

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER



Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A.



Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A.

Filière: Electronique

Spécialité : Micro électronique

Par

LAISSAOUI FATIMA

BENDJEDDOU ZOHRA

Thème

**L'influence des paramètres
optogéométriques d'une FBG chirpée sur la
réponse spectrale de réflectivité destinée pour la
compensation de la dispersion chromatique**

Devant le jury :

Dr. F. KHALED Président

Dr N.BAOUD Examineur

Dr .F.FARES Encadreur

Année Universitaire 2018/2019



Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, Mon Dieu qui nous a donné la force de rédiger ce modeste travail

Et nous remercions les membres du jury,

Dr F.KHALED et Dr N. BAOUID qui ont accepté d'évaluer mon travail de mémoire

Et nous remercions Dr F. FARES l'encadreur de mon mémoire, pour sa disponibilité et ses conseils judicieux tout au long de ce travail

Et nous remercions tous les professeurs du département de l'électronique, sans oublier aussi mes collègues et amies,

ainsi tous ceux qui ont participé de loin ou de près à l'élaboration de ce mémoire.



Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,
A ma sœur pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mon frère pour leur appui et leur encouragement,
A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A tout mes amis.

Merci d'être toujours là pour moi.

Fatima



Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mes frères pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A tout mes amis.

Merci d'être toujours là pour moi.

Zohra

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I Généralités sur les fibres optiques

I.1 Introduction.....2

I.2 La lumière.....2

I.3 La composition de la lumière et les couleurs3

I.4 Notion du spectre électromagnétique.....3

I.4.1 Propriétés d'une onde électromagnétique3

a) La fréquence.....3

b) La vitesse de propagation dans le vide ou l'air.....3

c) La longueur d'onde.....3

d) La Polarisation.....3

I.4.2 Spectre du visible4

I.4.3 Spectre du laser5

I.5 La dualité onde corpusculaire5

I.5.1 La théorie corpusculaire.....5

I.5.2 La théorie ondulatoire6

I.6 Fibre optique.....6

I.6.1 Le cœur.....7

I.6.2 La gaine optique.....7

I.6.3 Le revêtement de protection.....8

I.7 Différents type de fibre optique8

I.7.1 Fibre optique monomode8

I.7.2 Fibre optique multimode9

I.8 Les principaux types de la fibre optique.....9

I.8.1 Les fibres optiques à saut d'indice monomode9

I.8.2 La fibre optique à gradient d'indice.....10

I.9 La transmission par fibre optique.....11

I.10 L'ouverture numérique12

| | |
|--|-----------|
| I.11 La fréquence normalisée..... | 12 |
| I.12 Nombre de mode | 12 |
| I.13 Principe de guidage de la lumière..... | 13 |
| I.13.1 Indice de réfraction | 13 |
| I.13.2 La réflexion | 13 |
| I.13.3 La réfraction | 13 |
| I.14 La loi de Snell – Descartes | 13 |
| I.14.1 Incidence critique..... | 14 |
| I.15 Propagation dans une fibre optique à saut d’indice | 14 |
| I.16 Atténuation dans les fibres optiques..... | 16 |
| I.17 Bande passante..... | 17 |
| I.18 Conclusion | 17 |

Chapitre II Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l’outil de simulation

| | |
|--|-----------|
| II. 1. Introduction..... | 18 |
| II. 2 Définition d’un réseau de Bragg..... | 18 |
| II. 3 Principe de fonctionnement d’un réseau de Bragg | 20 |
| II. 4 Les différents types de réseaux de Bragg..... | 20 |
| II. 4.1 Réseaux de Bragg uniforme..... | 21 |
| II. 4.2 Réseaux de Bragg à pas variable (chirpé)..... | 22 |
| II. 5 Fabrication du FBG..... | 25 |
| II. 5.1 Méthode holographique..... | 25 |
| II.6. Théorie électromagnétique..... | 26 |
| II.6.1. Les équations de MAXWELL..... | 26 |
| II.6.2. Modes de propagation..... | 27 |
| II.6.2.1. Différents types de modes..... | 29 |
| II.6.2.2. Notion de mode..... | 30 |
| II.6.2.3. Notion d'indice effectif | 31 |
| II.7. Théorie des modes couplés..... | 31 |

| | |
|---|----|
| II. 8.Applications d'un RDB..... | 33 |
| II.9 Compensation de la dispersion chromatique | 33 |
| II.9.1 Origine de la dispersion chromatique..... | 34 |
| II.9.2 Présentation du module Grating Mod | 37 |
| II.10.Conclusion..... | 43 |
| Chapitre III Résultats et discussions | |
| III.1 Introduction..... | 44 |
| III.2 Simulations effectuées..... | 44 |
| III.2.1(Simulation d'une FBG à pas uniforme pour application comme un filtre en longueur d'onde)..... | 44 |
| III.2.1.1 Optimisation de l'amplitude de modulation d'indiceModDelta..... | 44 |
| III.2.2 Simulation d'une FBG à pas variable pour application en tant qu'un compensateur de dispersion chromatique..... | 46 |
| III.2.2.1 L'impact du coefficient chirp sur la réflectivité..... | 46 |
| III.2.2.2 L'impact de la longueur du réseau sur la réflectivité..... | 52 |
| III.2.2.3 Compensation de la dispersion chromatique..... | 57 |
| III.3 Conclusion..... | 59 |
| Conclusion générale | |
| Référence bibliographie | |
| Résumé | |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : une onde électromagnétique. | 5 |
| Figure I.2 : le spectre des rayons. | 5 |
| Figure I.3 : le spectre visible (couleurs) . | 5 |
| Figure I.4 : le spectre visible | 6 |
| Figure I.5 : la propagation d'une onde électromagnétique le long du vecteur K. | 7 |
| Figure I.6 : structure d'une fibre optique. | 8 |
| Figure I.7 : des fibres optiques monomode | 9 |
| Figure I.8 : fibre optique multimode. | 10 |
| Figure I.9 :fibres optiques à saut d'indice monomode | 10 |
| Figure I.10 : Fibre optique à saut d'indice multi-mode et son profil d'indice. | 11 |
| Figure I.11 : Fibre optique à gradient d'indice et son profil d'indice. | 12 |
| Figure I.12 : L'angle d'acceptance. | 12 |
| Figure I.13 : Représentation des différents types de rayon | 15 |
| Figure 1.14 : présentation de différents cas de rayons incidents. | 15 |
| Figure I.15. : Principe de propagation | 16 |
| Figure I.16. Ouverture numérique d'une fibre optique | 16 |
| Figure I.17 : la courbe d'atténuation dans une fibre optique | 17 |
| Figure II.1 : Réseau de Bragg photo inscrit | 20 |
| Figure II.2 : principe de fonctionnement | 21 |
| Figure II.3 : Classification des réseaux de Bragg. | 21 |
| Figure II.4 : Réseau de Bragg uniforme | 22 |
| Figure II.5 : Réseau de Bragg « chirped » | |
| Figure II.6 : Structure de la FBG à pas variable (chirped) ainsi que le profil de l'indice de réfraction. | 22 |
| Figure II.7 : Exemple d'un spectre de réflexion et de dispersion d'un réseau de Bragg chirpé de 100 mm calculée à l'aide du logiciel MATLAB. | 23 |
| Figure II.8 :Principe d'exposition de RDB par méthode holographique | |
| Figure II.9 :Différentes distributions du champ correspondant aux différentes valeurs de β | 33 |
| Figure II.10 : La dispersion chromatique dans une fibre | |

| | |
|--|----|
| Figure II.11 : Dispersion chromatique de la fibre standard | 36 |
| Figure II.12: Dispersion dialogue ‘GratingMOD Generator’ | 37 |
| Figure II.13: Éditeur de fonction pour Grating Taper | 38 |
| Figure II.14: Boîte de dialogue de GratingMod simulation | 39 |
| Figure II.15 : Fenêtre des Options de spectre de sortie | 40 |
| Figure II.16 : La fenêtre de simulation GratingMOD avec le mode Grating Synthesis | 40 |
| Figure III.1: La Réponse spectrale d’un réseau de Bragg du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d’onde de la FBG | 45 |
| Figure III.2: Structure d’une fibre de Bragg chirpée | 46 |
| Figure III.3 : Réponse spectral du réseau avec plusieurs valeurs du coefficient chirpé et pour (ModDelta=0.0012, Delta=0.008, Période=0.5, Length=5000) | 49 |
| Figure III.4 : Réponse spectral du réseau avec le coefficient chirpé = 0.004 et pour (ModDelta=0.0012, Delta=0.008, Period=0.5, Length=5000) | 50 |
| Figure III.5: Variation de la réflectivité en fonction du coefficient chirpé | 50 |
| Figure III.6: Réponse spectrale de la FBG pour différents valeurs de la longueur du réseau et pour (ModDelta=0.0012, Delta=0.008, Period=0.5, Chirp Coefficient =0.004) | 54 |
| Figure III.7 : Variation du coefficient de réflexion en fonction de la longueur du réseau | 55 |
| Figure III.8: Courbe de la dispersion chromatique et du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d’onde. | 56 |

Introduction Générale

Durant les dix dernières années, le monde a vu une croissance explosive des télécommunications optiques, alimentée en partie par l'expansion rapide d'internet. Non seulement les systèmes de télécommunications optiques cherchent constamment à améliorer leur performance et leur capacité, mais également se déploient de plus en plus au niveau de l'utilisateur final.

Les communications par fibre optique sont très étudiées car elles offrent des possibilités incroyables au niveau du temps de transmission (vitesse de la lumière dans la fibre) et du taux de transmission totale qui sont difficilement égalables. De plus, elle est supérieure aussi pour ses propriétés de transmission (peu de perte) et pour sa flexibilité dans le choix de la technique de transmission utilisée. La bande passante disponible pour les transmissions dans la fibre optique est de l'ordre du terahertz (~15 THZ) pour les deux fenêtres de longueurs d'onde utilisables, soit autour de 1300 nm et autour de 1550 nm. [1]

En 1978, au centre de recherche Canadien de communications, Ottawa, Ontario, Canada, K.O.Hill est le premier qui a démontré que l'indice de réfraction change dans une fibre optique à base de silice et de germanium, en émettant un faisceau de lumière intense dans une fibre. En 1989, une nouvelle technologie d'écriture des réseaux de Bragg ; irradiation par la lumière ultraviolet, a été démontrée par Meltz et Al. Beaucoup de recherches ont été établies ensuite pour améliorer la qualité et la durabilité de ces réseaux. Ces fibres sont les clés des communications optiques modernes, ils ont été commercialisés dès le début de l'année 1995.[2]

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

Un réseau de Bragg est une modification permanente de l'indice de réfraction photo induite par exposition de la fibre optique à un faisceau laser ultraviolet. Une modulation périodique de l'indice crée un réseau de phase permettant un couplage de l'énergie de certains modes vers d'autres modes de propagation. En particulier, si le couplage a lieu en contre propagation le réseau est appelé 'réseau de Bragg'.

Un réseau de Bragg aussi est un filtre travaillant en réflexion. Suivant l'application, ces réseaux peuvent avoir des bandes inférieures à 0.1 nm, comme on peut avoir un filtre large bande de 10 nm. La réflectivité à la longueur de Bragg peut être conçue inférieure à 1%, comme elle peut être supérieure à 90%. Les caractéristiques d'une fibre de Bragg ; comme la dispersion, l'apodisation, le contrôle de la largeur de bande sont utilisées actuellement dans les systèmes de communication optiques.

Le but de notre travail est de faire une caractérisation du réseau de Bragg à pas variable, et d'appliquer les résultats obtenus avec le module Grating MOD du logiciel Rsoft pour la compensation de la dispersion chromatique en utilisant la théorie des modes couplés (propagation de la lumière dans la fibre perturbée : modes en Co propagation et modes en contre propagation).

Notre manuscrit s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les fibres optiques ainsi que leurs différents types et caractéristiques. Parmi les phénomènes se produisant au point d'incidence d'une onde sur l'interface de deux milieux diélectriques, nous avons traité la réflexion totale interne qui est un phénomène primordial pour la compréhension des guides diélectriques.

Le deuxième chapitre nous a mené à comprendre comment évolue la propagation d'ondes électromagnétiques à l'intérieur des guides d'ondes. La théorie de Maxwell a été ainsi décrite. On a présenté des généralités sur les réseaux de Bragg, leur principe de fonctionnement, ainsi que leurs différents types y compris la théorie des modes couplés, ainsi qu'à l'outil de simulation utilisé lors de cette étude, qui est le module Grating MOD du logiciel Rsoft. Et enfin, dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus pour le réseau de Bragg : à pas constant et à pas variable.[3]

On a déduit, les valeurs optimales pour améliorer les performances du réseau chirpé.

Une conclusion générale s'impose à la fin de ce manuscrit, elle englobera les différentes remarques et constatations émanant de toute cette étude.

I.1 Introduction

De nos jours, les autoroutes de l'information offrent la possibilité de transmettre des données, de la voix, des images ...etc. d'un bout à l'autre de la planète. Aujourd'hui, 80 % du trafic mondial longue distance se fait par fibres optiques.

La fibre optique est 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'informations. En permettant les communications à très longue distance et à fort débit, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications optiques [4].

L'objectif de ce chapitre est de présenter des généralités concernant ce support de transmission.

I.2 La lumière

La discipline qui étudie la lumière est l'optique. Comme les lois de la propagation de la lumière sont largement semblables à celles des autres rayonnements électromagnétiques, d'autant plus que leurs longueurs d'onde sont proches du spectre visible, l'optique s'étend souvent à d'autres ondes électromagnétiques situées dans les domaines infrarouge et ultraviolet ; c'est ainsi qu'on parle de lumière noire, de lumière ultraviolette ou de lumière infrarouge, ce qui pousse parfois à utiliser le terme de lumière visible pour éviter toute ambiguïté. La lumière, y compris ces rayonnements invisibles, transporte une grande partie de l'énergie solaire jusqu'à la surface de la terre et maintient l'équilibre de l'environnement naturel, avec la régénération de l'oxygène par la chlorophylle des plantes.

Pour l'être humain, la lumière indispensable à la vision tient une part importante du bien-être et de la vie sociale. L'éclairage est une spécialité artistique et industrielle qui fait l'objet de normes légales. L'optique physiologique étudie plus particulièrement la perception de la lumière par les êtres humains. La photométrie relie les mesures physiques des rayonnements électromagnétiques à la vision humaine ; la colorimétrie les relie à la perception des couleurs.

La lumière a une forte valeur symbolique; permettant de percevoir les objets avant de les toucher, elle s'associe, dans toutes les cultures humaines, à la connaissance.

I.3 La composition de la lumière et les couleurs :

La lumière blanche, c'est-à-dire la lumière du soleil ou des étoiles, est composée de plusieurs couleurs allant du rouge au violet. On peut voir ces couleurs distinctement avec un prisme (bloc de verre triangulaire en général) ou lorsqu'apparaît un arc-en-ciel (par temps de pluie, les gouttelettes d'eau jouent le rôle du prisme).

En 1666 Isaac Newton est le premier à décomposer la lumière blanche avec un prisme. Il capte une partie des rayons du soleil en les faisant passer par un petit orifice puis le fait pénétrer dans un prisme ; la lumière est alors déviée et réfractée sur un écran. On peut alors voir sur cet écran un dégradé de couleur allant du violet au rouge. Le spectre de la lumière est alors observable.

Chacun des objets qui nous entourent réfléchit (c'est-à-dire renvoie) certaines des couleurs qui composent la lumière blanche et absorbe les autres. La couleur d'un objet en plein jour est donc la couleur que l'objet réfléchit. Ainsi une tomate mûre est rouge parce qu'elle réfléchit la composante rouge de la lumière du soleil tandis qu'elle absorbe toutes les autres composantes, du violet à l'orange.

La superposition de différentes couleurs d'éclairage permet la synthèse d'autres couleurs. On peut parler dans cette optique de synthèse additive. Si l'on éclaire un objet par des lumières de différentes couleurs sa couleur risque de changer à chaque fois.

I.4 Notion du spectre électromagnétique

Les ondes électromagnétiques est constituée d'un champ électrique **E** et d'un champ magnétique **B** qui varient en même temps. Le vecteur du champ électrique **E** et celui du champ magnétique **B** se sont perpendiculaire entre eux et perpendiculaire à la direction de propagation.

I.4.1 Propriétés d'une onde électromagnétique :

a) La fréquence : la fréquence **f** d'une électromagnétique est la fréquence des champs **E** et **B** qui la composent.

b) La vitesse de propagation dans le vide ou l'air : $c = 3.10^8$ m/s.

c) La longueur d'onde : La longueur d'onde λ est le trajet parcouru par l'onde durant une période **T** : $\lambda = c/f = c \cdot T$.

d) La Polarisation : l'OEM est polarisée dans la direction du champ électrique **E**.

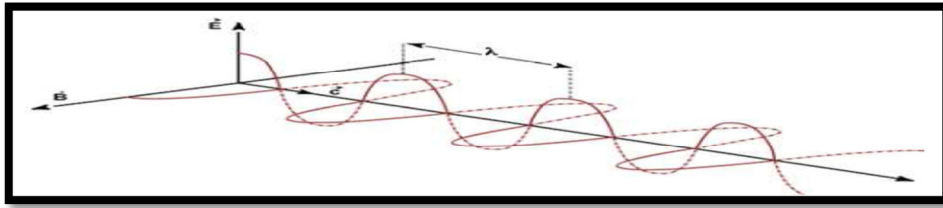


Figure I.1 : Une onde électromagnétique.

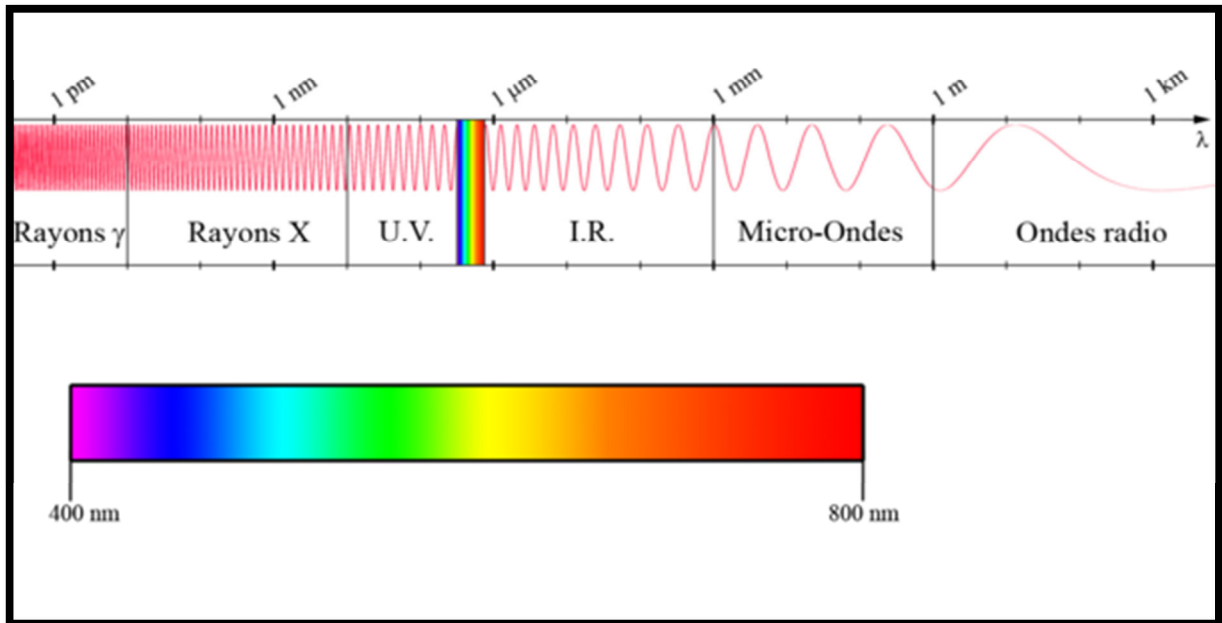


Figure I.2 : Le spectre des rayons.

