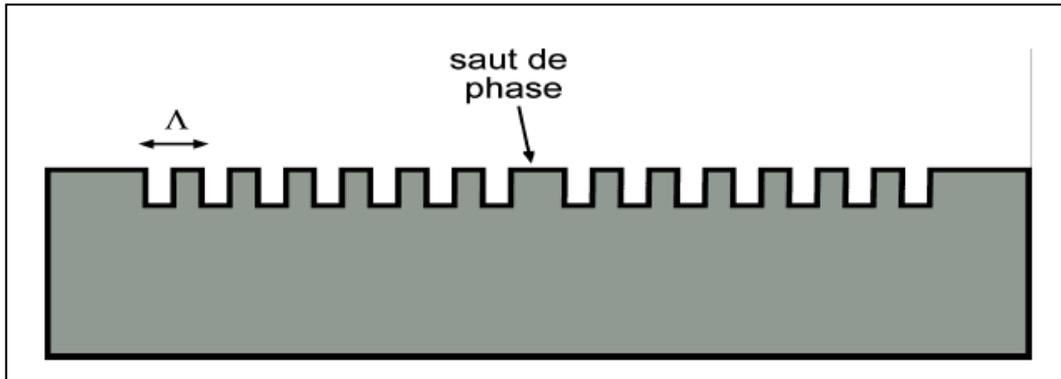


Figure II.16 : Réseau présentant un saut de phase.

II.7 Application des réseaux de Bragg

Depuis que le réseau de Bragg a vu le jour, ses applications ne cessent d'augmenter d'un jour à l'autre, dans tous les domaines, parmi ces applications on cite :

II.7.1 Application des réseaux de Bragg à la télécommunication

Les réseaux de Bragg sur fibre optique ont désormais un rôle essentiel dans les télécommunications : [21]

- Filtres réglables à bande étroite et à large bande.
- Convertisseur de mode a fibre optique.
- Filtre de longueur d'onde sélective, multiplexeurs démultiplexeurs (WDM).
- Compensateur de la dispersion chromatique dans les réseaux de télécommunications à grande distance.
- Analyseurs de spectre.
- Compensation de la dispersion chromatique.

II.7.2 Autres application de réseau de Bragg

Les réseaux de Bragg ne cessent d'évoluer pour ne plus se limiter qu'à la télécommunication. Aujourd'hui, on trouve leur application dans d'autres domaines notamment :

II.7.2.1 Tension

Le réseau de Bragg est sensible aux changements de tension. L'équation 1.2 représente la relation entre la variation de tension et le déplacement de la longueur d'onde de Bragg :

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon_Z \quad (\text{Eq II.19})$$

Où

- λ_B : Est la longueur d'onde de Bragg
- ε_Z : Est la déformation axiale
- P_e : Est une constante effective de tension-optique :

$$P_e = \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \quad (\text{Eq II.20})$$

Où

- n : Est l'indice du cœur de la fibre optique
- P_{11} / P_{12} : Sont les composants du tenseur optique
- ν : Représente le coefficient de poisson [22].

II.7.2.2 Température

Les réseaux de Bragg sont aussi sensibles aux variations de la température. En effet, la dilation thermique entraîne un déplacement de la longueur d'onde de Bragg. La relation de la longueur d'onde avec la température est exprimée par :

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T \quad (\text{Eq II.21})$$

Où

- $\alpha = \left(\frac{1}{\Lambda}\right) \left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right) \quad (\text{Eq II.22})$

$\Delta\lambda_B$: Est la variation de la longueur d'onde de Bragg

ΔT : Exprime une variation de la température

Λ : Est la période du réseau

α : Est le coefficient d'expansion thermique pour la fibre

ζ : Représente le coefficient thermo-optique (environ égal à (8.6×10^6) pour la fibre de silicedopée au germanium)

n : Est l'indice effectif

II.7.2.3 pression

Le déplacement de la longueur d'onde de Bragg est proportionnel à la variation de la pression

$$\Delta\lambda_P = \lambda_B \left(\left[-\left(\frac{1-2\nu}{E}\right) + \frac{n^2}{2}(1-2\nu)(2P_{12} + P_{11}) \right] \right) \quad (\text{Eq II.24})$$

E : représente le module de Young de la fibre optique

II.7.2.4 En automobile

Les réseaux de Bragg et les fibres optiques existent depuis un certain temps. Cependant, ces applications ne peuvent pas être réservées au grand public. Dans le domaine automobile, les réseaux de Bragg peuvent être utilisés pour la qualification des processus et des véhicules, mais ne peuvent pas encore être intégrés dans les voitures de tourisme. Des études en cours permettent néanmoins d'envisager une réduction importante des coûts par le développement d'interrogeurs moins chères. Les fibres utilisées dans l'automobile sont actuellement principalement utilisées pour l'éclairage d'habitacle (fibres plastiques) ou les systèmes multimédia [23].

II.8 La théorie des modes couplés

La théorie des modes couplés est une méthode courante. 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[24].

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 réseauetc ; elle prend en considération les échanges d'énergie entre les différents modes de propagation [25].

II.9 Conclusion

Les réseaux de Bragg jouent un rôle essentiel dans les systèmes de télécommunication. Ils sont particulièrement utiles en association avec des amplificateurs à fibre et offrent une grande flexibilité et une conception adaptée aux besoins de l'utilisateur. Leur efficacité spectrale élevée en fait la solution privilégiée pour l'espacement de canal très bas, ce qui les rend extrêmement précieux pour des applications telles que l'égalisation du gain et la compensation chromatique de dispersion.

Les réseaux de Bragg sont largement utilisés dans les systèmes de communication optique, en particulier dans les systèmes multiplexés en longueurs d'onde (WDM) et les modules de compensation de la dispersion chromatique. Leur utilisation permet d'améliorer les performances des systèmes de communication en minimisant les altérations du signal et en assurant une transmission de haute qualité sur de longues distances.

En conclusion, les réseaux de Bragg occupent une place centrale dans les systèmes de communication optique et offrent des solutions précieuses pour optimiser les performances des réseaux de télécommunication. Leur utilisation continue de se développer et de trouver de nouvelles applications dans le domaine de la transmission de données à haut débit.

Bibliographies

- [1]: K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B.S. Kawasaki. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, P647– 649, 1978.
- [2]: G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters*, P823–825, 1989.
- [3]: F. P. Laming. Holographic Grating Formation in Photopolymers Polymethylmethacrylate. *Polymer Engineering and Science*, P421–425, 1971.
- [4]: J. M. Moran and I. P. Kaminow. Properties of Holographic Gratings Photoinduced in Polymethyl Methacrylate. *Applied Optics*, 1964–1970, 1973.
- [5]: G. D. Peng, Z. Xiong, and P. L. Chu. Photosensitivity and Gratings in Dye-Doped Polymer Optical Fibers. *Optical Fiber Technology*, P242–251, 1999.
- [6]: MAGNÉ Julien, "Traitement optique du signal émis par un laser à fibre mode-locked passif", thèse de doctorat, Université LAVAL, QUÉBEC, Septembre 2007.
- [7]: «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.
- [8]: I.FSAIFES, « Encodage ET décodage temporel "Tout-optique" à réseau de Bragg pour l'accès multiple », Ecole supérieur de télécommunication, paris. 2007.
- [9]: Pierre Vinchon, «Optimisation de Masques de Phase pour l'exposition de Réseaux de Bragg à périodes variables sur fibre optique», Université du Québec, 2015.
- [10]: «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.
- [11]: HALASSA, M., & KHEMISSAT, Y. *Etude Des Réseaux De Bragg Dans Les Fibres Optiques* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA).
- [12]: K. Hill, B. Malo, K. Vineberg, F. Bilodeau, D. Johnson et I. Skinner, « Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings », *Electronics Letters*, vol. 26, no. 16, p. 1270 –1272, 1990.
- [13]: Carrier, J. (2013). *Écriture de réseaux de Bragg par laser femtoseconde à 400 nm* (Doctoral dissertation, Université Laval).
- [14]: R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, chapter 4, 153, (1999)