La spectroscopie ou spectrométrie est l'étude expérimentale des spectres électromagnétiques par des procédés, d'observation et de mesure avec décomposition des radiations en ondes monochromatiques. La spectroscopie s'intéresse en général au spectre d'absorption ou au spectre d'émission d'un objet.

Il existe trois types de spectre lumineux : les spectres continus, de bandes ou encore de raies. L'existence de ces différents types de spectres prouve que toutes les lumières ne sont pas équivalents.

I.4.2 Spectre du visible :



Figure I.3 : Le spectre visible (couleurs).

Il comporte toutes les couleurs visibles par l'œil humain, c'est un spectre continu qui comprend toutes les longueurs d'ondes entre 400 et 800 nm. On peut ainsi dire que la lumière du soleil est une lumière polychromatique (qui contient plusieurs couleurs, plusieurs longueurs d'ondes). On peut noter que le spectre du visible est encadré par le domaine de l'infrarouge (au-dessus de 800 nm) et le domaine de l'ultraviolet (en dessous de 400 nm).

I.4.3 Spectre du laser



Figure I.4: Le spectre visible

C'est un spectre de raies caractéristique puisqu'il fait apparaître une seule et unique longueur d'onde, le laser est donc une lumière monochromatique (une seule couleur). Une source polychromatique est donc en fait une superposition de lumières monochromatiques.

Un spectre de raies est composé de plusieurs longueurs d'ondes spécifiques.

La longueur d'onde est en fait la caractéristique propre à une lumière monochromatique (c'est-à-dire d'une seule couleur). Autrement dit chaque longueur d'onde correspond à une couleur précise. [5]

I.5 La dualité onde corpusculaire :

I.5.1 La théorie corpusculaire :

Cette théorie conçoit la lumière comme un ensemble de particules (ou corpuscules) dont le mouvement est décrit dans un cadre proche de celui de la mécanique. Ces particules sont appelées photons et ont une énergie $E=hf$ où h est la constante de Planck ($h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$) et f la fréquence de l'onde lumineuse en Hz. Les trajectoires suivies par ces particules sont les rayons lumineux que l'on retrouvera en optique géométrique.

I.5.2 La théorie ondulatoire :

La théorie ondulatoire conçoit la lumière comme une onde, dont la propagation est régie par les équations de Maxwell, dont on va parler plus loin dans ce chapitre, Dans ce cas le champ électromagnétique oscille perpendiculairement à un axe qui correspond au rayon lumineux de l'optique géométrique. On appelle onde le phénomène de propagation dans un

milieu sans transport de matière. Une onde se propage à partir d'une source dans toutes les directions de l'espace. La perturbation se transmet de proche en proche avec un transfert d'énergie sans transport de matière ; ce phénomène dépend du temps. La vitesse de propagation d'une onde est une propriété du milieu ; la vitesse de la lumière dépend par exemple de l'indice du milieu qu'elle traverse. Contrairement aux ondes mécaniques, les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide. Les champs électriques \mathbf{E} et magnétique \mathbf{B} oscillent autour d'un axe repéré par le vecteur \mathbf{k} .



Figure I. 5 : La propagation d'une onde électromagnétique le long du vecteur \mathbf{k} .

\mathbf{E} , et \mathbf{B} sont toujours perpendiculaires entre eux. Chacun d'eux est perpendiculaire à \mathbf{k} . On dit qu'ils forment un trièdre direct (\mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{k}). \mathbf{E} oscille en fonction du temps perpendiculairement à la direction de propagation. Où r est le vecteur position \mathbf{v} est la fréquence de l'onde.[6]

I.6 Fibre optique :

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle a un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques.

Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique 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'informations. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications optiques. Ses propriétés sont également exploitées dans le domaine des capteurs (température, pression, ... etc.) et dans l'imagerie.

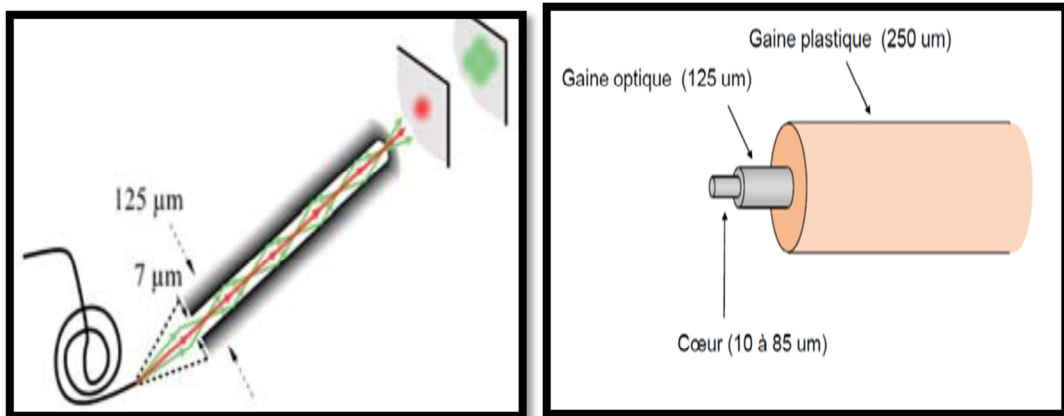


Figure I.6 : Structure d'une fibre optique.

D'autre part une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire tel que schématisé sur la figure 6. Ce guide est constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre ou plastique) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre. En outre, comme le montre la figure (6), la deuxième couche est elle-même entourée d'une enveloppe, généralement en plastique, qui a le double rôle de protéger la fibre mécaniquement et de piéger la lumière qui se propage dans la gaine optique, en général indésirable.

I.6.1 Le cœur

C'est dans cette zone, constituée de verre, que la lumière est guidée et se propage le long de la fibre.

I.6.2 La gaine optique

Constituée dans les mêmes matériaux que le cœur qu'elle entoure, la gaine optique de la fibre utilisée dans les télécommunications est donc, comme le cœur, composée de silice. Cependant c'est un silice de moins bonne qualité, la gaine optique n'étant pas destinée à transmettre la lumière. On peut également doper la gaine pour lui donner un indice de réfraction n_g inférieur à celui du cœur n_c .

I.6.3 Le revêtement de protection

Généralement en plastique, il assure la protection mécanique de la fibre optique. Il sert également pour la flexibilité de la fibre et facilite sa manipulation. Cette couche extérieure n'intervient pas dans la transmission de la lumière. [7]

I.7 Différents type de fibre optique

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur et la longueur d'onde utilisée : les fibres monomodes et multimodes.

I.7.1 Fibre optique monomode :

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

Les fibres monomodes sont de ce fait adaptées pour les lignes intercontinentales (câbles sous-marin). Une fibre monomode n'a pas de dispersion intermodale. En revanche, il existe un autre type de dispersion : la dispersion intermodale. Son origine est la largeur finie du train d'onde d'émission qui implique que l'onde n'est pas strictement monochromatique : toutes les longueurs d'onde ne se propagent pas à la même vitesse dans le guide ce qui induit un élargissement de l'impulsion dans la fibre optique. On l'appelle aussi dispersion chromatique (cf. plus haut « Dispersion chromatique »). Ces fibres monomodes sont caractérisées par un diamètre de cœur de seulement quelques micromètres (le cœur monomode est de 9 μm pour le haut débit).

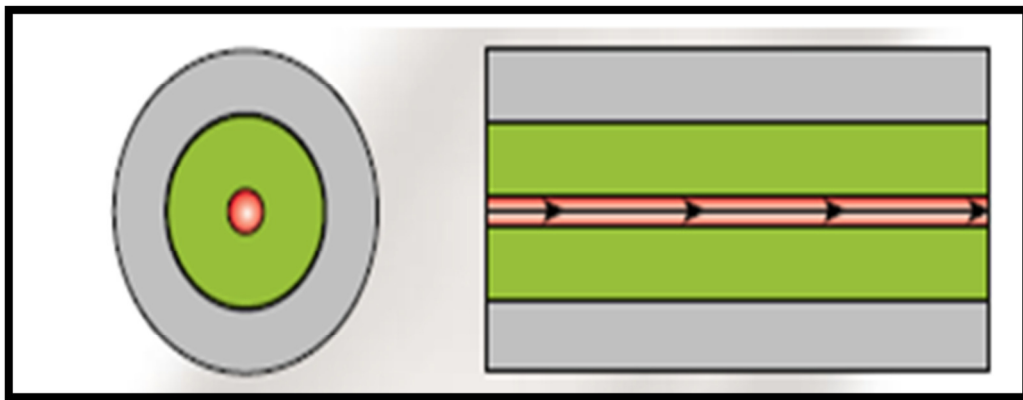


Figure I.7: des fibres optiques monomode.

I.7.2 Fibre optique multimode

Les fibres multimodes (dites MMF, pour Multi Mode Fibre), ont été les premières sur le marché. Elles ont pour caractéristique de transporter plusieurs modes (trajets lumineux). Du fait de la dispersion modale, on constate un étalement temporel du signal proportionnel à la

longueur de la fibre. En conséquence, elles sont utilisées uniquement pour des bas débits ou de courtes distances. La dispersion modale peut cependant être minimisée (à une longueur d'onde donnée) en réalisant un gradient d'indice dans le cœur de la fibre. Elles sont caractérisées par un diamètre de cœur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètres (les cœurs en multimodes sont de 50 ou 62,5 μm pour le bas débit). Cependant les fibres les plus récentes, de type OM3, permettent d'atteindre le Gbit/s sur des distances de l'ordre du km. Les longues distances ne peuvent être couvertes que par. [8]

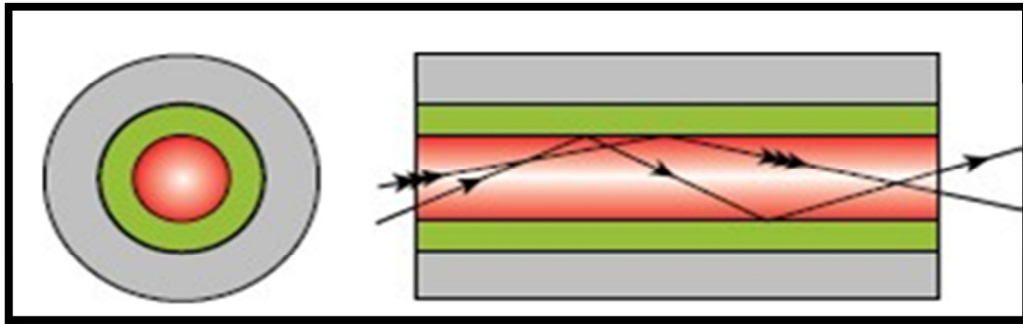


Figure I. 8: Fibre optique multimode.

I.8 Les classifications types de la fibre optique

I.8.1 Les fibres optiques à saut d'indice

Elles se différencient avec les fibres optiques à saut d'indice multi-modes en diamètres.

Le diamètre de leurs cœurs varie entre 6 μm et 8 μm , tandis que le diamètre de leurs gaines est de 125 μm .

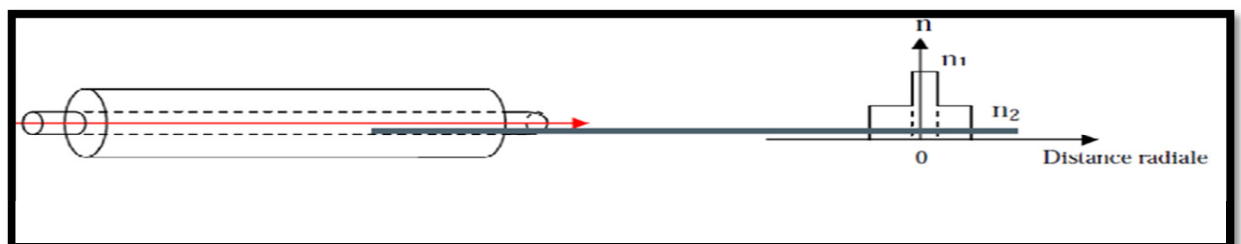


Figure I. 9: Fibres optiques à saut d'indice monomode

Dans ces types de fibres, le cœur est homogène de diamètre varie entre $100\mu\text{m}$ et $200\mu\text{m}$ tandis que celui de la gaine varie de $150\mu\text{m}$ à $250\mu\text{m}$, leurs indice de réfraction est donne par :[9]

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & \text{si } r < a \text{ (cœur)} \\ n_2 & \text{si } r \geq a \text{ (gaine)} \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

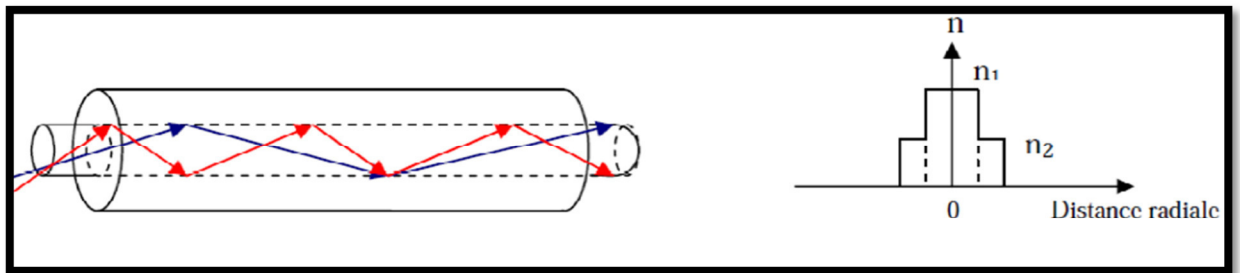


Figure I.10: Fibre optique à saut d'indice multi-mode et son profil d'indice.

❖ **Avantage :**

Faible prix

Facilité de mise en œuvre

❖ **Inconvénients :**

Perte et distorsion importante du signal

I.8.2 La fibre optique à gradient d'indice :

Dans ces types de fibres, l'indice du cœur diminue suivant une loi parabolique progressivement vers l'extérieur à partir de l'axe du cœur vers l'interface cœur-gaine. Le diamètre du cœur est de $50\mu\text{m}$ et celui de la gaine est de $150\mu\text{m}$, leurs indice de réfraction est donnés par :

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2} & \text{si } r < a \text{ (cœur)} \\ n_2 \sqrt{1 - 2\Delta} & \text{si } r \geq a \text{ (gaine)} \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

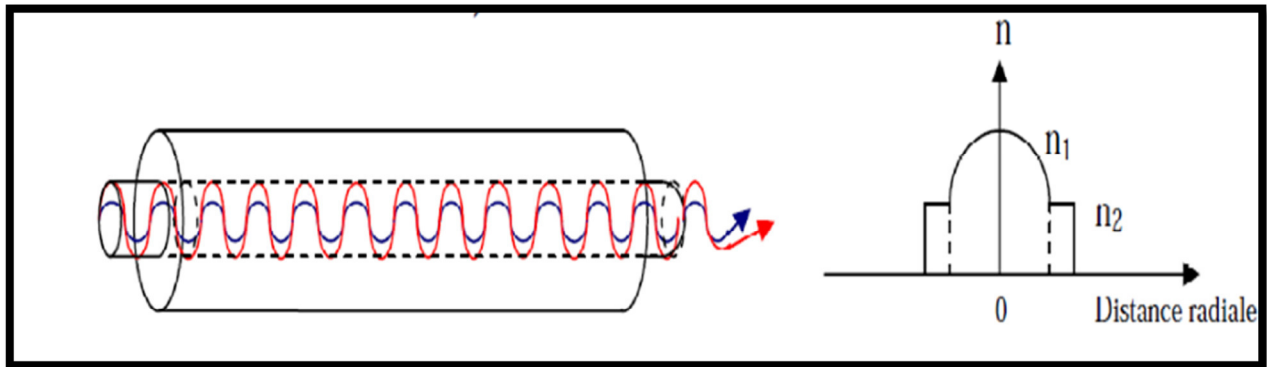


Figure I.11 : Fibre optique à gradient d'indice et son profil d'indice.

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction n n'est pas constant mais décroît graduellement du centre de la section du cœur jusqu'à la limite de la surface de séparation entre le cœur et la gaine.

❖ **Avantage :**

Bande passante raisonnable

Bonne qualité de transmission

❖ **Inconvénients :**

Difficile à mettre en œuvre

I. 9 La transmission par fibre optique :

La transmission est faite par réflexions successives du rayon optique sur l'interface cœur gaine et pour que la réflexion soit réalisée, il est nécessaire que l'angle d'incidence sur cette surface soit supérieure à l'angle critique, cette condition impose à l'entrée de la fibre l'existence d'un angle à l'intérieure de lequel tout rayon injecte se propage par réflexion totale (l'angle d'acceptance θ_{ac}). [10]

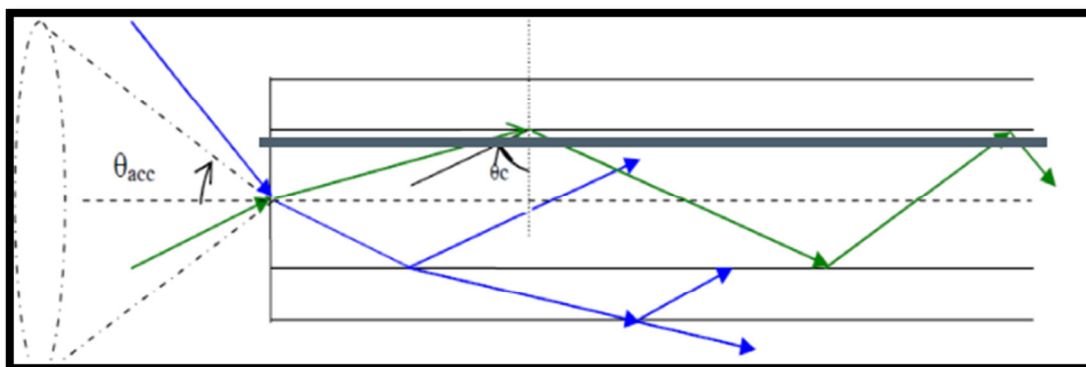


Figure I.12: L'angle d'acceptance.

I.10 L'ouverture numérique

Est un paramètre lié à l'angle d'acceptance, indique l'angle d'incidence pour le quelle le rayon optique soit transmet par des réflexions totales dans la fibre optique, donnée par: [10]

$$ON = n_0 \sin \theta_{ac} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{si } n_0 = 1 \Rightarrow ON = \sin \theta_{ac} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{I.3})$$

Si la fibre a une différence d'indice faible

$$ON = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \text{avec } \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (\text{I.4})$$

I.11 La fréquence normalisée

La fréquence normalisée est obtenue par la résolution des équations d'onde en

cordonnées cylindrique, sa formule est donnée par : $V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. (I.5)

I.12 Nombre de mode

Le mode de propagation définit la manière ou la façon avec la quelle le champ électrique se propage à l'intérieur de la fibre. En effet, une onde peut être décomposée à l'intérieur de la fibre en plusieurs petites ondes qui définissent les modes de propagation. Le développement de l'équation du vecteur permet de trouver le nombre de modes. [11]

- **Pour la fibre a saut d'indice :**

$$N_T = \frac{a^2}{2} k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2} \quad (\text{I.4})$$

V : est la fréquence normalisée.

- **Pour une fibre a gradient d'indice :**

$$N_t = \frac{a^2}{2} k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) \frac{\alpha}{\alpha+2} = \frac{V^2}{2} \frac{\alpha}{\alpha+2} \quad (\text{I.5})$$

Soit $\frac{V}{4}$ pour un gradient parabolique ($\alpha=2$).

I.13 Principe de guidage de la lumière

I.13.1 Indice de réfraction

Un milieu de propagation est caractérisé par : la permittivité ϵ , la perméabilité μ et la conductivité σ . A partir des deux premiers paramètres on définit l'indice de réfraction n du milieu de propagation $n = \eta = \sqrt{\mu\epsilon}$ (I. 6)

I.13.2 La réflexion

Est le changement total de la direction de la lumière lorsqu'elle rencontre un milieu de propagation de dimensions plus grandes que la longueur d'onde.

I.13.3 La réfraction

C'est un léger changement de la direction de la lumière lorsqu'elle se propage dans le même milieu ou lorsqu'elle rencontre un autre milieu de propagation dont les dimensions, qui ne sont pas important par rapport à la longueur d'onde. [12]

I.14 La loi de Snell – Descartes

Considérons deux milieux d'indice de réfraction n_1 et n_2 séparés par une surface s . lorsqu'un rayon incident du milieu **1** d'indice de réfraction n_1 rencontre la surface de séparation s , il apparaît deux autres rayons :

- ❖ Un rayon réfléchi dans le milieu **1**
- ❖ Un rayon réfracté et transmis dans le milieu **2** d'indice de réfraction n_2 .

La direction du rayon réfléchi est donnée par : $\theta_1 = \theta_1$

Et celle du rayon transmis et réfractes au même temps :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 . \quad (\text{I.7})$$

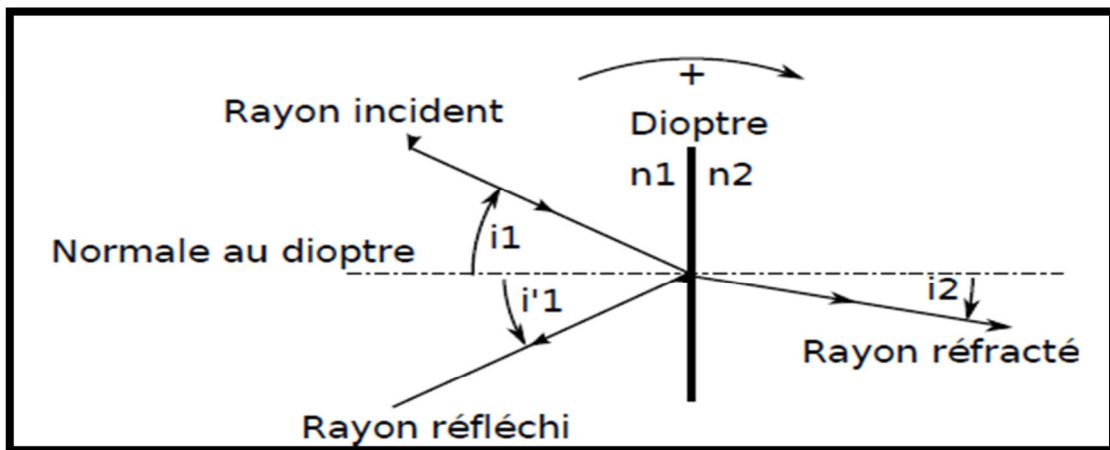


Figure I.13 : Représentation des différents types de rayon

I.14.1 Incidence critique

Considérons un rayon incident dans un milieu d'indice de réfraction n_1 et se propageant vers un autre milieu d'indice de réfraction n_2 plus faible c.à.d.

$$n_1 > n_2 \rightarrow \theta_1 < \theta_2.$$

Si on augmente l'angle d'incidence θ_1 , l'angle de réfraction θ_2 augmente également jusqu'à la valeur limite $\pi/2$.

L'angle θ_1 pour laquelle on a $\theta_2 = \pi/2$ est appelée incidence critique notée θ_c donnée par : $\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ (I.8)

Si l'angle d'incidence dépasse θ_c il y a alors réflexion totale.

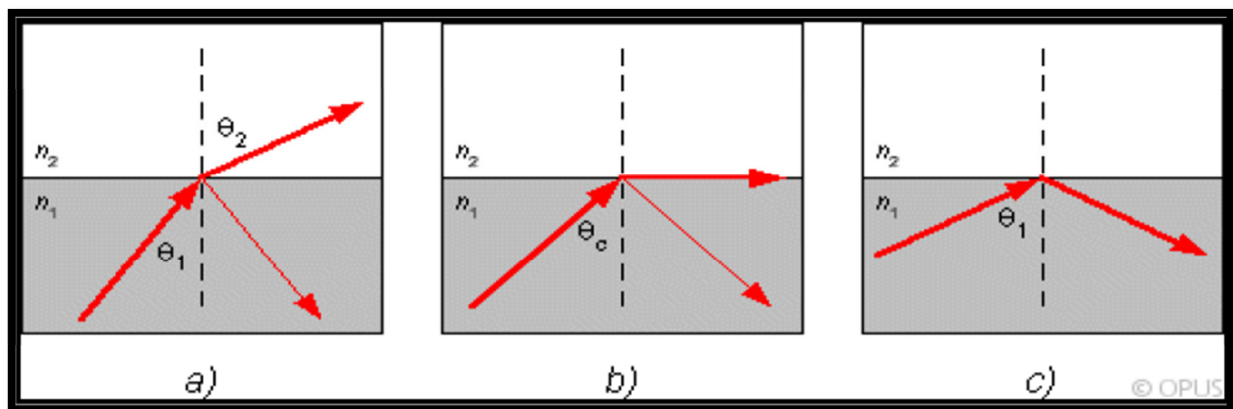


Figure I. 14 : présentation de différents cas de rayons incidents.

I.15 Propagation dans une fibre optique à saut d'indice

Les fibres optiques à saut d'indice sont une conséquence directe de ce qui précède. En effet, intéressons-nous au trajet d'un rayon lumineux à l'intérieur du cœur d'une fibre optique, comme d'écrit sur la **Figure 15**. Afin que le rayon se propage à l'intérieur du cœur de la fibre,

il faut qu'il y ait réflexion totale à l'interface cœur-gaine (au point I sur la **figure 15**). Cela implique donc une condition sur l'inclinaison du rayon entrant dans le cœur (donc sur l'angle θ de la **Figure 15**). Rappelons que dans le cas d'une fibre à saut d'indice, l'indice du cœur est supérieur à celui de la gaine, donc nous avons : $n_1 > n_2$. [13]

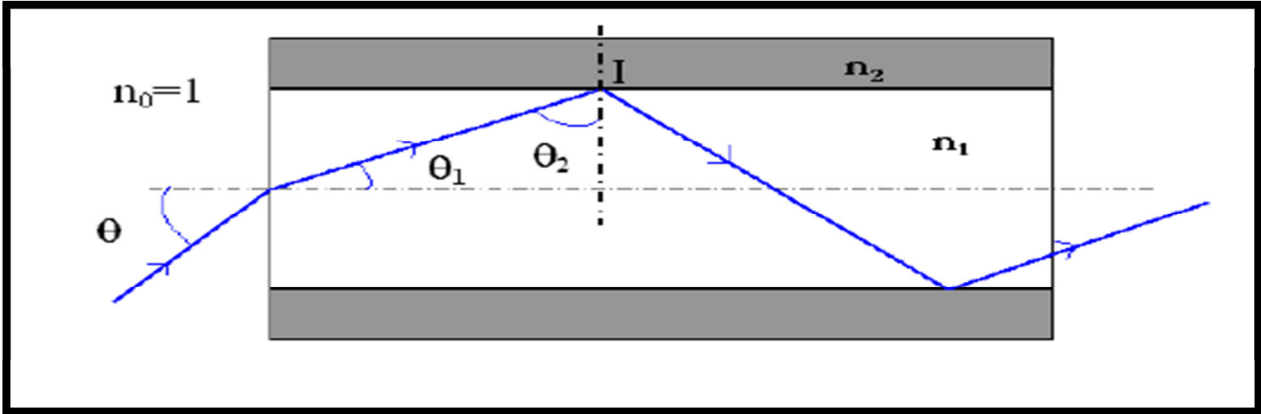


Figure I.15 : Principe de propagation

D'après les lois de Descartes, pour qu'il y ait réflexion totale en I, il faut que l'angle d'incidence du rayon émis θ_2 soit supérieur à l'angle critique Φ_c défini par :

$$\sin \Phi_c = n_2/n_1 \quad (\text{I.9})$$

En faisant un peu de géométrie élémentaire à partir de la figure (**Figure 15**), cette condition sur θ_2 aboutit à une condition sur θ à savoir : $\theta < \arcsin(\sqrt{n_1^2 - n_2^2})$

Donc, pour qu'une fibre puisse transmettre un rayon lumineux, il faut que celui-ci ait un angle d'incidence inférieur à $\theta = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ (**I.10**), ce qui signifie qu'il doit être dans un cône de demi-angle au sommet θ comme représenté sur la **Figure 16**.

Il est alors courant d'introduire l'ouverture numérique de la fibre, notée ON définit comme le sinus de l'angle maximum acceptable, soit : $ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. (**I.11**)

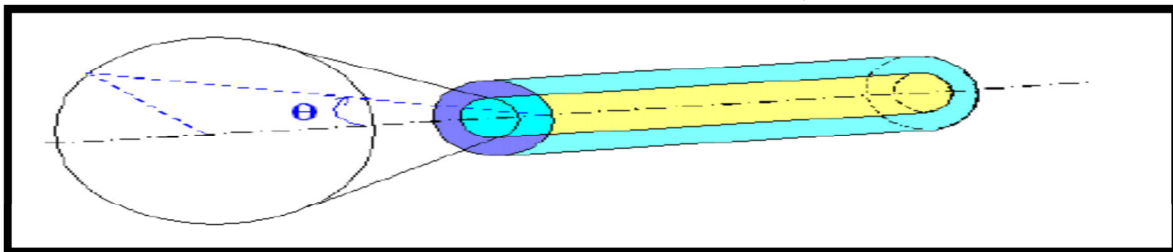


Figure I.16 : Ouverture numérique d'une fibre optique

I.16 Atténuation dans les fibres optiques

La lumière, lorsqu'elle se propage le long de la fibre, s'atténue progressivement. Cette atténuation s'exprime par une valeur en **dB/km** (décibel par kilomètre). Cette atténuation dépend de la longueur d'onde (λ), c'est à dire de la couleur (fréquence) de la lumière. En conséquence la longueur d'onde de la lumière utilisée pour transmettre un signal dans une fibre optique n'est pas choisie au hasard, elle correspond à un minimum d'atténuation.

La courbe d'atténuation a l'allure suivante: atténuation linéique (**dB/km**)

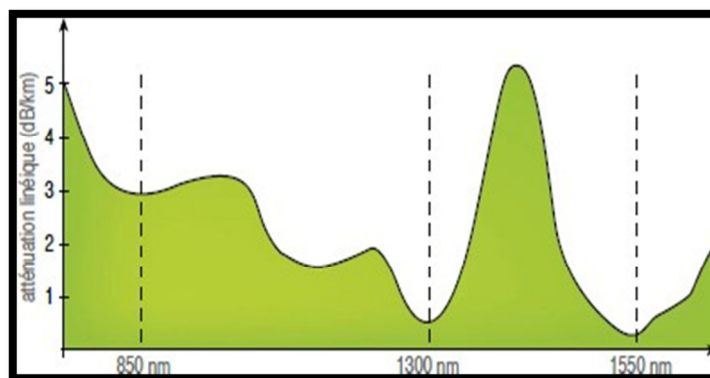


Figure I.17 : La courbe d'atténuation numérique dans une fibre optique

Les longueurs d'onde utilisées, et donc pour lesquelles des sources lumineuses ont été développées sont 850 nm (nanomètres) et 1300 nm en multimode, et 1310 nm et 1550 nm en monomode.

Exemple: Pour une utilisation à 850 nm, l'atténuation de lumière dans la fibre est de 3 dB au bout d'1 km de fibre (d'après le graphique). Ces 3 dB signifient que 50% de la lumière a été perdue. [13]

I.17 Bande passante

C'est une mesure de la capacité de transport de données d'une fibre optique. Par exemple, une fibre peut avoir une bande passante de 400 MHz.km (méga-hertz kilomètre). Cela signifie qu'elle peut transporter 400MHz sur 1 km.

Elle dépend du type de fibre, la fibre monomode permet d'avoir un débit d'informations beaucoup plus important que la multimode une information (**A**, **B** ou **C**) se propage dans la fibre suivant n modes, ce qui la déforme, comme si elle se « dédoublait » n fois (par exemple sur le schéma ci-dessus, le trajet suivant le mode 3 est

plus long que celui suivant le mode 2, qui est lui-même plus long que le trajet suivant le mode 1). Si les informations arrivent trop rapprochées, elles risquent alors de se mélanger, et ne sont pas récupérables à la sortie de la fibre.

Il faut donc les espacer suffisamment, c'est à dire limiter le débit. [13]

I.18 Conclusion

Si la diffraction n'existait pas, un faisceau lumineux irait tout droit sans s'élargir et il suffirait de viser son correspondant, si loin soit-il, pour lui transmettre un message optique.

Malheureusement, un faisceau lumineux a toujours une tendance naturelle à s'élargir à cause de la diffraction. Donc, pour utiliser la lumière pour le transport d'information, il est nécessaire de la guider en intervenant pour compenser sa divergence, par exemple par réflexions successives sur des parois de guidage. D'où l'idée d'utiliser la réflexion totale entre deux interfaces quand on passe d'un milieu d'indice n_2 plus réfringent à un milieu d'indice $n_1 < n_2$. Si le milieu guidant présente de faibles pertes de propagation alors le guidage existe sur plusieurs kilomètres.

II.1 Introduction

Le réseau de Bragg est devenu, en l'espace de quelques années, le composant incontournable et stratégique des transmissions optiques. On le retrouve dans pratiquement tous les composants de la chaîne de transmission et notamment pour le multiplexage et le démultiplexage, dont le rôle est d'insérer ou d'extraire une ou plusieurs longueurs d'onde dans la fibre. Le multiplexage de plusieurs longueurs d'onde sur une même fibre permet non seulement d'accroître la capacité des lignes, mais facilite aussi la redistribution du signal. [14]

L'apparition des réseaux de Bragg est la conséquence de l'application de la théorie de modes couplés. Dans ce chapitre, nous allons présenter le logiciel utilisé et les étapes à suivre pour simuler le réseau de Bragg chirpé ou à pas variable. [15]

II.2 Définition d'un réseau de Bragg

Un réseau de Bragg est une structure à perturbation périodique de l'indice de réfraction dans un guide d'onde (fibre optique). Une petite quantité de lumière incidente est réfléchiée à chaque changement périodique de l'indice de réfraction. Les ondes de lumière réfléchies à chaque période interfèrent et se recombinent en une réflexion élevée à une longueur d'onde particulière lorsque le mode de couplage le plus puissant se produit **(II.1)**. C'est la condition de Bragg, et la longueur d'onde, à laquelle se produit cette réflexion, est appelée la longueur d'onde de Bragg. Seules les longueurs d'onde qui satisfont à la condition de Bragg sont excitées et fortement réfléchies. La réflectivité de la lumière atteint un pic à la longueur d'onde de Bragg. Alors, la longueur d'onde de Bragg λ_{Bragg} est définie ci - dessous: **(II.1)**.

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda \implies \Lambda = \lambda_{\text{Bragg}} / 2n_{\text{eff}} \quad \text{(II.1)}$$

Où $2n_{\text{eff}}$ est l'indice de réfraction effective du guide, et Λ est le pas du réseau. De l'équation (II.1), on voit que la longueur d'onde de Bragg dépend de l'indice effectif ainsi que du pas. Si une fibre présente un long réseau de Bragg avec un faible saut d'indice de réfraction, son pic de réflexion est élevé sur une bande étroite.

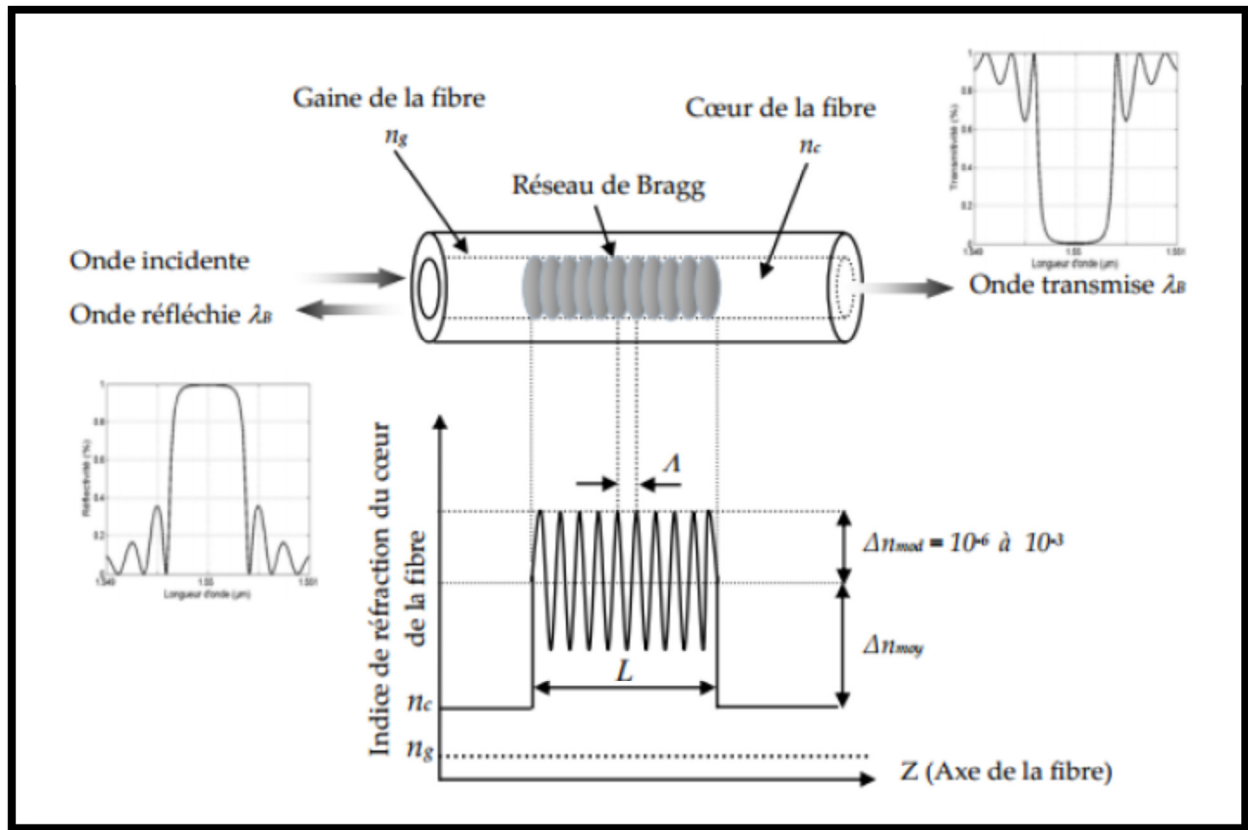


Figure II.1: Réseau de Bragg photo inscrit

II.3 Principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg

Un réseau de Bragg photo-inscrit dans le cœur d'une fibre optique consiste en la variation périodique-selon l'axe de la fibre-de l'indice de réfraction du cœur de la fibre n_c . cette modulation d'indice réalise un filtre en longueur d'onde. En effet, les longueur d'onde situées autour de la longueur d'onde de Bragg, λ_{Bragg} vérifiant la relation suivante (loi de Bragg) $\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda$. (II.2)

Sont partiellement réfléchies par le réseau : les autres sont transmises. Dans cette relation Λ désigne la période de modulation et n_{eff} l'indice de réfraction effectif du mode fondamental.