- [15]: Messaouda, K. (2018). *Etude des solitons Bragg dans les systèmes de transmission optique* (Doctoral dissertation, Université de Batna).
- [16]: Gagné, M. (2015). Fabrication et applications des réseaux de Bragg ultra-long [Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
- [17]: Ferdinand, P. (1999). Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg. *Techniques de l'ingénieur*, 6735(Dec), 1-24.
- [18]: Gagné, M. (2009). Fabrication holographique de réseaux de Bragg par interféromètre à phase variable de type pousser/tirer [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
- [19]: Brosson, P.; Artigue, C.; Fernier, B.; Leclerc, D.; Jacquet, J.; Benoit, J.: "Simple determination of coupling coefficient in DFB waveguide structures", Volume: 24 Issue: 16, Electronics Letters, 4 Aug. 1988, Page(s): 990 –991
- [20]: Bergonzo, A. A. J. (2003). Étude des lasers accordables à réseaux de Bragg échantillonnés ou à pas variables (Doctoral dissertation, Lille 1).
- [21]: Pierre Vinchon, «Optimisation de Masques de Phase pour l'exposition de Réseaux de Bragg à périodes variables sur fibre optique», Université du Québec, 2015.
- [22]: Murekezi, N. U. (2021). *Détermination des paramètres physiques d'un réseau de Bragg par colonies de fourmis et l'application en multiplexage en longueur d'onde*. Université de Moncton (Canada).
- [23]: Gabrielle Gauthy Développement des réseaux à très haut débit pour le développement
- [24]: Mlle CHETTOUH Saida, «Etude des propriétés spectrales des réseaux de Bragg pour codeurs/décodeurs optiques», THESE Doctorat EN SCIENCE, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2018.
- [25]: Melle: GOURMALA Ouassila, «Etude et Réalisation des Réseaux de Bragg pour des Applications Photoniques», Thèse de Magister, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID–TLEMEN, 2006.

Chapitre III :
Simulation d'un capteur à réseau de
Bragg

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la simulation d'un capteur à réseau de Bragg à l'aide de MATLAB en utilisant la méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain). Les capteurs à réseau de Bragg (FBG) sont largement utilisés dans diverses applications pour mesurer des paramètres tels que la température, la contrainte, la pression, etc. Ils exploitent les propriétés de réflexion sélective des réseaux de Bragg pour détecter les changements dans leur environnement.

Nous explorerons les mécanismes physiques sous-jacents, les méthodes de simulation utilisées et les résultats obtenus en simulant différents types de FBG ainsi qu'un capteur de température. La méthode FDTD nous permettra de modéliser avec précision les interactions entre la lumière et les FBG, en prenant en compte les effets de dispersion, de réflexion et de transmission.

En utilisant MATLAB comme outil de simulation, nous pourrions étudier en détail le comportement des FBG et évaluer leur réponse dans différentes configurations. Nous pourrions simuler des variations de la période, de la longueur, de l'indice de modulation et de la température pour comprendre leur impact sur les caractéristiques des FBG et sur les performances du capteur à température.

Cette approche de simulation nous permettra d'optimiser la conception des FBG et du capteur, en ajustant les paramètres pour obtenir les performances souhaitées. Nous pourrions également étudier les limitations et les contraintes de ce type de capteur à travers les simulations réalisées. Cette analyse approfondie nous fournira des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des capteurs à réseau de Bragg dans des applications variées, notamment la mesure de température.

III.2 Objectif

L'objectif de ce chapitre est de simuler un capteur à réseau de Bragg à l'aide de MATLAB et d'analyser ses performances dans différents scénarios. Plus précisément, nous nous concentrerons sur les variations de la période, de la longueur, de l'indice de modulation et de la température du réseau de Bragg, et leur impact sur les mesures effectuées par le capteur.

Les objectifs spécifiques de ce chapitre sont les suivants :

Mettre en place un modèle de simulation du capteur à réseau de Bragg à l'aide de MATLAB, en utilisant des techniques de résolution numérique appropriées telles que la méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain).

En réalisant ces simulations dans les différents scénarios, l'objectif est d'obtenir une compréhension approfondie des performances du capteur à réseau de Bragg dans des conditions variées. Les résultats obtenus permettront d'analyser les limites et les avantages de ce type de capteur dans différentes applications de mesure.

III.3 Présentation de MATLAB

Dans cette section, nous explorerons l'utilisation de MATLAB pour la simulation d'un capteur à réseau de Bragg. MATLAB est un logiciel de calcul scientifique largement utilisé qui offre des fonctionnalités puissantes pour la modélisation, la simulation et l'analyse de systèmes complexes, y compris les systèmes optiques [1].

Les fonctionnalités de MATLAB qui en font un choix attrayant pour la simulation de capteurs à réseau de Bragg comprennent :

- ✓ Langage de programmation : MATLAB est doté d'un langage de programmation facile à utiliser et hautement flexible. Il permet de développer des algorithmes personnalisés pour la simulation du capteur et de contrôler tous les aspects du modèle.
- ✓ Outils de visualisation : MATLAB propose des outils de visualisation avancés qui permettent de représenter graphiquement les résultats de simulation. On peut ainsi obtenir des représentations visuelles claires et intuitives des caractéristiques de réflexion du réseau de Bragg et de l'évolution des mesures du capteur.
- ✓ Bibliothèques de fonctions : MATLAB dispose d'une vaste bibliothèque de fonctions et de boîtes à outils spécialisées pour les simulations optiques, telles que la boîte à outils Optics, la boîte à outils Signal Processing et la boîte à outils Communications. Ces bibliothèques fournissent des fonctions prédéfinies pour des opérations optiques courantes, ce qui facilite la mise en œuvre des modèles de capteur.
- ✓ Intégration avec d'autres outils : MATLAB peut être intégré à d'autres outils de conception et de simulation, tels que Simulink, qui permet de modéliser et de simuler des systèmes dynamiques. Cela offre des possibilités étendues pour la modélisation de capteurs complexes et pour l'étude de leurs performances dans des contextes plus larges[2].

En résumé, l'utilisation de MATLAB pour la simulation d'un capteur à réseau de Bragg offre une approche flexible et puissante pour étudier le comportement de ces capteurs dans différentes conditions. Les fonctionnalités de programmation, de visualisation et d'intégration de MATLAB en font un outil idéal pour modéliser, simuler et analyser les performances de ces capteurs optiques avancés.

MATLAB pour MatrixLaboratory, est une application qui a été conçue afin de fournir un environnement de calcul numérique matriciel simple, efficace, interactif et portable, permettant la mise en œuvre le développement des algorithmes.

III.4 La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)

III.4.1 Généralité et historique de la méthode

L'approche par les différences finies, autrefois évitée en raison de la quantité de données considérable qu'elle nécessite, a suscité un regain d'intérêt grâce à l'augmentation de la puissance des ordinateurs, qui permet désormais une capacité de stockage accrue sans compromettre les temps de calcul. Cette méthode présente l'avantage supplémentaire de permettre la modélisation des phénomènes transitoires en discrétisant la dimension temporelle de l'opérateur différentiel. Le passage à la solution fréquentielle s'effectue simplement par une transformée de Fourier discrète. Cependant, en raison de la définition de la transformée de Fourier sur l'ensemble des réels, tandis que la méthode des différences finies en temps (FDTD) utilise un nombre fini d'échantillons, la solution peut présenter des oscillations connues sous le nom de phénomène de Gibbs, une altération fréquente dans les calculs numériques.

Examinons à présent les avancées et les perspectives offertes par les techniques de résolution des équations aux dérivées partielles des équations de Maxwell, en prenant en compte les travaux publiés sur cette approche.

➤ Bref historique de l'évolution de la méthode FDTD :

En 1966, Yee [3] introduit pour la première fois une mise en œuvre de la méthode FDTD dans un système de coordonnées cartésiennes orthogonales pour les champs électriques et magnétiques. Le schéma aux différences finies utilisé est de second ordre.

En 1975, Taflove et Brodwin [4] ont établi le critère de stabilité numérique de l'algorithme de Yee et ont étudié l'interaction d'une onde électromagnétique en 2D ainsi que l'absorption d'une onde électromagnétique par un tissu biologique complexe et inhomogène en 3D.

En 1977, Holland, Kunz et Lee [5] ont utilisé l'algorithme de Yee pour étudier le phénomène d'impulsion électromagnétique.

En 1980, Taflove [6] a publié les premiers modèles FDTD concernant la pénétration d'une onde électromagnétique sinusoïdale en 3D dans une cavité métallique.

En 1981, Mur [6] implémente pour la première fois des conditions aux limites absorbantes du second ordre dans l'algorithme de Yee.

En 1982/1983, Taflove et Umashankar [7] ont été les premiers à publier des modèles FDTD pour le rayonnement d'ondes électromagnétiques, permettant de définir le champ proche, le champ lointain et la surface équivalente radar pour des structures en 2D et 3D.

En 1986, Choi et Hofer [8] ont publié la première simulation FDTD de structures de type guide d'onde/cavité.

En 1987/1988, Umashankar et ses collègues ont développé des techniques de sous-maillage, permettant la modélisation FDTD de fils fins. Taflove et son équipe les ont utilisées pour modéliser la pénétration à travers une ouverture dans un écran conducteur, tandis que Jurgens et ses collègues les ont employées pour modéliser des surfaces courbes [7].

En 1988, Sullivan et ses collaborateurs ont réalisé pour la première fois la modélisation, en utilisant la méthode FDTD en 3D, de l'absorption d'une onde électromagnétique par un corps humain [9].

Également en 1988, Zhang et ses collègues ont effectué la modélisation FDTD d'une ligne micro-ruban [10].

En 1990/1991, Kashiwa et Fukai, Luebbers et leurs collègues, ainsi que Joseph et ses collaborateurs, ont réalisé la modélisation FDTD d'un diélectrique dont la permittivité dépend de la fréquence [11].

Au cours de la même période (1990/1991), Malomey et son équipe, ainsi que Tirkas et Balanis, ont réalisé la modélisation FDTD d'une antenne [12].

En 1990, Sano et Shibata, ainsi qu'El Ghazaly et ses collègues, ont réalisé la modélisation FDTD d'interrupteurs optoélectroniques [13].

En 1992, Sui et ses collaborateurs ont réalisé la modélisation FDTD d'éléments de circuits électroniques localisés en 2D [14].

En 1993, Toland et son équipe ont publié pour la première fois des modèles FDTD de composants actifs tels que les diodes Tunnel et les diodes Gunn, intégrés dans des structures de type cavités et antennes [15].

Entre 1994-2000, Bérenger a développé et implémenté des couches parfaitement absorbantes (PML) dans le cas 2D. Cette approche a ensuite été étendue au cas 3D par Katz et ses collègues, ainsi que dans le cas d'un guide d'onde dispersif par Reuter et son équipe [16].

Il est important de noter que l'utilisation de la méthode FDTD pour résoudre les équations aux dérivées partielles de Maxwell connaît une expansion significative ces dernières années. Un exemple de cette évolution est le développement de techniques basées sur le maillage variable. Cette approche permet de discrétiser de manière fine les structures rayonnantes de

petite taille, tandis que les autres éléments du problème électromagnétique peuvent être discrétisés de manière plus grossière.

III.4.2 principe de la méthode

La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) ou méthode des différences finies dans le domaine temporel est une approche numérique pour résoudre les équations différentielles dans le domaine temporel. Son objectif principal est d'analyser la propagation des ondes hyperfréquences dans des lignes planaires. Nous avons choisi cette méthode car elle permet une caractérisation en large bande d'une structure en effectuant une seule simulation dans le domaine temporel. En utilisant la transformation de Fourier sur les signaux temporels obtenus, nous pouvons déterminer les caractéristiques du guide, telles que les paramètres de propagation et l'impédance caractéristique en fonction de la fréquence.

La méthode approxime les dérivées spatiales et temporelles présentes dans les équations de Maxwell en utilisant des différences finies centrées. Le schéma proposé par Yee surmonte la difficulté de la dépendance simultanée entre les champs électriques et magnétiques (E et H). Il permet un calcul explicite du champ électromagnétique dans tout le volume d'étude en fonction du temps. Les composantes du champ électrique et magnétique sont calculées de manière alternative et itérative, décalées d'un demi-pas spatial et calculées respectivement à des multiples pairs et impairs du demi-pas temporel.

En utilisant une excitation large bande et en appliquant une transformation de Fourier, la méthode permet d'obtenir la caractérisation en large bande de la structure avec une seule simulation. Plus tard, en 1975, le schéma de Yee a été généralisé par Taflove et al [4]. En introduisant des termes de conductivité électrique et magnétique pour prendre en compte les pertes.

La résolution des problèmes électromagnétiques, formulés sous forme d'équations de Maxwell, consiste à résoudre six équations différentielles aux dérivées partielles du premier ordre (PDE) couplées pour les composantes du champ électrique et magnétique. Ces équations, initialement présentées par Maxwell, décrivent la variation spatio-temporelle du champ électromagnétique. Une méthode courante pour résoudre ces équations consiste à séparer les champs électrique et magnétique en deux équations de Helmholtz ou d'onde de second ordre. Ces équations peuvent être résolues directement dans le domaine temporel pour une variation arbitraire du temps ou pour une variation sinusoïdale à une fréquence donnée.

Le choix de la meilleure méthode de résolution dépend du type de structure ou du domaine de la solution, du type d'équation électromagnétique, ainsi que des conditions initiales (pour la variable temporelle) et/ou des conditions aux limites (pour les variables spatiales) associées.

La solution est définie en termes des propriétés des constituants de la structure étudiée (conductivité, permittivité et perméabilité) et de ses frontières. La structure peut être linéaire si les propriétés de ses constituants sont indépendantes du champ appliqué, ou non linéaire dans le cas contraire. Elle peut être homogène si ces propriétés sont identiques dans toute la région, ou non homogène dans le cas contraire. De plus, la structure peut être isotrope si ses propriétés sont indépendantes de la direction du champ, ou anisotrope dans le cas contraire. La plupart des problèmes rencontrés sont linéaires, isotropes et entièrement ou partiellement homogènes. Le volume de calcul peut être fermé ou ouvert, ce qui signifie que la propagation d'une onde dans une cavité est un problème fermé, tandis que le rayonnement d'une antenne dans l'espace libre est un problème ouvert.

La formulation FDTD des problèmes du champ électromagnétique est considérée comme la plus générale et la plus facile pour résoudre les problèmes de dispersion et de rayonnement dans les structures électromagnétiques. L'algorithme de Yee utilise une discrétisation cartésienne de la structure, où l'élément de base est une maille cubique ou parallélépipédique. La méthode de Yee présente plusieurs avantages : elle est robuste, rapide et simple à implémenter. De plus, l'utilisation d'une excitation impulsionnelle permet d'obtenir la réponse dans une bande de fréquence choisie avec une seule simulation.

III.4.3 Point de départ : les équations de Maxwell

Le point de départ de la méthode des différences finies est la forme différentielle des équations de Maxwell (Eq III.1) et (Eq III.2). Lorsque l'on considère un milieu linéaire, homogène, isotrope et sans perte, ces équations ont la forme suivante :

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla * \vec{E} \quad (\text{Eq III.1})$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \nabla * \vec{E} \quad (\text{Eq III.2})$$

Lorsque ces équations sont projetées suivant les directions x, y et z, on obtient les équations suivantes :

$$\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} \right] \quad (\text{Eq III.3})$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial z} \right] \quad (\text{Eq III.4})$$

$$\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} \right] \quad (\text{Eq III.5})$$

$$\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial x} \right] \quad (\text{Eq III.6})$$

$$\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} \right] \quad (\text{Eq III.7})$$

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{H}_x}{\partial y} \right] \quad (\text{Eq III.8})$$

III.5 Partie simulation

Dans cette simulation nous utiliserons certains paramètres comme :

- ✓ Indice de modulation : L'indice de modulation fait référence à la variation de l'indice de réfraction périodique à l'intérieur du réseau de Bragg. Il est généralement représenté par la lettre " Δn " et mesure la différence d'indice de réfraction entre les régions de haute et de basse réflexion du réseau. L'indice de modulation joue un rôle essentiel dans la détermination des propriétés de réflexion du réseau de Bragg et peut être influencé par des paramètres tels que la température.
- ✓ Longueur : La longueur fait référence à la distance physique sur laquelle est réparti le réseau de Bragg. Elle peut être mesurée en mètres (m). La longueur du réseau de Bragg est une caractéristique essentielle pour déterminer la sensibilité et la plage de mesure du capteur.
- ✓ Période : La période d'un réseau de Bragg désigne la distance entre deux pics de réflexion successifs dans la structure. Elle est généralement exprimée en micromètres (μm). La période est une propriété fondamentale du réseau de Bragg et influe sur les longueurs d'onde de réflexion qui peuvent être observées. La variation de la période peut permettre de moduler les caractéristiques de transmission et de réflexion du réseau, en faisant ainsi un paramètre clé dans la conception et l'optimisation du capteur.