Structurellement, les réseaux sont caractérisés par la variation d'indice moyen photo-inscrit $\Delta n_{\text{moy}}(z)$. l'amplitude de modulation $\Delta n_{\text{mod}}(z)$ selon l'axe de la fibre et le pas Λ . dans le cas de réseau uniforme est constant, tandis que dans le cas de réseau à pas variable varie linéairement selon l'axe de la fibre, pour des réseaux apodisés c'est l'amplitude de modulation qui varie. [16]

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

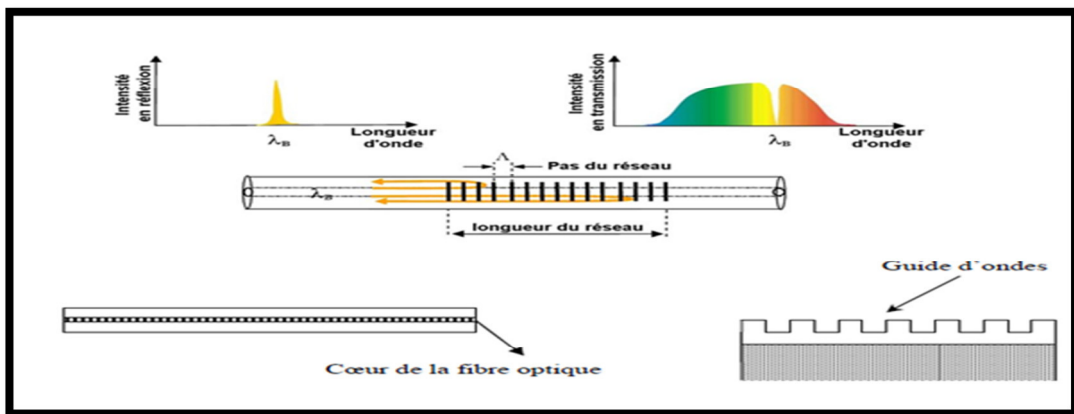


Figure II.2 : principe de fonctionnement.

II.4 Les différents types de réseaux de Bragg

Il existe différents types de réseaux qui se caractérisent chacun par leur modulation d'indice comme illustré sur la figure(II.2). Nous allons présenter ici brièvement les principales caractéristiques des différentes familles des réseaux.[16]

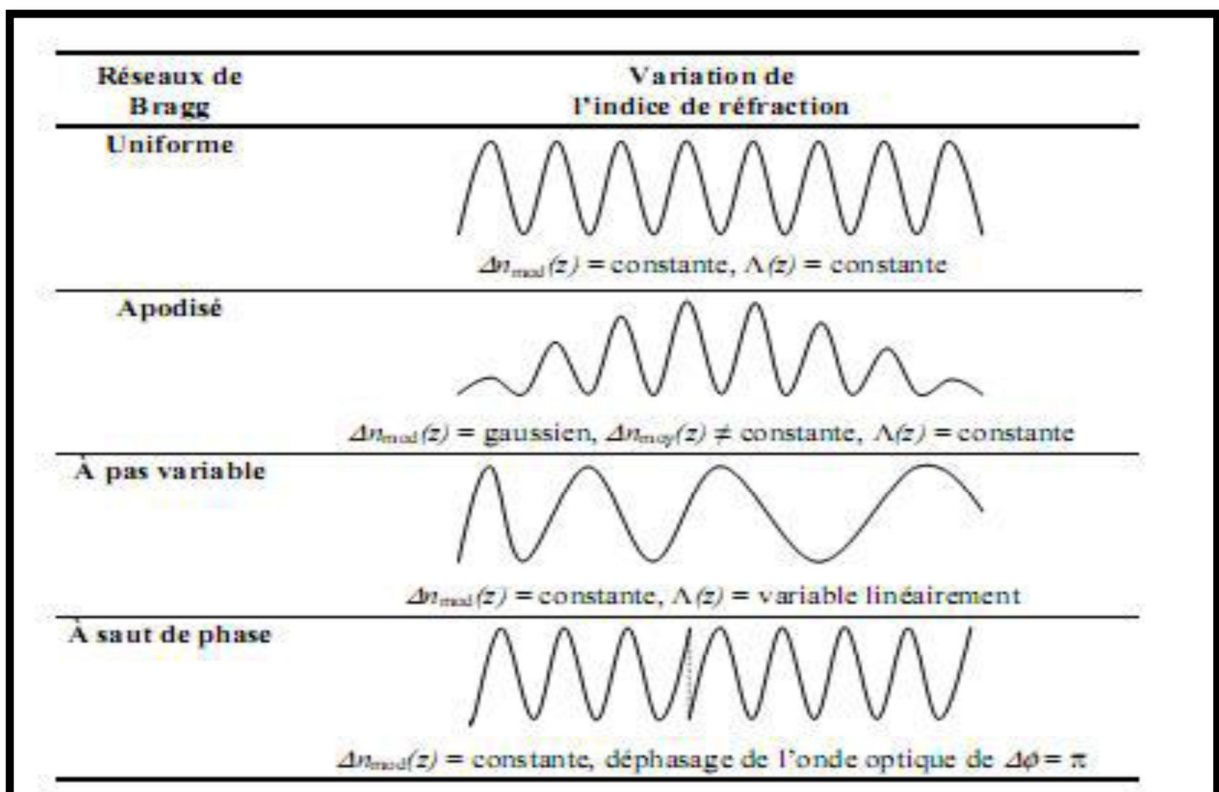


Figure II.3: Classification des réseaux de Bragg.

II .4.1 Réseaux de Bragg uniforme

Ce sont des réseaux standards qui ont une période constante.

Par exemple pour un réseau de Bragg photo-inscrit dans le cœur d'une fibre optique consiste en la variation périodique, selon l'axe de la fibre, de l'indice de réfraction du cœur de la figure (figure II.3). Cette modulation d'indice réalise un filtre en longueur d'onde. En effet, les longueurs d'onde situées autour de la longueur d'onde de Bragg vérifiant la loi de Bragg :
(II.2)

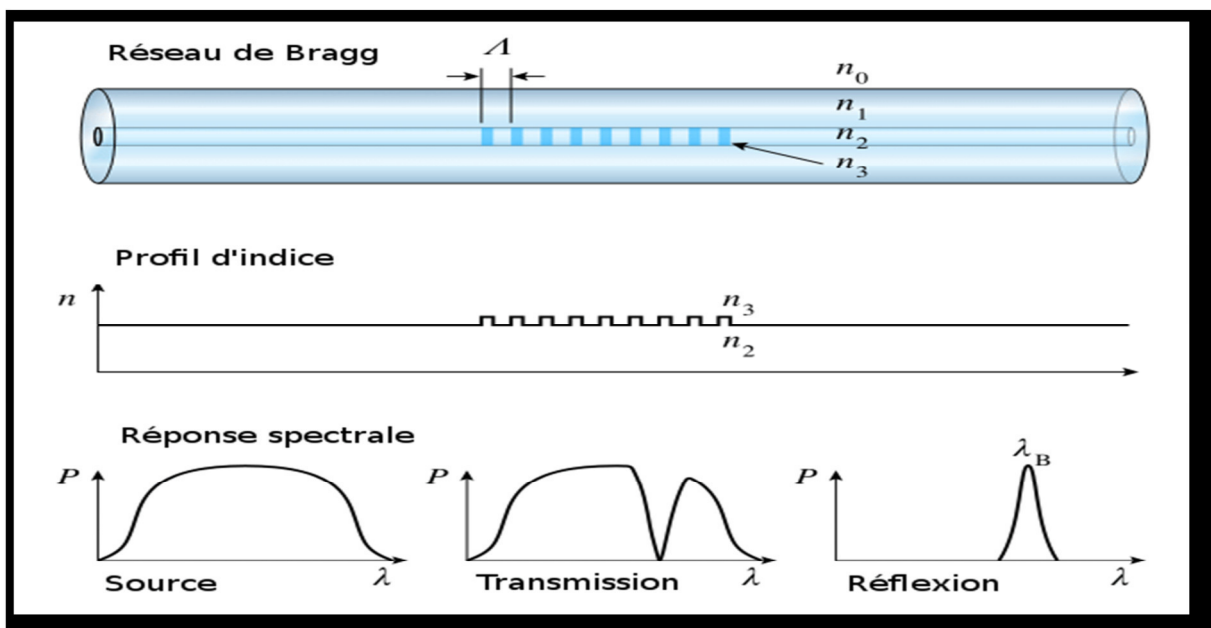


Figure II.4 : Réseau de Bragg uniforme

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

Donc on peut dire que le réseau réfléchit la lumière centrée autour d'une seule longueur d'onde. Le réseau est parfaitement périodique le long de la structure, avec des points de départ et de fin bien définis.

Souvent, soit par sa conception même soit à cause des techniques de fabrications utilisées, le réseau de Bragg dévie un peu de cette structure parfaite.[16]

II.4.2 Réseaux de Bragg à pas variable (chirpé)

Souvent, soit par la conception même du réseau soit à cause des techniques de fabrication utilisées, le réseau de Bragg dévie un peu de cette structure parfaite .Si le pas du

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

réseau varie légèrement tout au long de la structure, on dit alors qu'il présente un écart ou « chirp » figure(II .4).

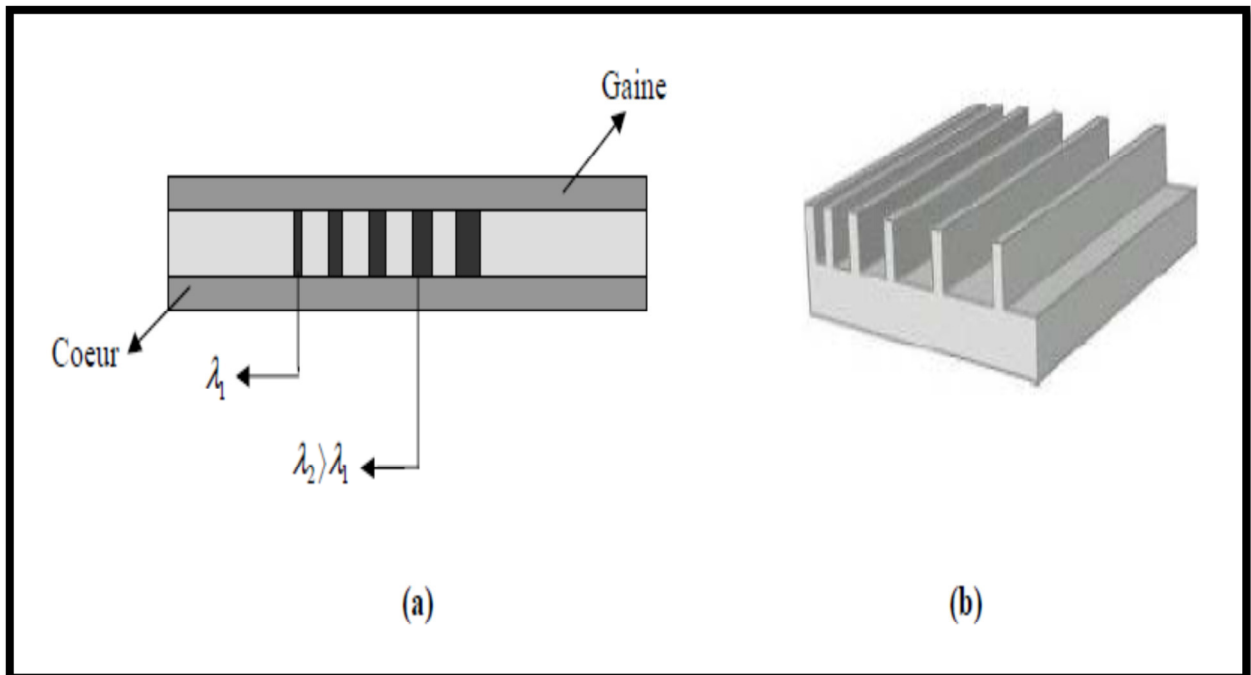


Figure II.5: Réseau de Bragg « chirped »

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

Dans les réseaux chirpés la période augmente progressivement d'un pas à l'autre les grandes longueurs d'onde sont réfléchies en début de réseau et les plus courtes en fin de réseau ; ainsi la dispersion peut être compensée et le signal d'origine rétabli. Figure(II.4)[17]

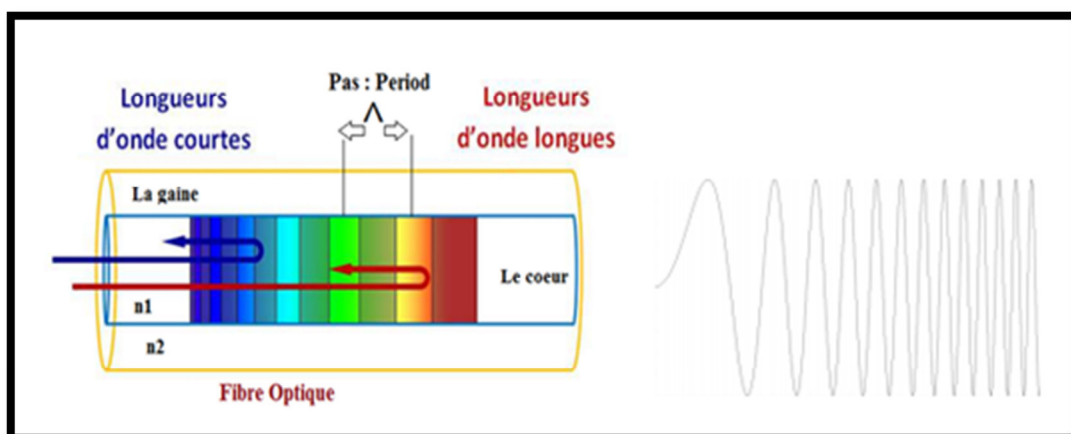


Figure II.6: Structure de la FBG à pas variable (chirped) ainsi que le profil de l'indice de réfraction.

Le pas du réseau est donné par :

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

$$\Lambda(z) = \Lambda_{\min} + \Upsilon z, \quad (\text{II.3})$$

Où :

Λ_{\min} : période initiale et Υ : chirped paramètre.

• Chirpe

Un réseau de Bragg « chirpé » est un réseau dont la période varie en fonction de la position dans le réseau, permettant d'obtenir une largeur de bande beaucoup plus élevée et des propriétés de dispersion sur mesure. Un paramètre de chirpe peut être défini tel que :

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = 2n_{\text{eff}}(\Lambda_{\text{long}} - \Lambda_{\text{court}}) \quad (\text{II.5})$$

Et le délai peut être approximé comme étant :

$$\tau(\lambda) = \frac{(\lambda_{\text{Bragg}} - \lambda) 2L}{\Delta\lambda_{\text{chirp}} v_g} \quad (\text{II.6})$$

Où v_g est la vitesse de groupe de la lumière. La figure 3 montre un exemple de spectre de réflexion et de dispersion d'un réseau de Bragg chirpé. [18]

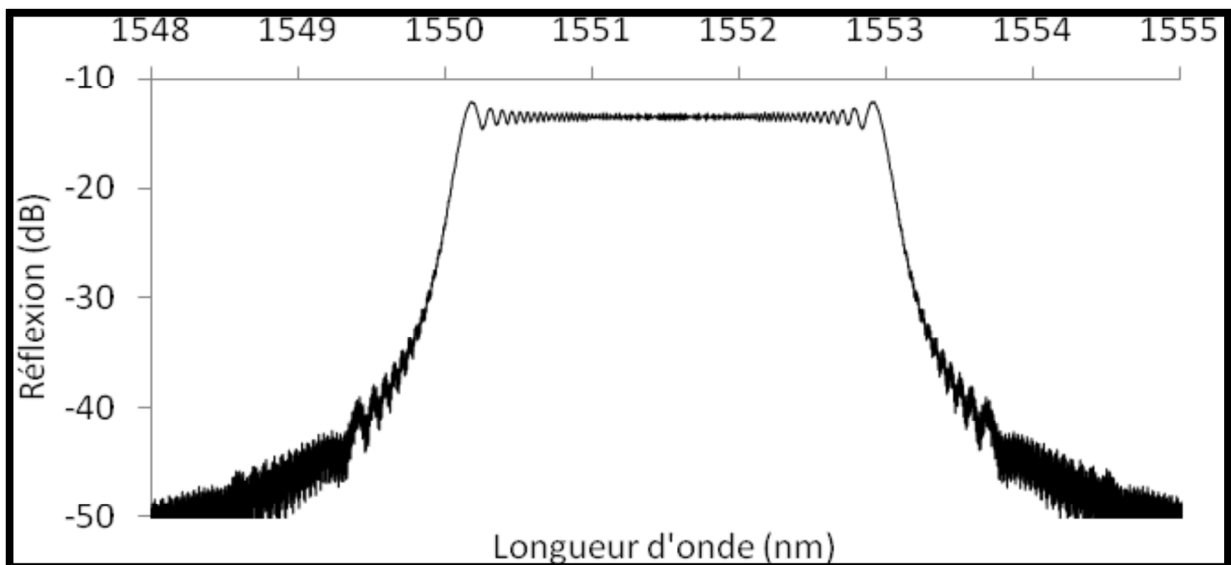


Figure II.7. : Exemple d'un spectre de réflexion et de dispersion d'un réseau de Bragg chirpé de 100 mm calculée à l'aide du logiciel MATLAB