Cas 01 :

Pour la simulation de capteur à réseaux de Bragg à long pas, on change la période et on garde les paramètres suivants fixes :

La longueur : 40 mm

L'indice de modulation : $2 \cdot 10^{-4}$

Nombre de réseaux : 1

- On obtient :

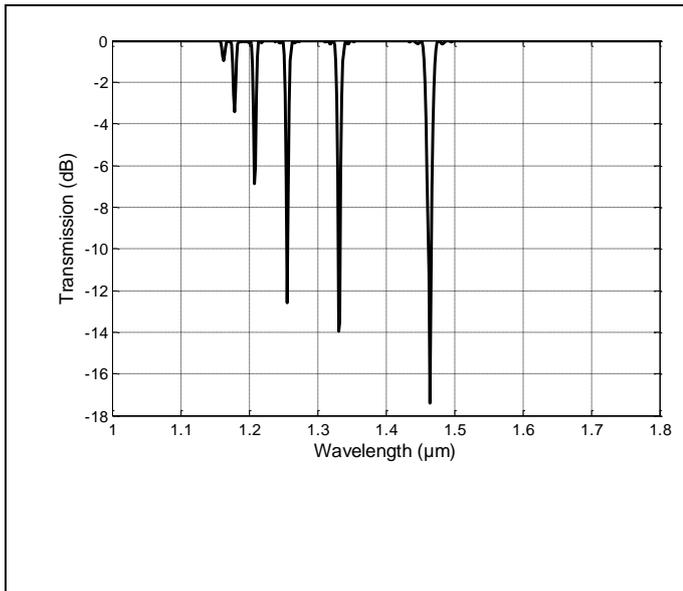


Figure III.1 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour une Période de 320 μm .

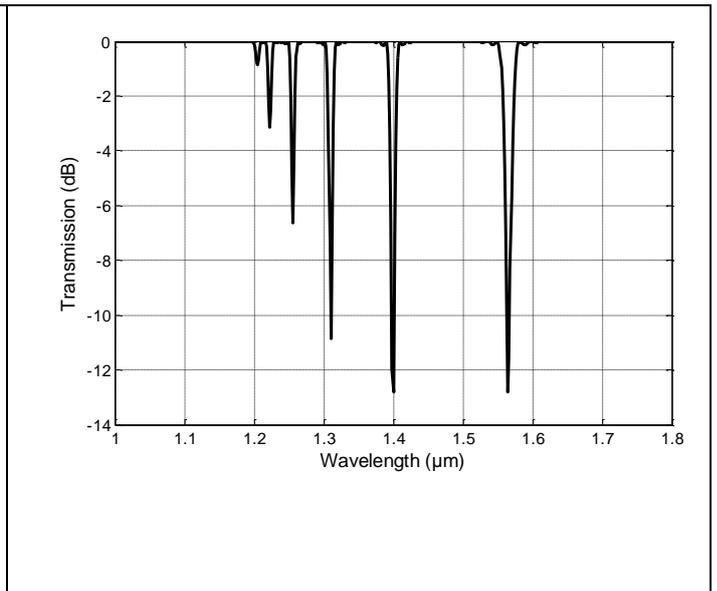


Figure III.2 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour une Période de 340 μm .

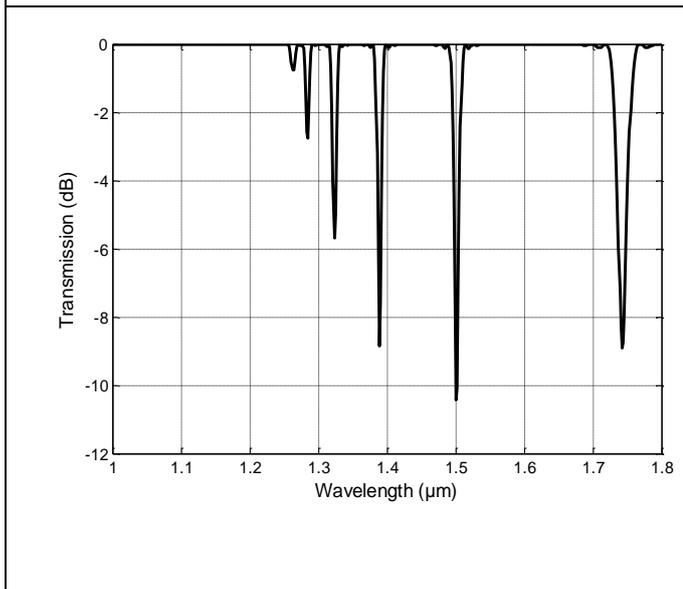


Figure III.3 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour une Période de 370 μm .

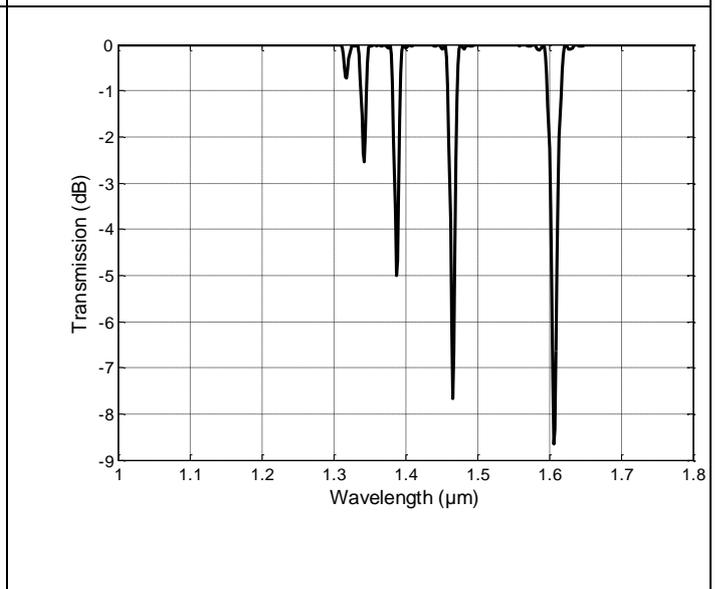


Figure III.4 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour une Période de 400 μm .

Les figures III.1, 2, 3, 4 représentent un spectre de transmission (en dB) en fonction de la longueur d'onde (en μm) lors de la variation de la période d'un capteur simulé. Nous observons l'effet de cette variation.

Lorsque la période est de 320 μm , nous remarquons que la valeur de la longueur d'onde est de 1,46 μm , et la valeur de la transmission atteint un pic de -17 dB.

En augmentant la période, nous constatons une diminution de la transmission et une augmentation de la longueur d'onde jusqu'à atteindre $1,75 \mu\text{m}$.

Ces observations suggèrent que la variation de la période du capteur a un impact significatif sur les propriétés de transmission et la longueur d'onde associée.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'importance de choisir judicieusement la période du capteur pour optimiser ses performances. Des variations de la période peuvent entraîner des changements significatifs dans la réponse du capteur en termes de transmission et de plage de longueurs d'onde couvertes.

Il convient donc de prendre en compte cette relation entre la période et les caractéristiques du capteur lors de la conception et de l'optimisation des dispositifs basés sur ces variations.

On fait varier la période du capteur de $320 \mu\text{m}$ jusqu'à $400 \mu\text{m}$ (Figure III.6)

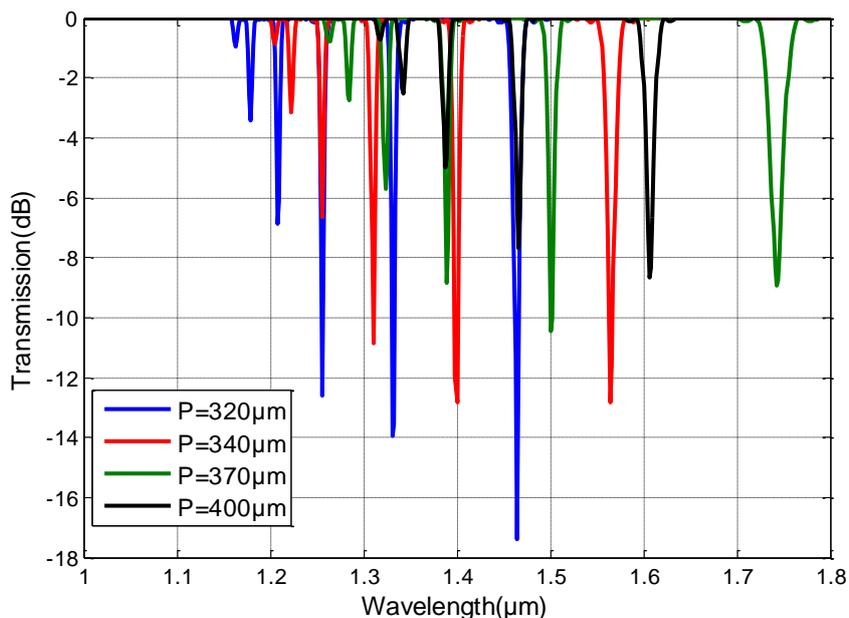


Figure III.5 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde en variant la période.

Remarque :

Nous observons que plus nous augmentons la période dans un capteur de température à réseau de Bragg, la longueur d'onde augmente et la transmission diminue, sauf dans le cas où la période est de 400, où elle chute à 1,6.

Dans un capteur de température à réseau de Bragg, la période du réseau (l'intervalle de distance entre les réflexions périodiques) joue un rôle crucial dans la modification de la longueur d'onde de la lumière réfléchie. Lorsque la période du réseau est augmentée, la longueur d'onde de la lumière réfléchie est également augmentée.

La relation entre la période et la longueur d'onde dans un capteur de température à réseau de Bragg est régie par le phénomène de diffraction. Une augmentation de la période entraîne une plus grande différence de phase entre les rayons lumineux réfléchis, ce qui se traduit par un décalage de la longueur d'onde.

Cas 02 :

Pour la simulation de capteur à réseaux de Bragg à long pas, on change la longueur et on garde les paramètres suivants fixes :

La période : $320\mu\text{m}$

L'indice de modulation : $2 * 10^{-4}$

Nombre de réseaux : 1

- On obtient :

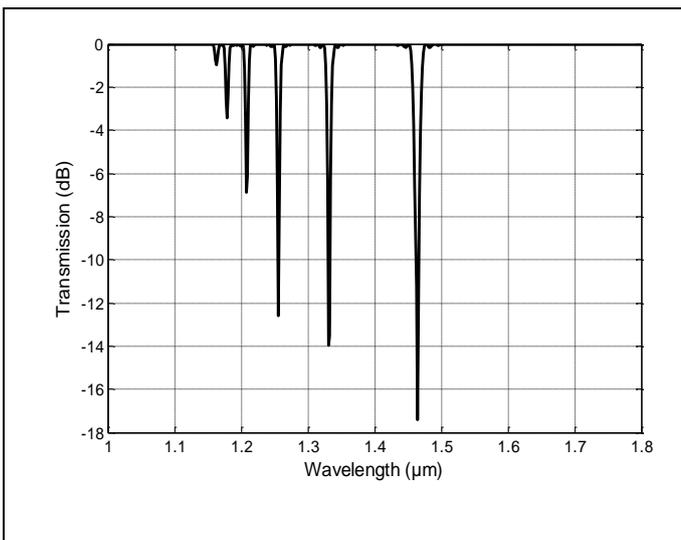


Figure III.6 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour longueur = 40 mm.

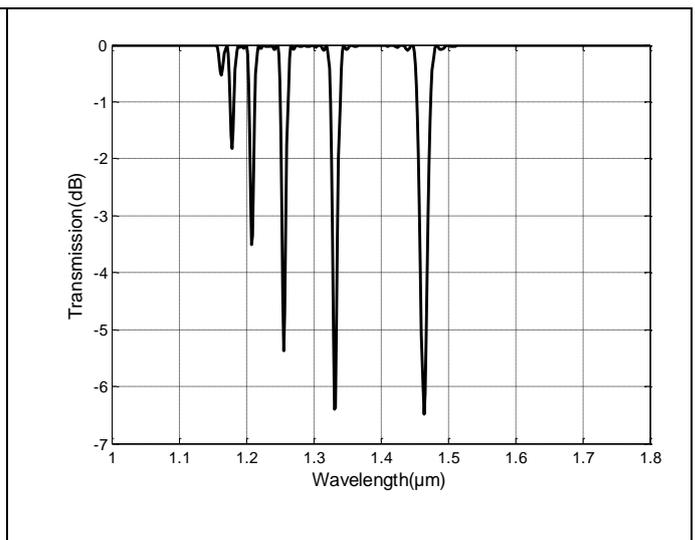


Figure III.7 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour longueur = 30 mm.

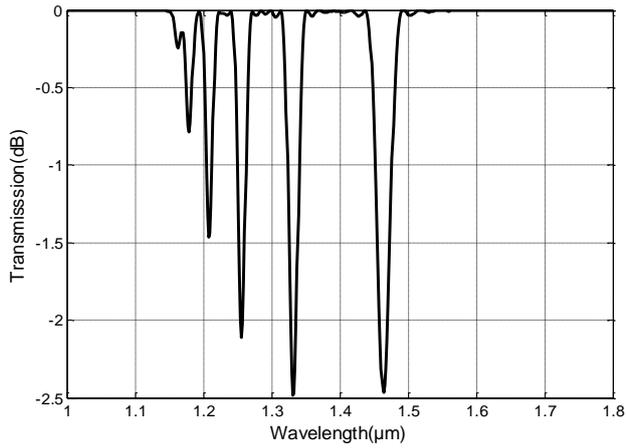


Figure III.8 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour longueur = 20 mm.

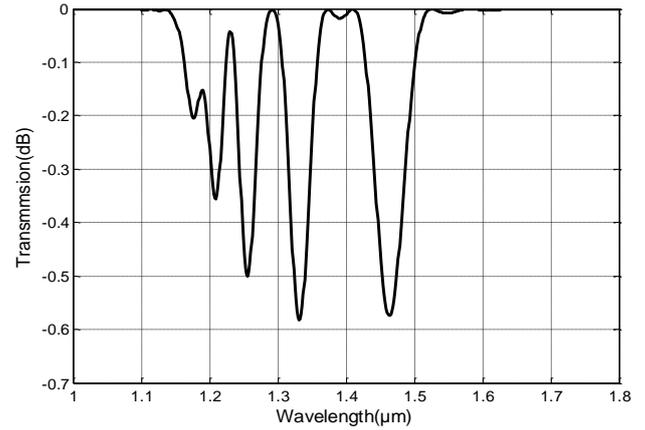


Figure III.9 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour longueur = 10 mm.

Il s'agit d'un spectre de transmission en fonction de la longueur d'onde. Nous faisons varier la valeur de la longueur d'onde de 40 mm à 10 mm, ce qui entraîne une diminution de la transmission. La longueur d'onde reste constante à chaque fois. Nous observons une diminution nette de la transmission jusqu'à -17 dB à la fin du pic.

Lorsque la longueur d'onde diminue, la transmission diminue également, ce qui peut être dû à des effets de dispersion ou d'absorption dans le milieu traversé par le signal. Le pic observé à la fin du spectre correspond à une valeur particulière de la longueur d'onde où la transmission est fortement atténuée.

On fait varier la période du capteur de 40mm jusqu'à 10 mm (Figure III.10)

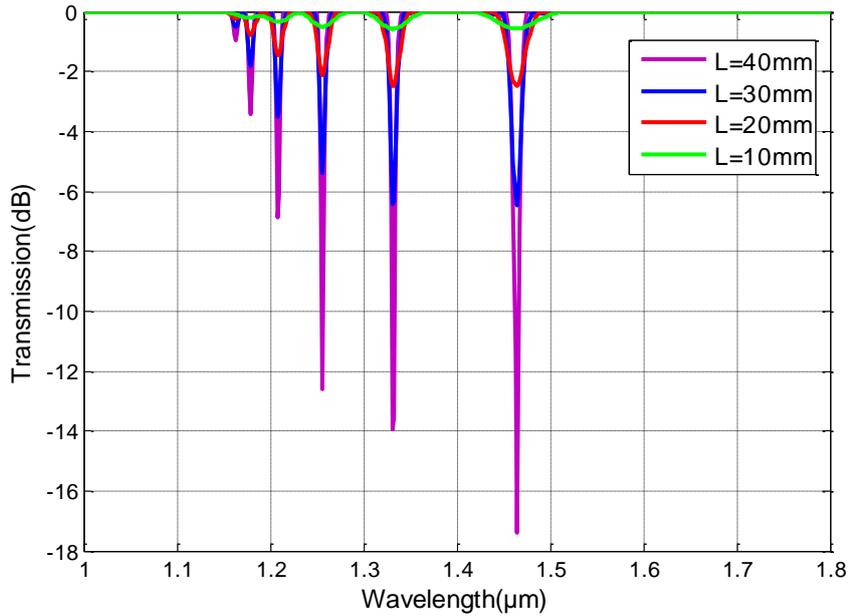


Figure III.10 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde en variant la longueur.