II.5 Fabrication du FBG

II.5.1 Méthode holographique

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

Cette technique consiste à exposer le RDB en créant un patron d'interférence avec deux faisceaux laser UV ($\lambda=248 \text{ nm}$) sur la fibre optique (Figure II.5). L'angle d'incidence des deux faisceaux détermine la période du RDB exposé, ce qui rend cette technique relativement flexible. Cette méthode présente toutefois des difficultés techniques significatives. En effet, plus les réseaux sont longs (plus de 5 cm), plus les miroirs doivent être grands. Or, ces miroirs doivent être impérativement uniformes afin de conserver la cohérence du faisceau laser. Ce type de dispositif est également sensible aux vibrations, ce qui rend difficile la reproduction systématique d'un même RDB sur différentes fibres optiques. Cette méthode présente toutefois des difficultés techniques significatives. En effet, plus les réseaux sont longs (plus de 5 cm), plus les miroirs doivent être grands. Or, ces miroirs doivent être impérativement uniformes afin de conserver la cohérence du faisceau laser. Ce type de dispositif est également sensible aux vibrations, ce qui rend difficile la reproduction systématique d'un même RDB sur différentes fibres optiques. De plus, même s'il est possible de choisir la période du réseau, ce système d'exposition reste le plus souvent limité à des réseaux uniformes. Des variantes de ce système ont été développées afin d'exposer des RDB non-uniformes plus longs et avec des périodes non-uniformes.[19]

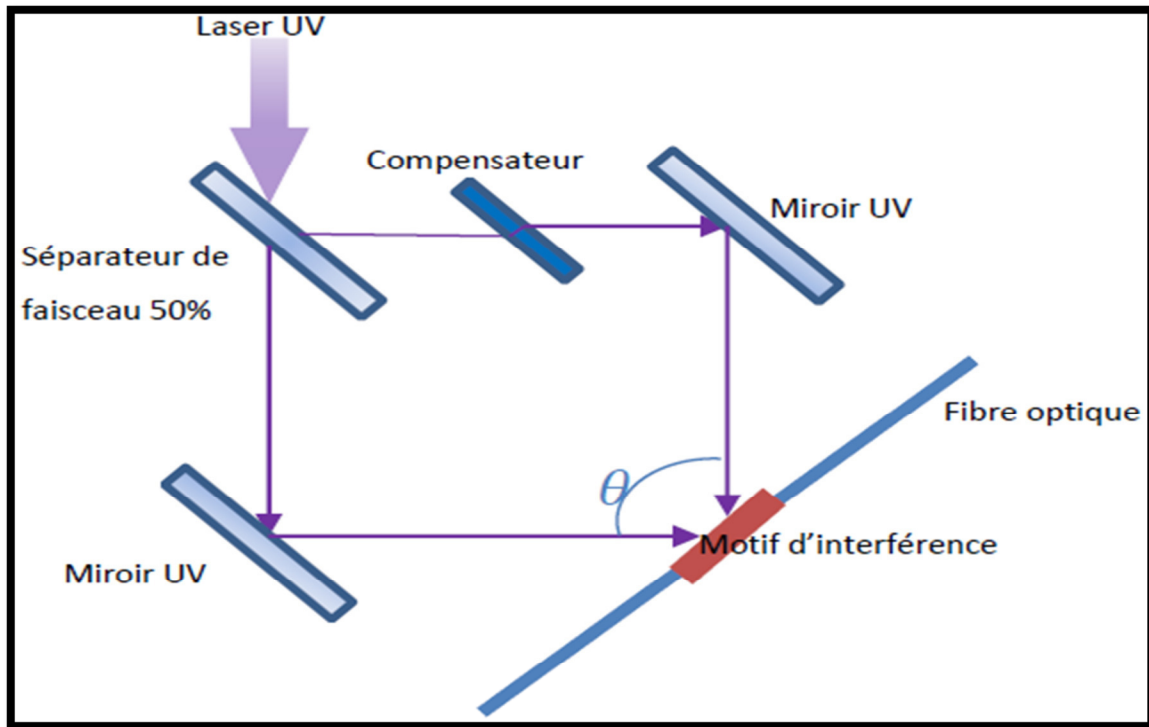


Figure II .8 :Principe d'exposition de RDB par méthode holographique

II.6. Théorie électromagnétique

La théorie électromagnétique est nécessaire pour décrire les effets de propagation. L'ensemble des informations importantes concernant la propagation de la lumière dans la matière est obtenue par la résolution des quatre équations de Maxwell qui régissent la totalité des phénomènes électromagnétiques, complétées par les équations constitutives du matériau considéré

II.6.1. Les équations de MAXWELL

Les équations de Maxwell forment un système d'équations dont les champs électrique E et magnétique B sont les solutions. Les charges et courants qui sont à l'origine de ces champs constituent les données de ce système d'équations

.Les équations de MAXWELL s'expriment dans le système international d'unités par :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.7})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (\text{II.8})$$

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

(II.10)

Où $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ est la permittivité du milieu

ε_0 est la permittivité du vide

ε_r est la permittivité relative du milieu de propagation

μ_0 est la perméabilité du vide

\vec{B} est l'induction magnétique

\vec{E} est le champ électrique

Ces équations constituent à leur tour l'équation de conservation de la charge, en prenant la divergence des deux membres de l'équation (II.10).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.11})$$

On a également les relations de l'induction électrique

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (\text{II.12})$$

et du champ magnétique
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \quad (\text{II.13})$$

où μ_r est la perméabilité relative

II.6.2. Modes de propagation

On appelle mode d'un guide la solution des équations de MAXWELL correspondant à une onde qui se propage dans un guide sans excitation extérieure.

Les conditions d'existence du mode se traduisent par une certaine structure spatiale des champs électrique et magnétique. Etant donnée la géométrie du système considéré (guide d'onde infini dans les directions Y et Z), la seule dépendance spatiale de l'amplitude des champs est selon l'axe des X, on peut avoir propagation de l'onde dans le plan OYZ .[20]

Pour simplifier, on suppose que la propagation se fait uniquement suivant la direction OZ. On suppose également que les matériaux constituant le guide sont homogènes et isotropes caractérisés par une permittivité diélectrique scalaire ε_i dans le milieu i .

On appelle β la constante de propagation selon la direction OZ.

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

Les champs électrique et magnétique adoptent la forme :

$$\vec{E}(x, z, t) = \vec{E}(x)e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (\text{II.14})$$

$$\vec{H}(x, z, t) = \vec{H}(x)e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (\text{II.15})$$

Les champs doivent satisfaire les équations de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E}(x, z, t) = \frac{-\partial \vec{\beta}(x, z, t)}{\partial t} = -i\omega\mu_0 \vec{H}(x, z, t) \quad (\text{II.16})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H}(x, z, t) = \frac{\partial \vec{D}(x, z, t)}{\partial t} = i\omega\varepsilon_i \vec{E}(x, z, t) \quad (\text{II.17})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(x, z, t) = 0 \quad (\text{II.18})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(x, z, t) = 0 \quad (\text{II.19})$$

En remplaçant $\vec{E}(x, z, t)$ et $\vec{H}(x, z, t)$ par leurs expressions dans le système d'équations précédant et en utilisant $\frac{\partial}{\partial y} = 0$ (on a tenu compte du fait que le système possède une symétrie de translation suivant y) $\frac{\partial}{\partial z} = -i\beta$, on obtient un système de six équations :

$$\beta E_y = -\omega\mu_0 H_x \quad (\text{II.20})$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -i\omega\mu_0 H_z \quad (\text{II.21})$$

$$-i\beta H_x + \frac{\partial H_z}{\partial x} = i\omega\varepsilon_i E_y \quad (\text{II.22})$$

$$\beta H_y = \omega\varepsilon_i E_x \quad (\text{II.23})$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = i\omega\varepsilon_i E_z \quad (\text{II.24})$$

$$i\beta E_x + \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega\mu_0 H_y \quad (\text{II.25})$$

On voit que les composantes (E_x, E_z, H_y) et (E_y, H_x, H_z) sont indépendantes. La recherche de solutions est simplifiée si on sépare celles-ci en deux types :

TE (transverse électrique) pour lesquelles $H_y = 0$ (ainsi que $E_z(x)$ et $E_x(x)$) et

TM (transverse magnétique) pour lesquelles $E_y = 0$ (ainsi que $H_z(x)$ et $H_x(x)$).

On se trouve dans chaque cas avec des équations mettant en jeu la composante du champ selon y ($E_y(x)$ en mode TE et $H_y(x)$ en mode TM). On en déduit les équations de propagation suivantes :

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

$$\frac{d^2 E_y(x)}{dx^2} + (\omega^2 \varepsilon_i \mu_0 - \beta^2) E_y(x) = 0 \quad (\text{II.26})$$

$$\frac{d^2 H_y(x)}{dx^2} + (\omega^2 \varepsilon_i \mu_0 - \beta^2) H_y(x) = 0 \quad (\text{II.27})$$

Ces deux dernières équations peuvent se résumer en une seule :

$$\frac{d^2 \Phi(x)}{dx^2} + (k_0^2 n_i^2 - \beta^2) \Phi(x) = 0 \quad (\text{II.28})$$

Où $\Phi(x)$ représente $E_y(x)$ en mode TE et $H_y(x)$ en mode TM

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \sqrt{\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0} = \omega/c \text{ est le module du vecteur d'onde dans le vide.}$$

c : représente la vitesse de la lumière dans le vide

$$\text{et } n_i = \sqrt{\varepsilon_{ri}} \quad i=1,2,3 \quad n_i : \text{ indice relatif à chaque couche}$$

Toutes les solutions que l'on trouve ne correspondent pas forcément à des modes guidés.

La solution générale de l'équation (I.20) est de la forme :

- dans le superstrat d'indice n_1

$$\Phi_1(x) = A_1 \exp(ix\sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}) + A_2 \exp(-ix\sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}) \quad (\text{II.29})$$

- dans la couche guidante d'indice n_2

$$\Phi_2(x) = B_1 \exp(ix\sqrt{k_0^2 n_2^2 - \beta^2}) + B_2 \exp(-ix\sqrt{k_0^2 n_2^2 - \beta^2}) \quad (\text{II.30})$$

- dans le substrat d'indice n_3

$$\Phi_3(x) = C_1 \exp(ix\sqrt{k_0^2 n_3^2 - \beta^2}) + C_2 \exp(-ix\sqrt{k_0^2 n_3^2 - \beta^2}) \quad (\text{II.31})$$

Les constantes de ces équations sont obtenues en considérant les conditions de continuité aux frontières (en $x=0$ et $x=e_G$), donc de la continuité des composantes tangentielles de E et H normales des inductions B et D .

II.6.2.1. Différents types de modes

Selon la valeur réel de β on peut distinguer plusieurs solutions :

- $\beta^2 > 0$: β est réel, on a donc deux cas :

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

1^{er} cas : $\beta > k_0 n_2$

Pour la polarisation TE, il y a une continuité du champ électrique et de sa dérivée aux limites des trois milieux. L'onde ne peut se propager dans la couche guidante : on a affaire à des modes de surface.

2^{ème} cas : $\beta < k_0 n_2$ (on suppose $n_3 > n_1$)

Trois types de modes peuvent être définis dans cette situation :

- $k_0 n_2 > \beta > k_0 n_3$; l'amplitude du champ décroît exponentiellement dans les milieux 1 et 3, alors qu'elle est constante dans la couche guidante. Le champ est donc confiné dans le guide on parle alors de **modes guidés** et c'est la solution recherchée dans notre cas.
- $k_0 n_1 > \beta > k_0 n_3$; le champ est exponentiel décroissant dans le matériau de couverture à partir de l'interface avec la couche guidante alors qu'il est constant dans la couche guidante et dans le substrat, on parle ici de **modes du substrat**.
- $\beta < k_0 n_1$; le champ est constant dans tous les milieux, il n'y a pas de confinement de l'onde mais rayonnement dans le substrat et le matériau de couverture, on parle alors de **modes rayonnés**.

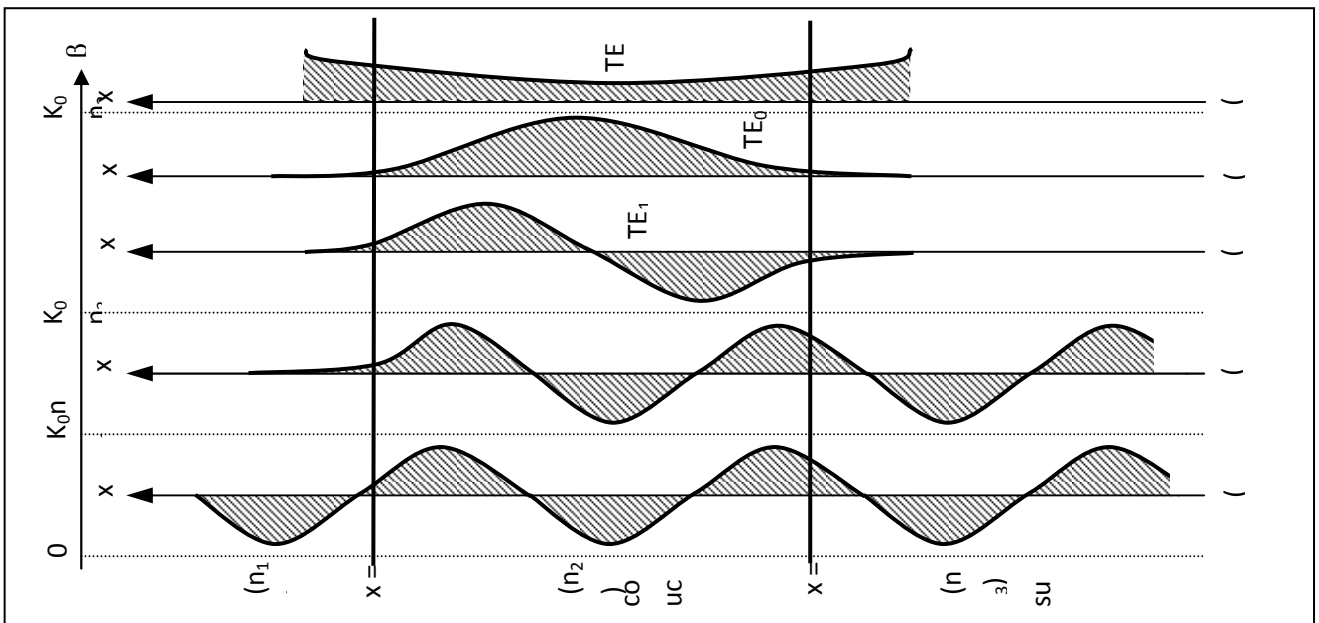


Figure II.9 : Différentes distributions du champ correspondant aux différentes valeurs de β

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

II.6.2.2. Notion de mode

On appelle mode d'un guide, la solution des équations de Maxwell qui correspond à une onde qui se propage dans un guide de longueur infinie sans excitation extérieure.

Nous rappelons ci-dessous l'origine et les principales propriétés des modes des guides d'ondes diélectriques [21]

Soit un ensemble de milieux diélectriques et non magnétiques, non absorbants, linéaires et isotropes : une couche d'indice n_2 déposée sur un substrat semi infini d'indice n_1 et couverte d'un superstrat semi infini d'indice n_3 vérifiant les relations:

$$n_2 > n_1 > n_3$$

II.6.2.3. Notion d'indice effectif

L'indice effectif n_{eff} représente la valeur de l'indice de réfraction d'un matériau uniforme pour que les ondes s'y propagent avec la même vitesse de phase que dans le guide. C'est en fait un résumé du guide qui tient compte des indices des différents matériaux et de la forme du guide pour chaque longueur d'onde et chaque mode de propagation [22].

L'indice de groupe n_g représente l'indice de propagation de la superposition d'ondes se propageant dans une impulsion lumineuse, non purement monochromatique, dont les longueurs d'onde sont situées autour d'une longueur d'onde centrale. Il est donné par :

$$n_g = n_{eff} - \lambda \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda} \quad (\text{II.32})$$

Où λ est la longueur d'onde à laquelle est étudié l'indice effectif n_{eff} .

II.7 Théorie des modes couplés

On s'intéresse ici à la réponse spectrale du réseau de Bragg. Les caractéristiques du spectre de la fibre à réseau de Bragg peuvent être comprises et modélisées par plusieurs s'approches. La théorie utilisée le plus couramment est celle des modes couplés. La théorie des modes couplés est un outil approprié pour décrire la propagation des ondes optiques dans un guide d'onde avec un indice variant lentement le long de la longueur du guide d'onde. La fibre à réseau de Bragg a ce type de structure. L'idée basique de la théorie des modes couplés est que le champ électrique du guide d'ondes avec une perturbation peut être représenté par une combinaison linéaire des modes de la distribution du champ sans perturbations.

Le champ modal de la fibre peut être représenté par :

$$\mathbf{E}_{\pm j}(x, y, z) = \mathbf{e}_{\pm j}(x, y) e^{\pm i\beta_j z} \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{II.33})$$

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

Où $E_{\pm}(x, y, z, t)$ est l'amplitude du champ électrique transversal du $j^{\text{ième}}$ mode de propagation, et \pm représente la direction de propagation. β_j est la constante de propagation du $j^{\text{ième}}$ mode.

Généralement, chaque mode a une valeur unique de β_j . Dans cette thèse, on suppose implicitement une dépendance temporelle $e^{-i\omega t}$ pour le champ où ω est la pulsation. La propagation de la lumière le long des guides d'onde optiques dans la fibre peut être décrite par les équations de Maxwell. Les modes de propagation sont donc les solutions des équations de Maxwell. En ce qui concerne la théorie des modes couplés, le champ électrique transversal à la position Z dans la fibre à réseau de Bragg peut se décrire par une superposition linéaire des modes propres guidés de la fibre sans réseau. Ce qui peut s'écrire comme : [23]

$$E_t(x, y, z, t) = \sum_i [E_{+j}(x, y, z, t) + E_{-j}(x, y, z, t)] \quad (\text{II.34})$$

II.7. Application d'un RDB

Les réseaux de Bragg ont démontré leur utilité dans nombreuses applications :

➤ **Dans le domaine des Télécommunication [24]**

Les RDB sur fibre optique ont désormais un rôle essentiel dans les télécommunications.

- Filtres réglables à bande étroite et à large bande.
- Convertisseurs de mode à fibre optique.
- Filtre de longueur d'onde sélectifs, multiplexeurs démultiplexeurs (WDM)
- Compensateurs de la dispersion chromatique dans les réseaux de télécommunication à grande distance
- Analyseurs de spectre

II.8 Compensation de la dispersion chromatique

Une autre application des RDB indispensable au bon transport de l'information est la compensation de la dispersion chromatique. En effet, une dispersion chromatique est observée lors de la propagation de la lumière sur de longues distances, au sens large c'est un étalement ou un élargissement des pulses lumineux lors de leur propagation le long d'une fibre.

Ce qui limite le débit des données dans la fibre optique. L'information se propage sous forme d'un pulse gaussien qui s'étend sur plusieurs longueurs d'ondes. Ces dernières ne se propagent pas à la même vitesse dans la fibre optique, le signal va se déformer et une superposition des signaux peut ainsi être observée s'ils sont trop proches spatialement.