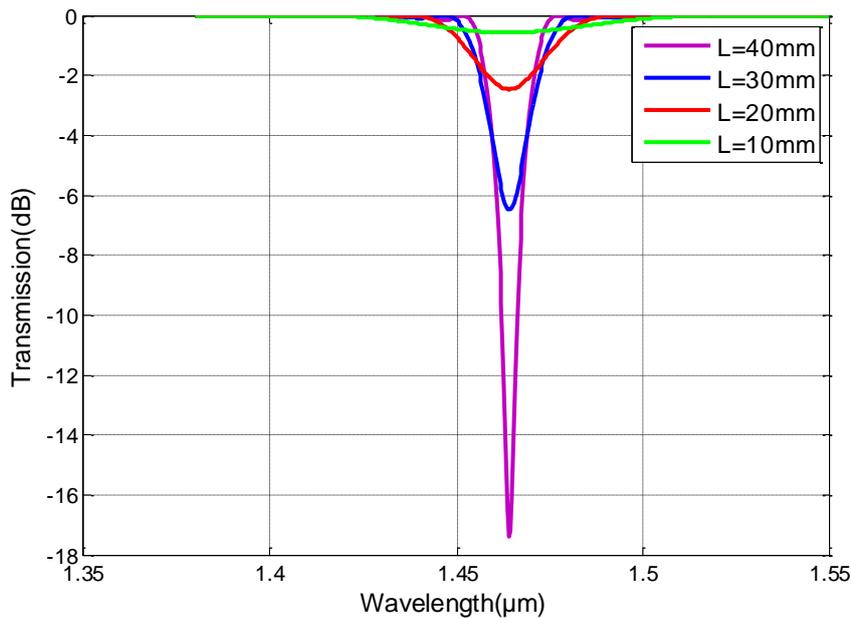


Figure III.11 : La dernière onde dans la figure III.10.

Remarque :

Nous observons que lorsque la longueur (L) augmente, la transmission diminue jusqu'à -17dB, comme le montre la Figure III.10. De plus, nous remarquons que la longueur d'onde reste constante à 1,46 μm (Figure III.11).

Malgré le fait que l'indice de modulation soit fixé à $2 \cdot 10^{-4}$ et la période à $320 \mu\text{m}$, les variations de la longueur (L) du réseau de Bragg peuvent avoir un impact sur la transmission de la lumière et la longueur d'onde. Cela est dû aux interactions complexes entre la lumière incidente et le réseau de Bragg, qui peuvent être sensibles aux changements de longueur.

Cas 03 :

Pour la simulation de capteur à réseaux de Bragg à long pas, on change l'indice de modulation et on garde les paramètres suivants fixes :

La période : $320 \mu\text{m}$

Longueur : 40 mm

Nombre de réseaux : 1

- On obtient :

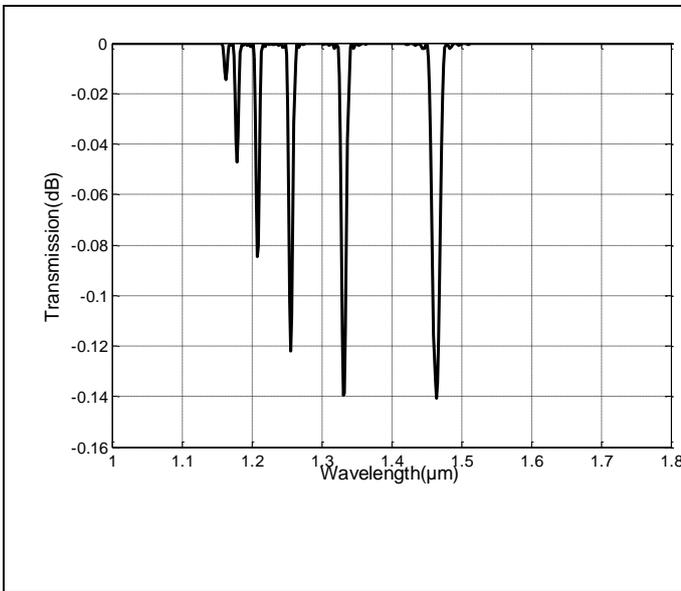


Figure III.12 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour $Ind_mod = 0,25 \cdot 10^{-4}$.

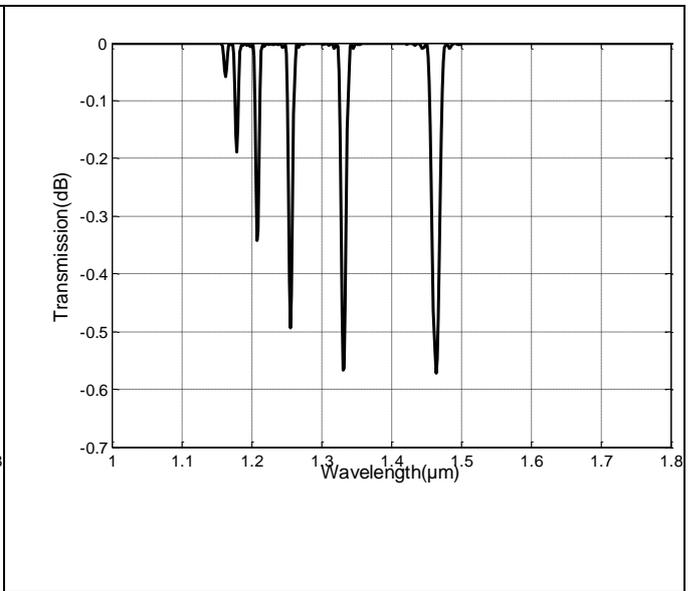
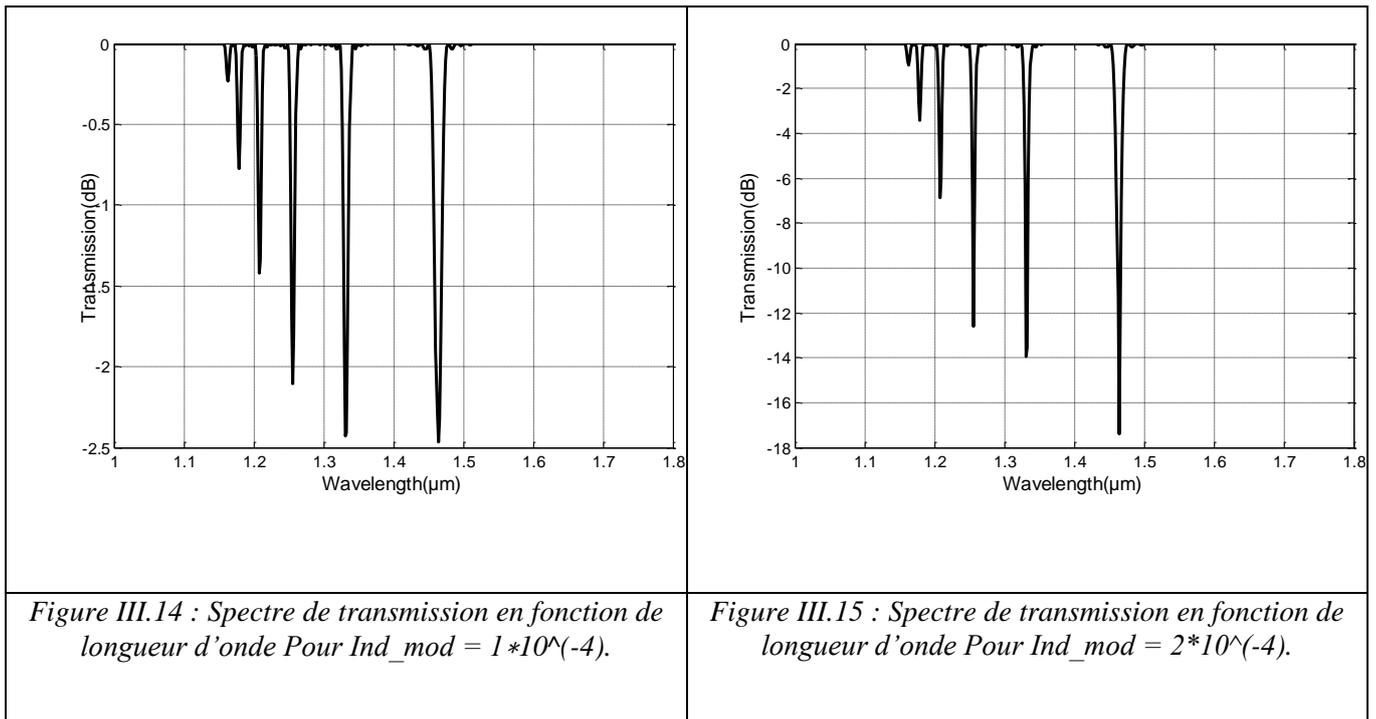


Figure III.13 : Spectre de transmission en fonction de longueur d'onde Pour $Ind_mod = 0,5 \cdot 10^{-4}$.