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

Typiquement, dans une fibre optique monomode utilisée dans les télécommunications, la dispersion chromatique est de $17 \text{ ps}/(\text{nm}/\text{km})$ pour des longueurs d'onde proches de 1550 nm. Cependant, il est possible de compenser cette dispersion avec à un RDB avec une période augmentant linéairement le long du réseau.[25]

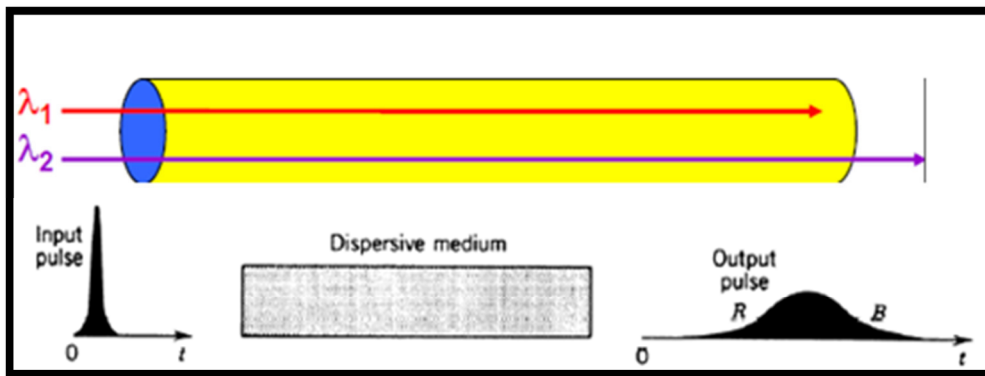


Figure II.10 :La dispersion chromatique dans une fibre

-La dispersion est due à la largeur spectrale non nulle de la source (c.a.d composée de plusieurs longueurs d'ondes), chaque longueur d'onde se propageant à une vitesse spécifique.

$$V=c/n(\lambda)$$

-La dispersion est due à un "délai différentiel" •Vu que le signal est composé d'au moins deux composantes :

- Chaque composante se propage à une vitesse différente
- Différentes composantes arrivent à différents instants
- La différence entre les composantes à l'arrivée sur le récepteur est le délai différentiel
- La dispersion est un facteur limitant le débit dans les liens de transmission .Elle limite la longueur du lien pour les hauts débits.

II.8.1 Origine de la dispersion chromatique

- Deux effets contribuent à la Dispersion Chromatique totale:
 - La dispersion due au matériau(le verre)

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

-La dispersion due au guide d'onde (la fibre)

-La dispersion due au matériau dépend du type de verre (impuretés, etc.)

-La dispersion dépend du profil d'indice de la fibre. Il est possible de paramétrer la fabrication pour obtenir un zéro de dispersion ou une pente particulière. On peut donc fabriquer des fibres présentant un profil d'indice particulier.

La dispersion limite la capacité d'un réseau à transmettre des hauts débits sous la distance à la quelle des débits peuvent être transmis.

La dispersion chromatique résulte de la différence de vitesse de groupe des différentes composantes spectrales du signal à transmettre:

$$n = f(\lambda) \quad (\text{II.35})$$

- **Temps de groupe :**

Il sert à déterminer l'étalement des impulsions, il est obtenu à partir de la relation suivante :

$$t_g = \frac{L}{v_g} \quad (\text{II.36})$$

L : longueur parcourue par l'onde

V_g : Vitesse de groupe

- **Vitesse de groupe :**

Chaque composante spectrale du signal se propage à une certaine vitesse de groupe :

$$V_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (\text{II.37})$$

En introduisant la longueur d'onde dans le vide, il est possible d'écrire

$$V_g = \frac{d\omega}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\beta} \quad (\text{II.38})$$

Le calcul des différentes dérivées donne :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n(\lambda) \frac{d\beta}{d\lambda} = -\frac{1}{\lambda^2} 2\pi n + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{dn}{d\lambda}$$

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} \frac{d\lambda}{d\omega} = -\frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega \quad (\text{II.39})$$

On peut remplacer l'équation (II.38) par:

$$V_g = \frac{c}{n_1(\lambda) - \lambda \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \right)} \quad (\text{II.40})$$

- **Indice de groupe du matériau**

Il est défini à partir de la vitesse de groupe et est donnée par :

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

$$N1(\lambda) = n1(\lambda) - \lambda \frac{dn1}{d\lambda} \quad (\text{II.41})$$

- **Etalement des impulsions**

Considérons une source de largeur spectral $\delta\lambda$, l'élargissement moyen δ_{ch} de l'impulsion du à la dispersion chromatique est donné par :

$$\delta_{ch} = \delta\lambda \cdot \frac{dtg}{d\lambda} \quad (\text{II.42})$$

- **Calcul de la variation du temps de groupe en fonction de la longueur d'onde.**

Sachant que :

$$tg = \frac{L}{Vg} = \frac{L}{c} N1 = \frac{L}{c} \left(n1(\lambda) - \lambda \frac{dn1}{d\lambda} \right)$$

On écrit alors :

$$\frac{dtg}{d\lambda} = -\frac{L}{c} \left(\lambda \frac{d^2n1}{d\lambda^2} \right) \quad (\text{II.43})$$

On calcule la variation du temps de groupe en fonctionne de la longueur d'onde :

$$tg = \frac{L}{Vg} = \frac{L}{c} N1 = \frac{L}{c} \left(n1(\lambda) - \lambda \frac{dn1}{d\lambda} \right)$$

On écrit alors :

$$\frac{dtg}{d\lambda} = -\frac{L}{c} \left(\lambda \frac{d^2n1}{d\lambda^2} \right) \quad (\text{II.44})$$

- **Le coefficient de dispersion chromatique**

$$D_{ch} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n1}{d\lambda^2} \quad \text{Ps/nm.km} \quad (\text{II.45})$$

L'expression de la dispersion chromatique peut alors être exprimé par:

$$\delta_{ch} = \delta\lambda \cdot D_{ch} \cdot L \quad (\text{II.46})$$

La figure (II.14) représente la valeur de la dispersion en fonction de la longueur d'onde, pour une fibre optique monomode.

On constate que la dispersion est nulle à $1.3\mu\text{m}$, cependant à $1.55\mu\text{m}$ elle vaut 17 ps/nm.Km .

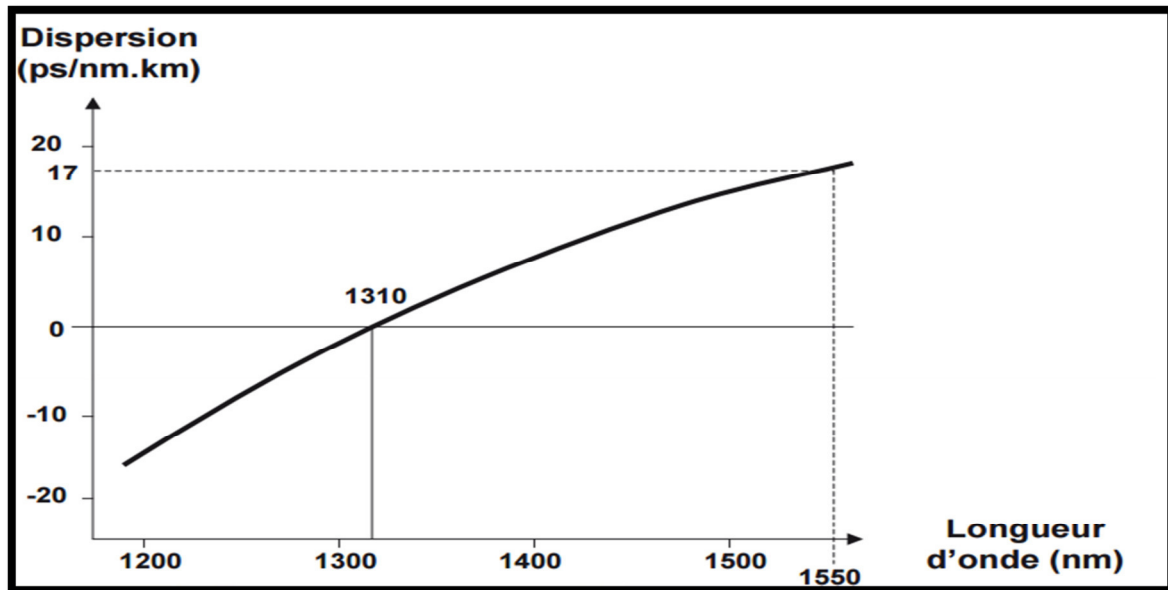


Figure II.11 : Dispersion chromatique de la fibre standard

II.8.2 Présentation du module Grating Mod [27]

Le RSoft CAD est un programme de base pour la simulation des dispositifs optiques (guides d'ondes et fibres). Il agit en tant que programme de gestion et intègre les modules : BeamPROB, FullWAVE, BandSOLVE, DiffractMOD et GratingMOD.

GratingMOD, est un outil de conception générale de l'analyse et de la synthèse compliquée des différents mécanismes de couplage. Il est basé sur la théorie de couplage de mode.

Le GratingMOD peut traiter différentes structures de réseaux, à la fois pour les fibres optiques et les guides d'ondes intégrés.

Grace à Grating mode on peut :

- Déterminer le spectre transmis et réfléchi pour chaque mode.
- Calculer la phase, la dispersion et la temporisation.
- Avoir l'analyse spectrale et la condition de Bragg.

• Paramétrage et simulation

Pour ouvrir et concevoir la structure qu'on veut simuler, on sélectionne Utility / GratingMOD du menu principal de la fenêtre CAD. La figure (II.15) montre la fenêtre associée à cet utilitaire. Dans cette fenêtre, les caractéristiques principales de la structure peuvent être définies. Plus tard, ces différentes caractéristiques peuvent être modifiées via la table des symboles.

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

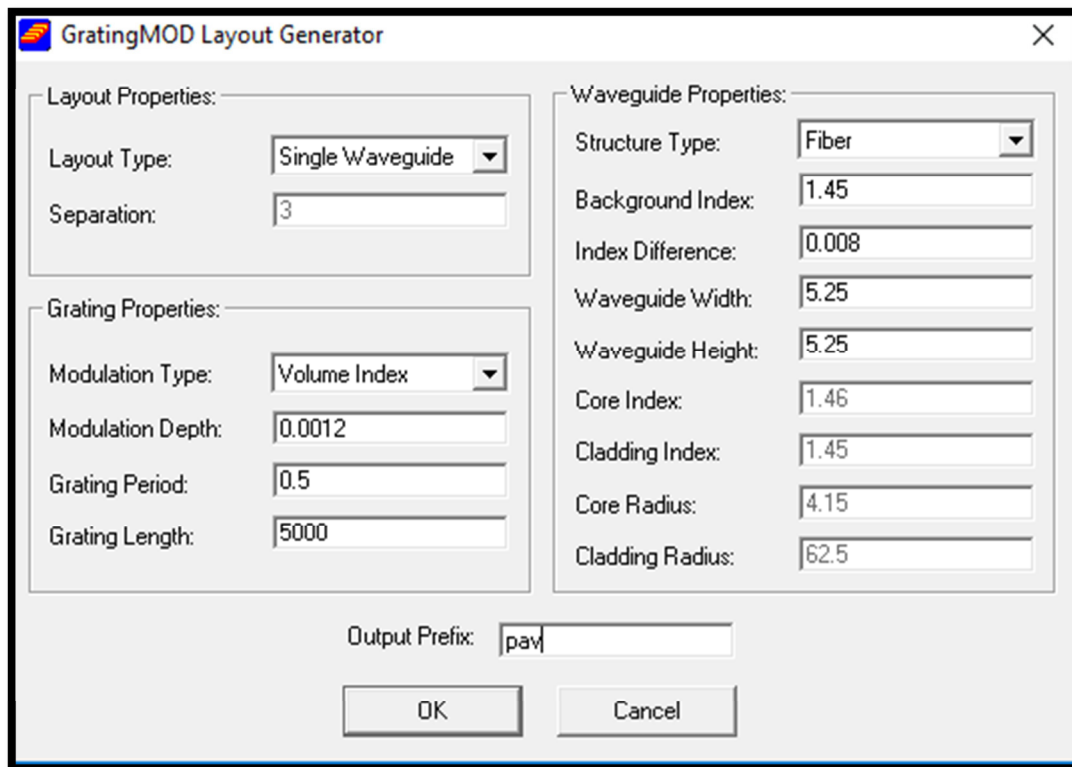


Figure II.12: Boîte de dialogue 'GratingMODGenerator'.

Layout Type : C'est le type (dispositif) de la structure désirée.

Separation: Cela définit la séparation entre deux ou plusieurs structures.

Modulation Type : Ceci définit le type de modulation qu'on va utiliser dans notre structure.

Modulation Depth : C'est la profondeur de modulation qu'on va utiliser dans notre structure (Δn).

Grating Period: Indique la période du réseau.

Grating Length: Indique la longueur du réseau.

Structure Type: Indique le type de structure qu'on va utiliser dans notre simulation.

Background index: C'est l'indice du substrat ou l'indice de la gaine.

Index Difference: C'est la différence d'indice entre le cœur et la gaine.

Waveguide Width: Indique la largeur du guide d'onde (fibre optique).

Waveguide Height: Indique la hauteur du guide d'onde (fibre optique)

Core Index : Ceci représente l'indice du cœur de la fibre.

Cladding Index : Cela représente l'indice de la gaine.

Core radius: Définit le rayon du milieu où la lumière se propage.

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

Une fois qu'un réseau est créé, une série de symboles est définie dans la table des symboles qui peut être utilisée pour modifier les valeurs par défaut. Une liste de ceux-ci est illustrée ci-dessous :

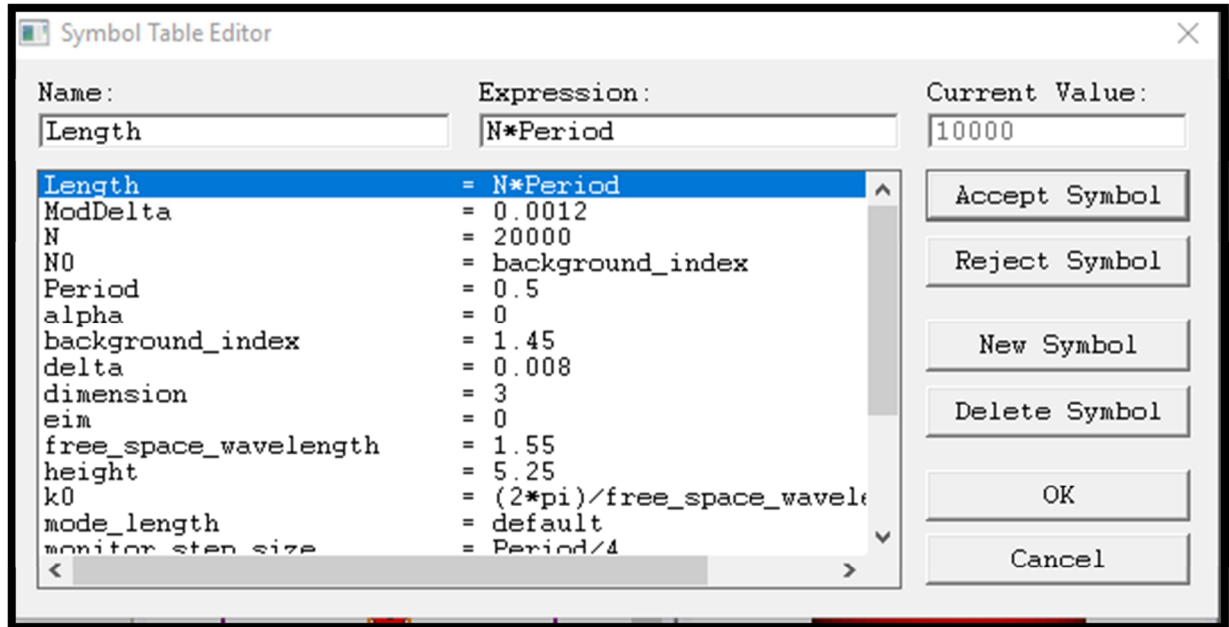


Tableau (II.1) : la table des symboles

Pour définir la variation du pas de réseau, on clique sur l'icône Taper : une boîte de dialogue s'affichera, figure (II.13)

Dans la case « Apodization type » on choisit donc « Cosine » et on clique sur « Chirp coefficient » pour donner une valeur de Chirp.

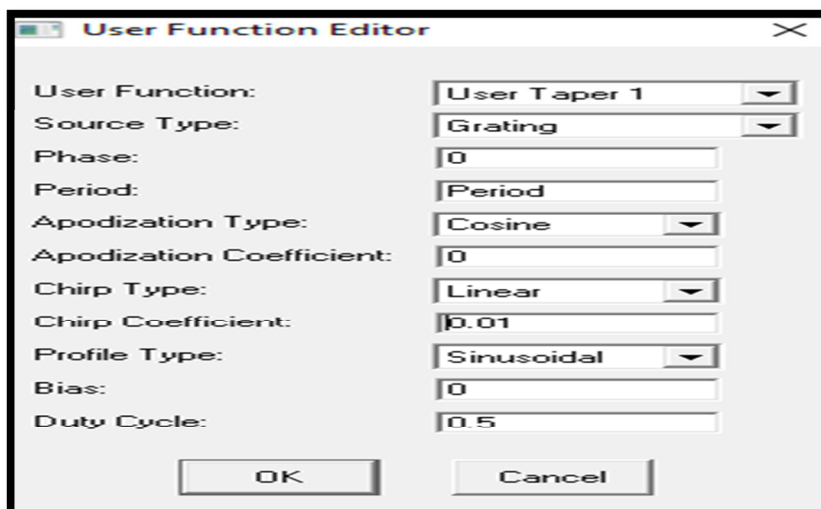


Figure II.13 : Éditeur de fonction pour Grating Taper

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

Le chirp varie avec la période.

• GratingMOD Simulation

La fenêtre d'analyse permet à l'utilisateur de définir les paramètres de simulation qui concernent la simulation du réseau de Bragg. Donc le réseau est d'abord défini par l'utilisateur, et le Grating mode calculera ensuite la réponse spectrale et de dispersion de la structure conçue..

La figure (II.15) montre la boîte de dialogue qui correspond.

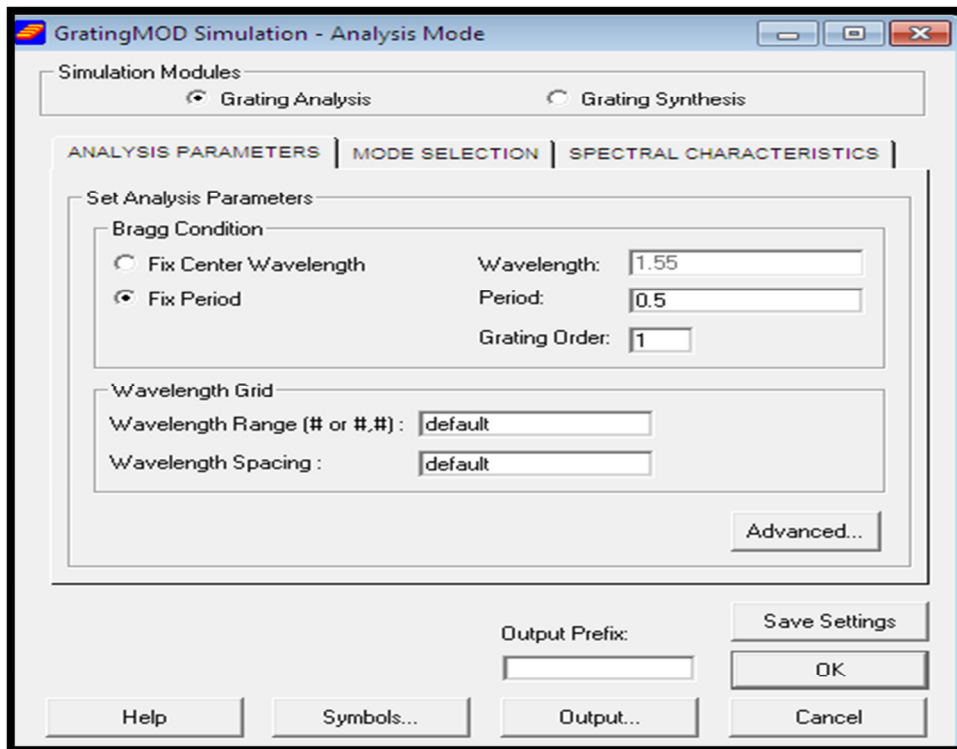


Figure II.14: Boîte de dialogue de GratingMod simulation

La simulation du réseau est divisée en deux étapes, qui s'expriment par deux onglets de la boîte de dialogue 'Grating MOD' : **Grating analysis** et **Grating synthèse**.