Remarque :

Dans cette simulation d'un capteur de température à réseau de Bragg, il a été observé que l'indice de modulation joue un rôle important dans les variations de transmission à travers la fibre optique.

L'indice de modulation fait référence à l'amplitude de variation de l'indice de réfraction dans le réseau de Bragg. Lorsque l'indice de modulation augmente, cela signifie que les variations d'indice de réfraction sont plus prononcées. Dans ce contexte, il a été constaté que plus l'indice de modulation augmente, plus la transmission à travers la fibre optique diminue.

Le terme "transmission" fait référence à la quantité de lumière qui passe à travers la fibre optique sans être réfléchi ou absorbé. Dans ce cas, la diminution de la transmission signifie qu'une partie de la lumière est réfléchi ou absorbé par le réseau de Bragg en raison de l'augmentation de l'indice de modulation.

Il est important de noter que la longueur d'onde reste fixe quelle que soit la valeur de l'indice de modulation dans cette simulation. Cela signifie que la longueur d'onde de la lumière transmise à travers la fibre optique ne subit pas de décalage ou de variation malgré les variations de l'indice de modulation.

III.5.1 Etude d'un capteur de température

Un capteur de température à réseau de Bragg est un type de capteur optique utilisé pour mesurer les variations de température. Il repose sur le principe de la réflexion de la lumière par un réseau de Bragg, qui est une structure périodique dans un matériau optique.

Lorsque la température change, les propriétés optiques du matériau du réseau de Bragg se modifient. Cela entraîne un décalage de la longueur d'onde de réflexion du réseau de Bragg. Ce décalage est directement proportionnel à la variation de température, ce qui permet de mesurer avec précision les changements de température.

Les capteurs de température à réseau de Bragg présentent plusieurs avantages. Ils sont intrinsèquement insensibles aux interférences électromagnétiques et peuvent être utilisés dans des environnements hostiles. De plus, ils offrent une grande précision et une résolution élevée dans la mesure des variations de température.

Les réseaux de Bragg sont aussi sensibles aux variations de la température. En effet, la dilation thermique entraîne un déplacement de la longueur d'onde de Bragg. La relation de la longueur d'onde avec la température est exprimée par :

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T \quad \text{(Eq III.9)}$$

Où

$$\alpha = \left(\frac{1}{\Lambda}\right) \left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right) \quad \text{(Eq III.10)}$$

$\Delta\lambda_B$: Est la variation de la longueur d'onde de Bragg

ΔT : Exprime une variation de la température

Λ : Est la période du réseau

α : Est le coefficient d'expansion thermique pour la fibre

ζ : Représente le coefficient thermo-optique (environ égal à (8.6×10^6) pour la fibre de silicedopée au germanium)

n : Est l'indice effectif

Pour la simulation de capteur à réseaux de Bragg à long pas, On introduit les paramètres de la fibre suivant :

Diamètre du cœur : 4,15 μm .

Diamètre de la gaine : 58,35 μm .

L'indice de réfraction du cœur : 1.44921.

L'indice de réfraction de la gaine : 1.4403.

On change la température et on garde les paramètres suivants fixes :

La période : 450µm

Longueur : 50 mm

Nombre de réseaux : 1

- On obtient :

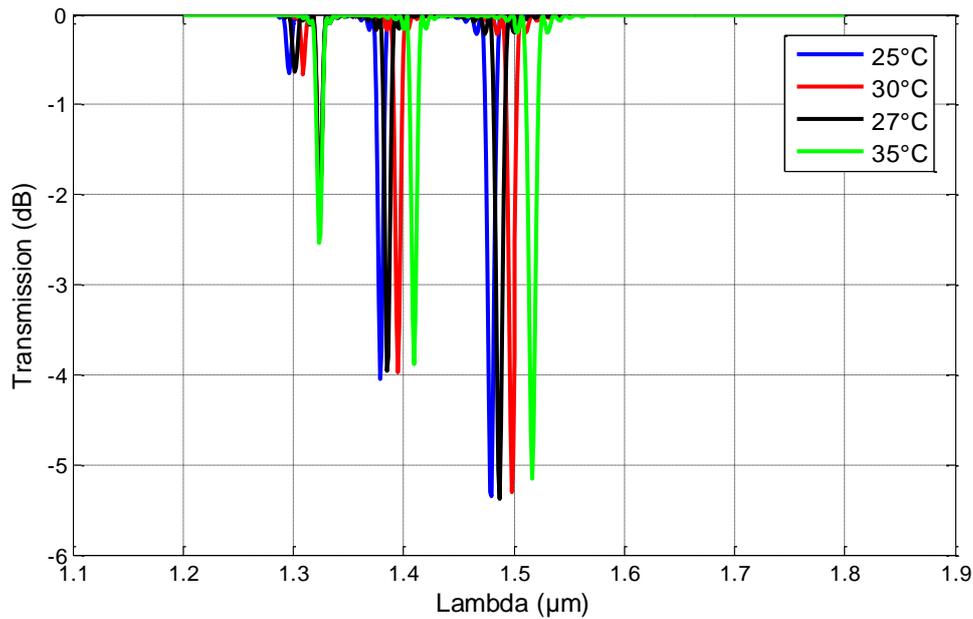


Figure III.16 : Le déplacement de la longueur d'onde de Bragg en variant la température.

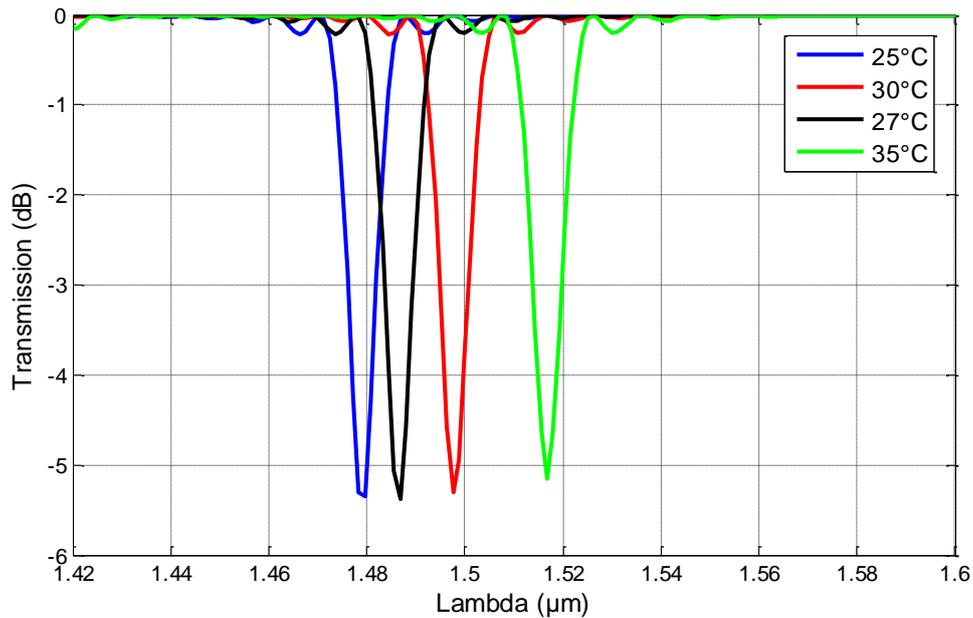


Figure III.17 : La dernière onde dans la figure III.16.

On récapitule les résultats obtenus dans le tableau suivant :

Température (°C)	$\lambda(\mu\text{m})$
25	1,48
27	1,49
30	1,499
35	1,519

Tableau III. 1 : Variation de λ en fonction de la Température.

Remarque :

- ✓ La longueur d'onde de Bragg varie linéairement avec température.
- ✓ Les résultats de la simulation du capteur à réseaux de Bragg à long pas montrent que la longueur d'onde de Bragg varie linéairement avec la température. Lorsque la température augmente, la longueur d'onde de Bragg augmente également jusqu'à $1,519\mu\text{m}$, comme le montre le tableau III.1.
- ✓ Notre capteur peut faire ces calculs à l'aide du signal réfléchi, signal transmis ou bien les deux.

En conclusion, les résultats obtenus dans cette simulation montrent que la longueur d'onde de Bragg dans un capteur à réseaux de Bragg à long pas varie linéairement avec la température. Cela ouvre des perspectives intéressantes pour l'utilisation de ce type de capteur dans des applications de détection de température précise et fiable.

III.6 Conclusion

Les simulations nous ont permis d'analyser en détail les variations de la période, de la longueur, de l'indice de modulation et de la température sur les performances du capteur. Nous avons pu observer comment ces variations affectent la réponse du capteur et déterminer les configurations optimales pour obtenir des mesures précises et fiables de la température.

Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour guider la conception et l'optimisation de capteurs de température à réseau de Bragg dans une variété d'applications industrielles et scientifiques. Ils permettent de mieux comprendre les limites et les performances de ces capteurs, et offrent des pistes pour améliorer leur sensibilité, leur résolution et leur précision.

En utilisant les simulations réalisées avec MATLAB, les ingénieurs et les chercheurs pourront optimiser la conception des capteurs de température à réseau de Bragg, en ajustant les paramètres clés pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application. Cela permettra de développer des capteurs plus performants, plus fiables et plus précis, contribuant ainsi aux avancées technologiques dans le domaine de la mesure de température.

En résumé, les simulations réalisées dans ce chapitre ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation des réseaux de Bragg dans les capteurs de température. Elles offrent des outils précieux pour l'optimisation des performances des capteurs et pour répondre aux besoins spécifiques des applications industrielles et scientifiques. Les résultats obtenus constituent une base solide pour des études plus approfondies et pour le développement de capteurs de température innovants.

Bibliographies

- [1]: Scilab Enterprises, "Scilab - Open source software for numerical computation", [Online]. Available: [Accessed: 22-May-2023].
- [2]: MATLAB Documentation, "MATLAB: Programming and Algorithms", [Online]. Available: [Accessed: 22-May-2023].
- [3]: D. H. Choi, and W. J. Hofer, " The finite-difference time-domain method and its application to eigenvalue problems", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 34, pp. 1464-1470.
- [4]: A. Taflove, et M. E. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 23, pp. 623-630, 1975.
- [5]: J.R. James, P.S. Hall, and C. Wood; "Microstrip Antenna Theory and Design", Peter Pergrinus Ltd .1981.
- [6]: G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 23, pp. 377-382, 1981.
- [7]: T. G. Jurgens, A. Taflove, K. R. Umashankar, and T. G. Moore, "Finite difference time domain modeling of curved surfaces", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 36, pp. 357-366, 1992. [8]:
- [8]: D. H. Choi, and W. J. Hofer, " The finite-difference time-domain method and its application to eigenvalue problems", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 34, pp. 1464-1470, 1986.
- [9]: Dennis M. Sullivan "Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method", Electrical Engineering Departement, University of Idaho, 2000
- [10]: Zhang, X., Fang, J., Mei, K.K., Liu, Y. "Calculations of the dispersive characteristics of microstrips by the time-domain finite difference method", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-36 No.2, pp.263-7. (1988).
- [11]: R. M. Joseph, S. C. Hagness, and A. Taflove, "Direct time integration of Maxwell's equations in linear dispersive media with absorption for scattering and propagation of femtosecond electromagnetic pulses", Optics Letters, vol. 16, pp. 1412-1414, 1991.
- [12]: P. A. Tirkas, and C. A. Balanis, "Finite-difference time-domain technique for radiation by horn antennas", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest, vol. 3, pp. 1750-1753, 1991.

[13]: S. M. El-Ghazaly, R. P. Joshi, and R. O. Grondin, "Electromagnetic and transport considerations in subpicosecond photoconductive switch modeling", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, pp. 629-637, 1990.

[14]: W. Sui, D. A. Christensen, et and C. H. Dumey, "Extending the two-dimensional FDTD method to hybrid electromagnetic systems with active and passive lumped elements", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, pp. 724-730, 1992.

[15]: Thomas, V.A.; Kuok-Mee Ling; Jones, M.E.; Toland, B.; Jenshan Lin; Itoh, T. "FDTD analysis of an active antenna" *Microwave and Guided Wave Letters*, IEEE Volume 4, Issue 9, Sep 1994 Page(s):296 – 298.

[16]: D. S. Katz, E. T. Thiele, et Taflove, "Validation and extension to three dimensions of the Berenger PML absorbing boundary condition for FD-TD meshes," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 4, pp. 268-270, 1994.

Conclusion générale

Conclusion générale

Grâce à ce travail, nous avons pu acquérir et approfondir nos connaissances dans le domaine des réseaux de Bragg fibrés (FBG) et de leur utilisation dans la conception de capteurs de température. Nous avons exploré les fondements des fibres optiques et leur rôle essentiel dans les communications modernes, ainsi que les défis auxquels elles sont confrontées, tels que la dispersion. Nous avons également étudié en détail les réseaux de Bragg fibrés, leur fonctionnement, leurs techniques de fabrication et leurs applications dans les télécommunications et les capteurs.

Dans le cadre de ce travail, nous avons particulièrement mis l'accent sur la simulation d'un capteur à réseau de Bragg à l'aide de MATLAB. Nous avons utilisé la méthode FDTD pour modéliser avec précision les interactions entre la lumière et les FBG, en prenant en compte les variations de période, de longueur, d'indice de modulation et de température. Les simulations nous ont permis d'analyser les performances du capteur dans différents scénarios et de mieux comprendre les facteurs qui influencent sa réponse.

Les résultats de nos simulations fournissent des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des capteurs à réseau de Bragg, en permettant de déterminer les paramètres optimaux pour des mesures précises et fiables de la température. Ces connaissances sont essentielles pour développer des capteurs de température performants dans diverses applications industrielles et scientifiques.

En conclusion, ce travail nous a permis d'approfondir notre compréhension des FBG et de leur utilisation dans les capteurs de température. Les simulations réalisées avec MATLAB ont été un outil précieux pour étudier les performances des FBG et pour guider la conception des capteurs. Nous espérons que ce travail contribuera à l'avancement de la recherche dans le domaine des réseaux de Bragg et à l'amélioration des technologies de capteurs à base de fibres optiques.

Résumé

Ce mémoire de master se concentre sur la simulation des réseaux de Bragg en tant que capteurs de température. L'objectif principal de l'étude était d'évaluer la réponse d'un réseau de Bragg aux variations de température. À l'aide de techniques de modélisation numérique, des réseaux de Bragg ont été simulés et leurs réflectivités spectrales ont été analysées. Les résultats obtenus ont démontré une sensibilité significative du réseau de Bragg aux changements de température, avec des décalages caractéristiques observés dans la réflectivité spectrale. Ces observations renforcent la perspective des réseaux de Bragg en tant que capteurs de température précis et fiables. Les applications potentielles de ces capteurs incluent l'industrie, la surveillance environnementale et les dispositifs médicaux. Les résultats de cette étude fournissent des bases solides pour de futures recherches et développements dans le domaine des réseaux de Bragg en tant que capteurs de température avancés.

Mots clés : fibre optique, réseaux de Bragg, filtre optique, capteur de température.

Abstract

This master's thesis focuses on the simulation of Bragg gratings as temperature sensors. The main objective of the study was to evaluate the response of a Bragg grating to temperature variations. Using numerical modeling techniques, Bragg gratings were simulated and their spectral reflectivities were analyzed. The results obtained demonstrated a significant sensitivity of the Bragg grating to temperature changes, with characteristic shifts observed in the spectral reflectivity. These observations strengthen the prospect of Bragg gratings as accurate and reliable temperature sensors. Potential applications for these sensors include industry, environmental monitoring, and medical devices. The results of this study provide a solid foundation for future research and development in the field of Bragg gratings as advanced temperature sensors.

Keywords: optical fiber, Bragg gratings, optical filter, temperature sensor.

ملخص

تركز أطروحة الماستر هذه على محاكاة شبكات براغ كأجهزة استشعار لدرجة الحرارة. كان الهدف الرئيسي من الدراسة هو تقييم استجابة مقضب براغ للتغيرات في درجات الحرارة. باستخدام تقنيات النمذجة العددية، تمت محاكاة شبكات براغ وتم تحليل انعكاساتها الطيفية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها حساسية كبيرة لشبكة براغ للتغيرات في درجات الحرارة، مع التحولات المميزة التي لوحظت في الانعكاسية الطيفية. تعزز هذه الملاحظات احتمالية وجود حواجز شبكية براغ كأجهزة استشعار دقيقة وموثوقة لدرجة الحرارة. تشمل التطبيقات المحتملة لهذه المستشعرات الصناعة والمراقبة البيئية والأجهزة الطبية. توفر نتائج هذه الدراسة أساساً متيناً للبحث والتطوير المستقبلي في مجال حواجز شبكية براغ كأجهزة استشعار متطورة لدرجة الحرارة.

المفتاحية الكلمات: الألياف الضوئية، حواجز شبكية براغ، مرشح بصري، مستشعر درجة الحرارة