▪ Grating analysis :

Cette option permet de calculer la réponse spectrale du réseau conçu. La réflectivité est calculée soit en fixant le pas ou bien la longueur d'onde désirée.

Grating Mod génère des fichiers d'enregistrement des données et un fichier de traçage grâce à l'outil 'WinPlot'.

Le format des données de sortie est contrôlé en cliquant sur le bouton Output, comme indiqué

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

sur la figure suivante (II.17) :

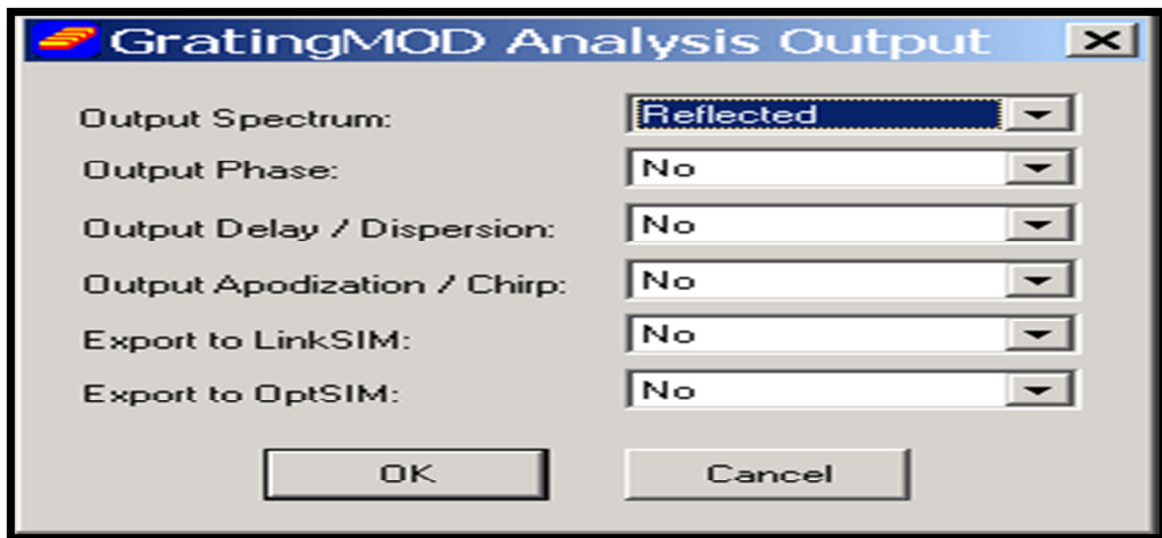


Figure II.15 : Fenêtre des Options de spectre de sortie

▪ Grating Synthesis

Des simulations de synthèse sont effectuées à partir de l'onglet « gratingsynthesis », La figure () montre la boîte de dialogue correspondante :

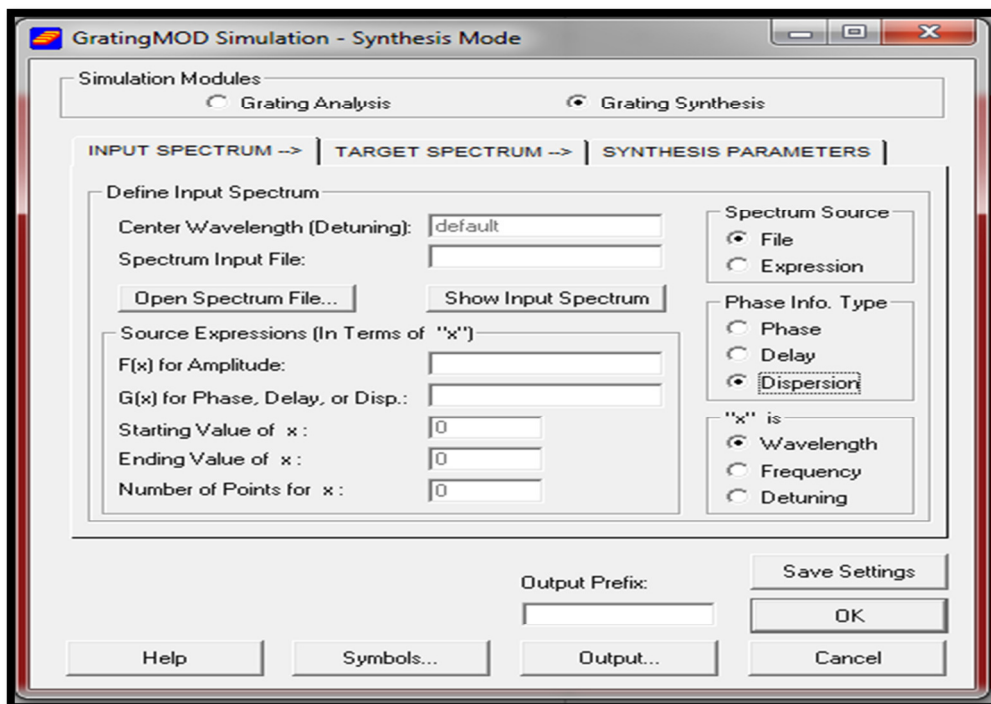


Figure II.16 : La fenêtre de simulation GratingMOD avec le mode Grating Synthesis.

Chapitre 02 Généralités sur les réseaux de Bragg fibré et présentation de l'outil de simulation

➤ Output Spectrum

Les données calculées et enregistrées dans un fichier de sortie sont en unités d'amplitude.

➤ Output Phase

Choisissez si la phase est affichée dans le spectre de sortie.

➤ Output Delay/Dispersion

Choisissez si le délai et la dispersion sont affichés dans la sortie. Le délai et la dispersion seront calculés à partir de la phase du spectre et seront affichés dans la même fenêtre. Le retard sera tracé par rapport à l'axe gauche, alors que la dispersion sera tracée par rapport à l'axe alternatif droit.

➤ Output Apodization/Chirp

Choisissez si le profil de la perturbation du réseau s'affiche. L'apodisation sera normalisée de 0 à 1. Et le Chirp sera la période réelle qui varie selon la position du réseau.

II.9 Conclusion

Ce chapitre nous a mené à comprendre comment évolue la propagation d'ondes électromagnétiques à l'intérieur des guides d'ondes en utilisant la théorie de Maxwell.

On a présenté des généralités sur les réseaux de Bragg, leur principe de fonctionnement, ainsi que leurs différents types y compris la théorie des modes couplés, ainsi qu'à l'outil de simulation utilisé lors de cette étude (module Grating MOD du logiciel Rsoft).

Chapitre 03 Résultats et discussions

III.1 Introduction

Le réseau de Bragg à pas variable est une technique de compensation très intéressante à cause des nombreux avantages qu'il présente. L'application de ces réseaux comme compensateurs de la dispersion chromatique s'explique par le fait qu'ils présentent des caractéristiques très particulières.

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats obtenus des deux parties de la simulation qu'on a effectuée : la première concerne l'application de la FBG en tant qu'un filtre en longueur d'onde et la deuxième partie, concerne l'application de la FBG en tant qu'un élément compensateur de dispersion chromatique.

III.2 Simulations effectuées

On présente la réponse spectrale des deux structures (réseau à pas uniforme et à pas variable), ainsi nous étudions et discutons l'influence des différents paramètres géométrique sur la réponse spectrale.

III.2.1 (Simulation d'une FBG à pas uniforme pour application comme un filtre en longueur d'onde).

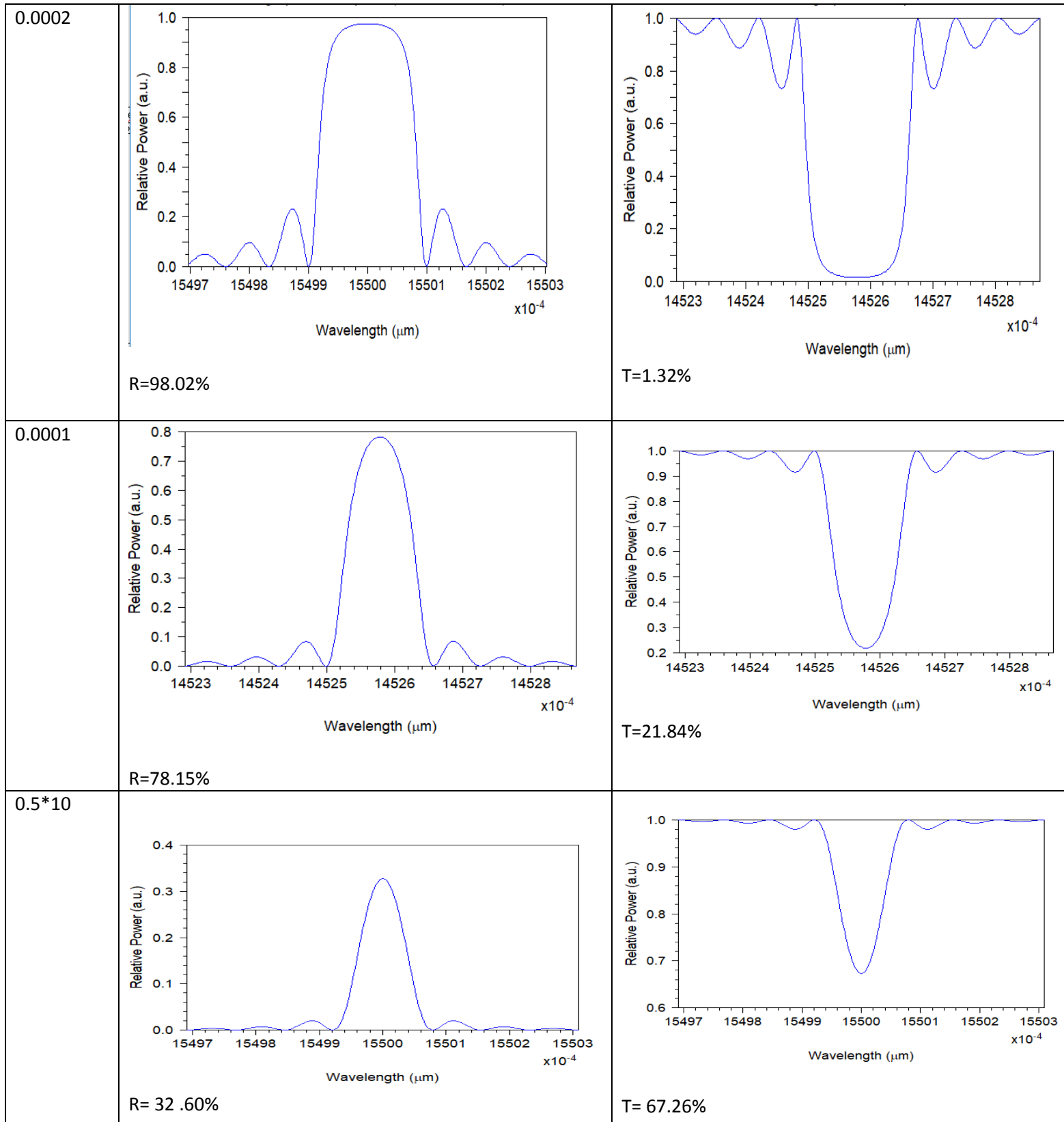
On choisit une « Fibre monomode de diamètre $D= 10\mu\text{m}$ avec une différence d'indice de $0.008, 0.5$ pour la période du réseau et $10000\mu\text{m}$ pour sa longueur.

III.2.1.1 Optimisation de l'amplitude de modulation d'indice ModDelta

En fixant la longueur du réseau L , et on faisant varier l'amplitude de modulation d'indice. Le spectre se modifie comme représenté dans la figure (III.1)

| | | |
|----------|-----------|--------------|
| ModDelta | Réflexion | Transmission |
|----------|-----------|--------------|

Chapitre 03 Résultats et discussions



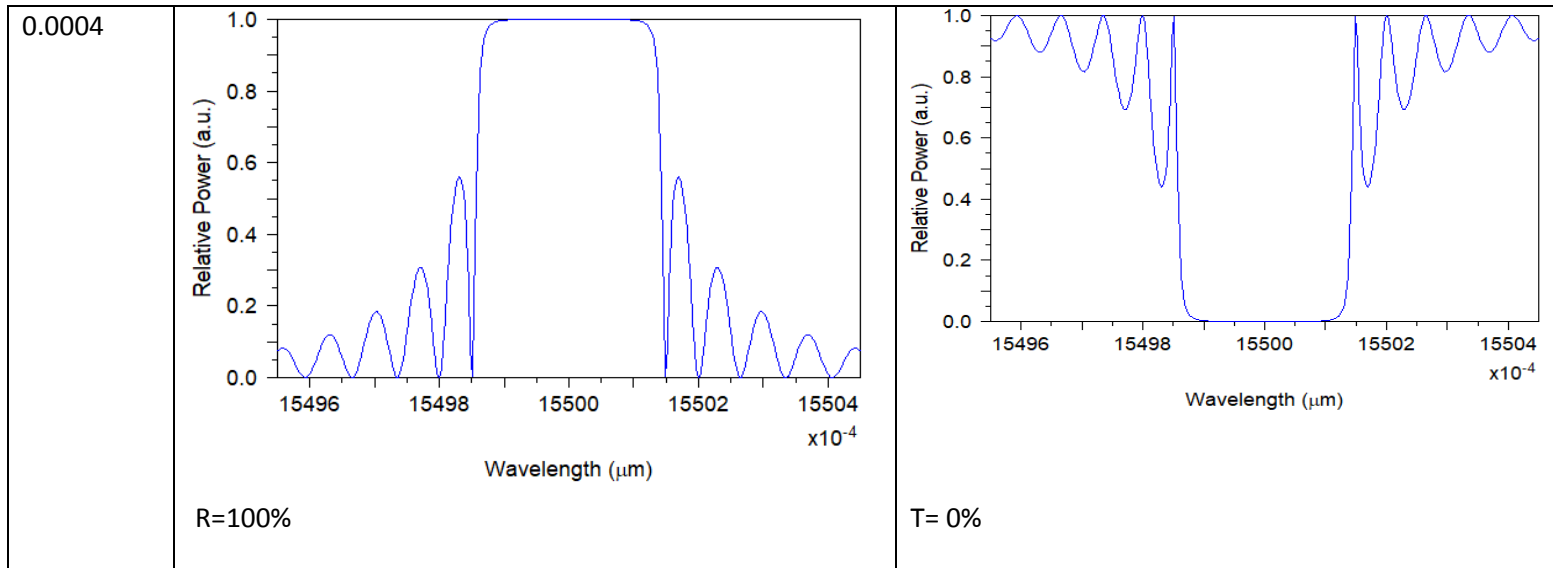


Figure III.1:La Réponse spectrale d'un réseau de Bragg du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde de la FBG

On remarque que pour une faible valeur de l'amplitude de modulation d'indice Δn_{mod} (de l'ordre de 10^{-5}) la réflectivité est faible, par contre lorsque l'amplitude de modulation d'indice est de l'ordre de 10^{-4} , la réflectivité croit, ce qui correspond à une réflexion de l'ordre de **100%** à la longueur d'onde de Bragg. Le réseau possède de lobes secondaires en réflexion. caractéristique d'une FBG à pas uniforme

On constate selon le résultat obtenu sur la réponse spectrale, que la longueur d'onde centrée autour de **1550nm** s'est fortement réfléchi, Ce résultat est conforme avec celui trouvé par [28], donc la FBG à pas constant peut être utilisée comme un filtre sélectif en longueur d'onde.

III.2.2 Simulation d'une FBG à pas variable pour application en tant qu'un compensateur de dispersion chromatique.

Il y a deux variables qui peuvent être changées pour obtenir un réseau chirpé à partir de la condition de Bragg: $\lambda B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$:

Une première qui consiste à changer la période de Bragg et l'autre dans le changement de l'indice de réfraction le long de la direction de propagation z de la fibre.

III.2.2.1 L'impact du coefficient chirp sur la réflectivité

Chapitre 03 Résultats et discussions

Comme on a vu en théorie (**chapitre II**), Le chirp varie avec la période le long de la propagation z .

On peut voir la structure de réseau à pas variable et l'allure de la variation du pas (période), avec coefficient chirpé, comme indiquée sur la figure (**III.2**) :

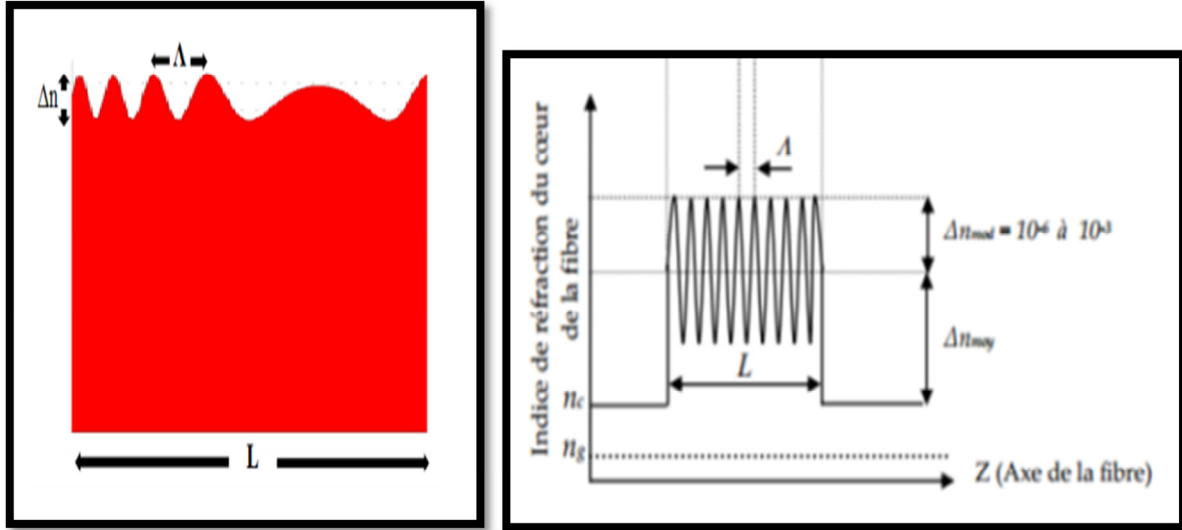
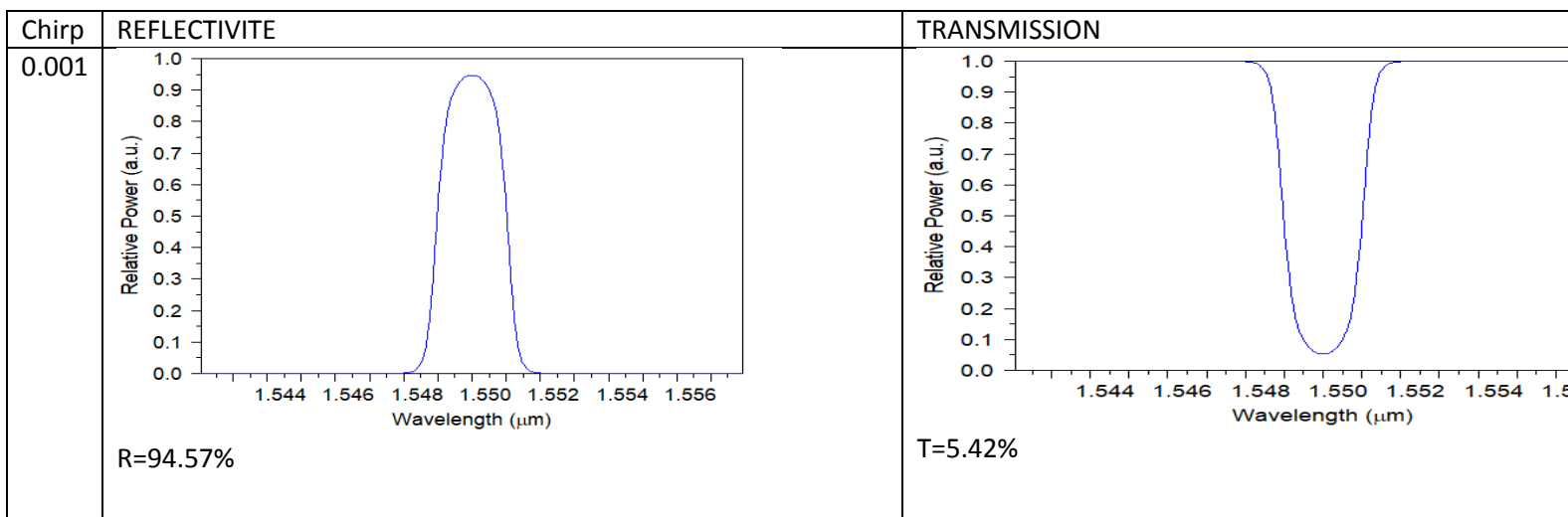


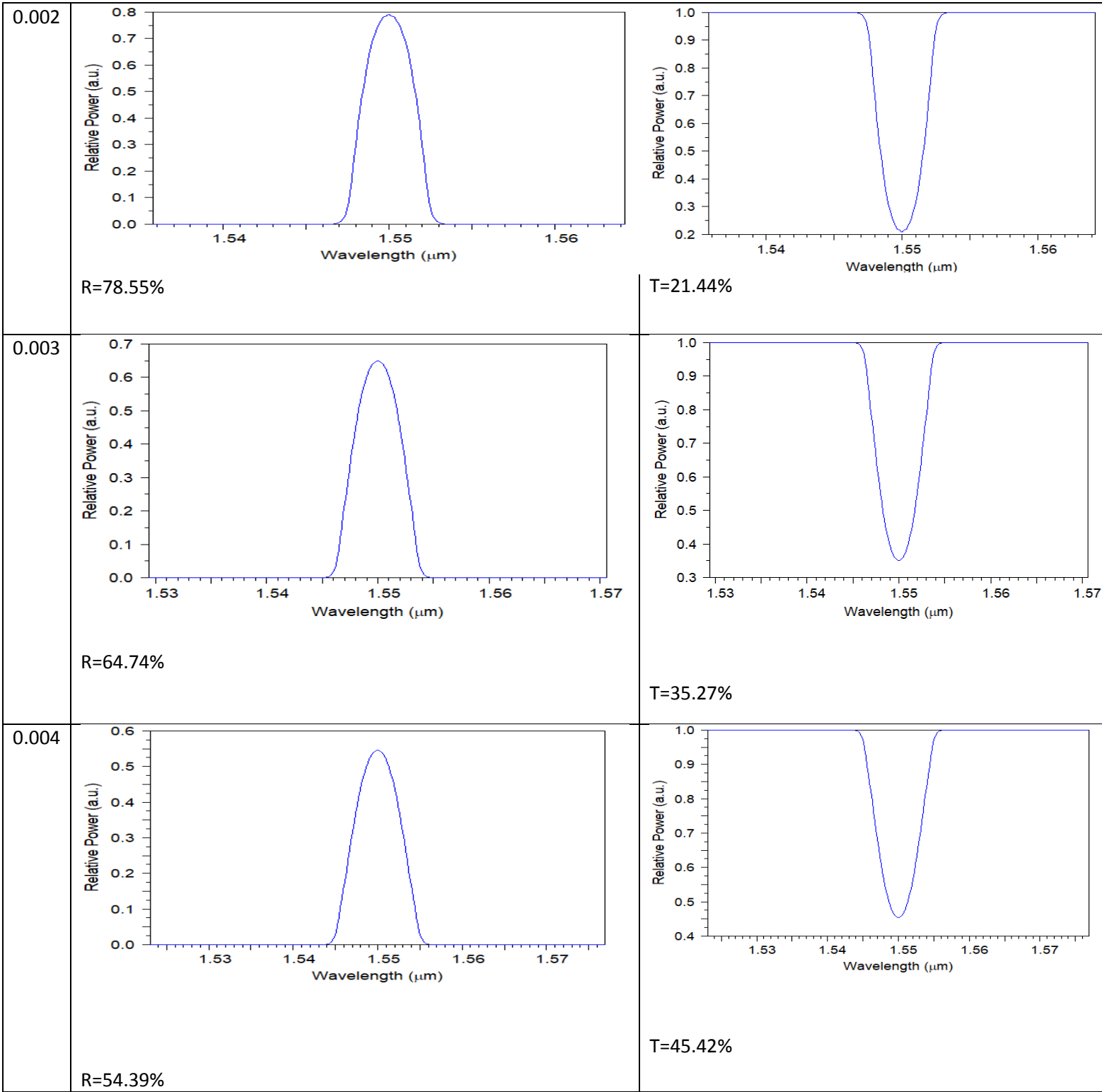
Figure III.2: Structure d'une fibre de Bragg chirpée

Dans cette simulation, les paramètres géométriques et optiques de la structure à pas variable utilisée sont : $D=10\mu\text{m}$, $L=5000\mu\text{m}$. Période initiale=0.5, delta=0.008.

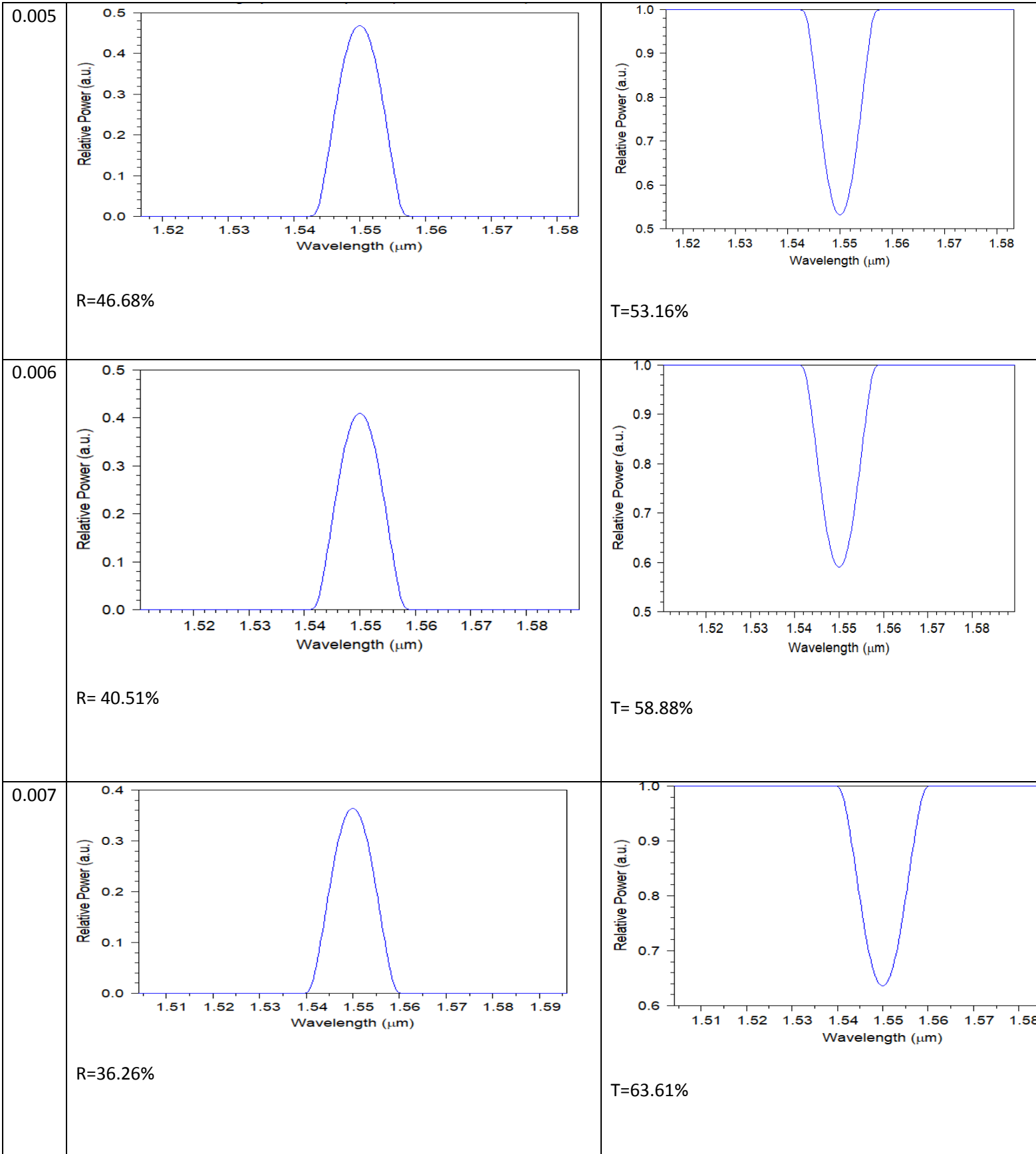
Pour différents valeurs du coefficient chirp qui varie de **0.001** jusqu'à **0.009** d'un pas de **0.001**, on a tracé le spectre en réflexion et on a déduit celui en transmission pour chaque valeur du coefficient chirp correspondant .figure (**III.3**)



Chapitre 03 Résultats et discussions



Chapitre 03 Résultats et discussions



Chapitre 03 Résultats et discussions

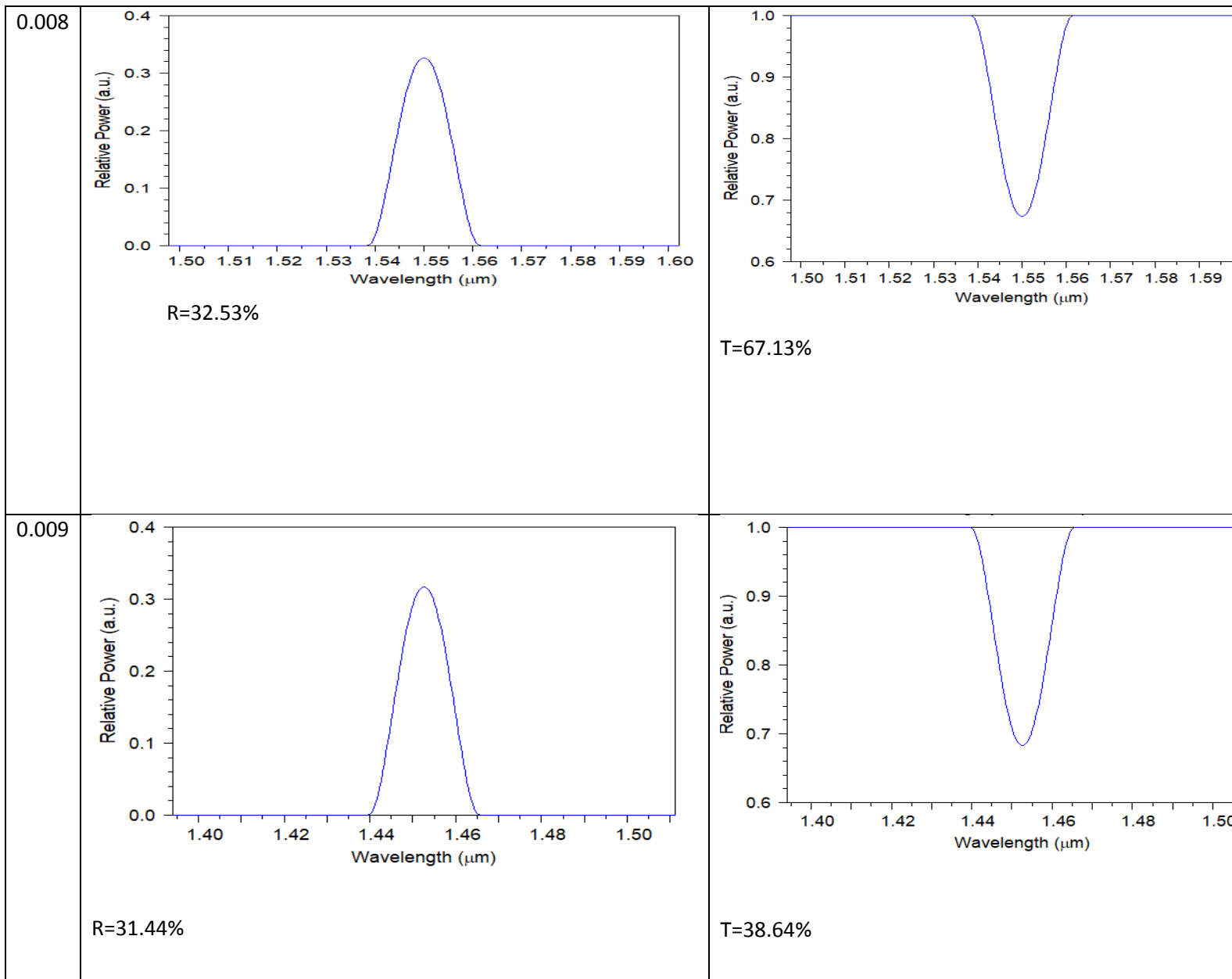


Figure III.3 : Réponse spectral du réseau avec plusieurs valeurs du coefficient chirpé et pour (ModDelta=0.0012, Delta=0.008, Période=0.5, Length=5000)

D'après la figure (III.3) On constate que la réflectivité diminue quand le coefficient chirpé augmente, où le réseau devient de plus en plus à pas variable.

On reporte sur la figure (III.4), la réponse spectrale de la FBG à pas variable du cas où le coefficient chirpé présente 54.39% pour le coefficient chirpé =0.004.

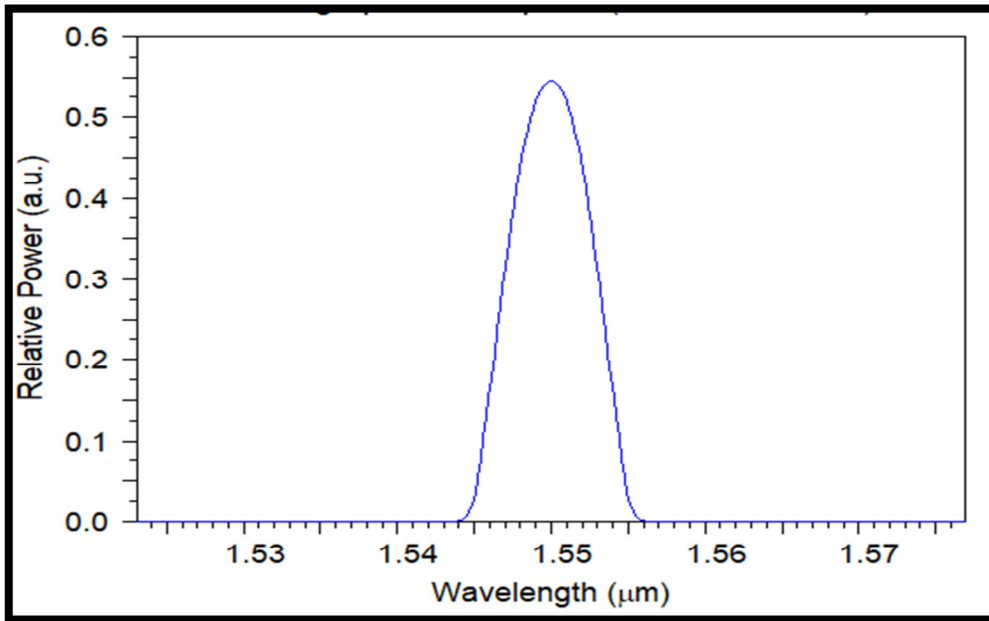


Figure III.4: Réponse spectrale du réseau avec le coefficient chirpé = 0.004 et pour (ModDelta=0.0012, Delta=0.008, Period=0.5, Length=5000)

La relation qui relie le coefficient chirpé avec le coefficient de réflexion est inversement proportionnelle suivant la figure (III.5).

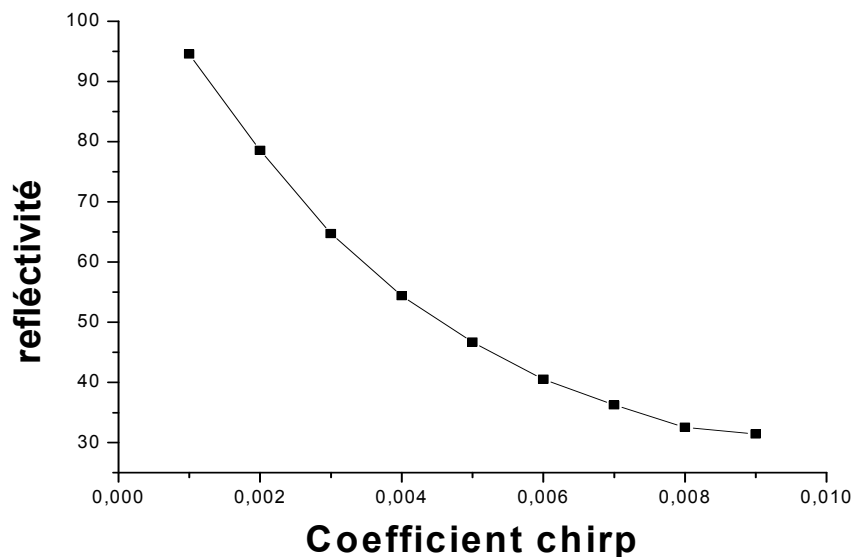


Figure (III.5) : Variation de la réflectivité en fonction du coefficient chirpé

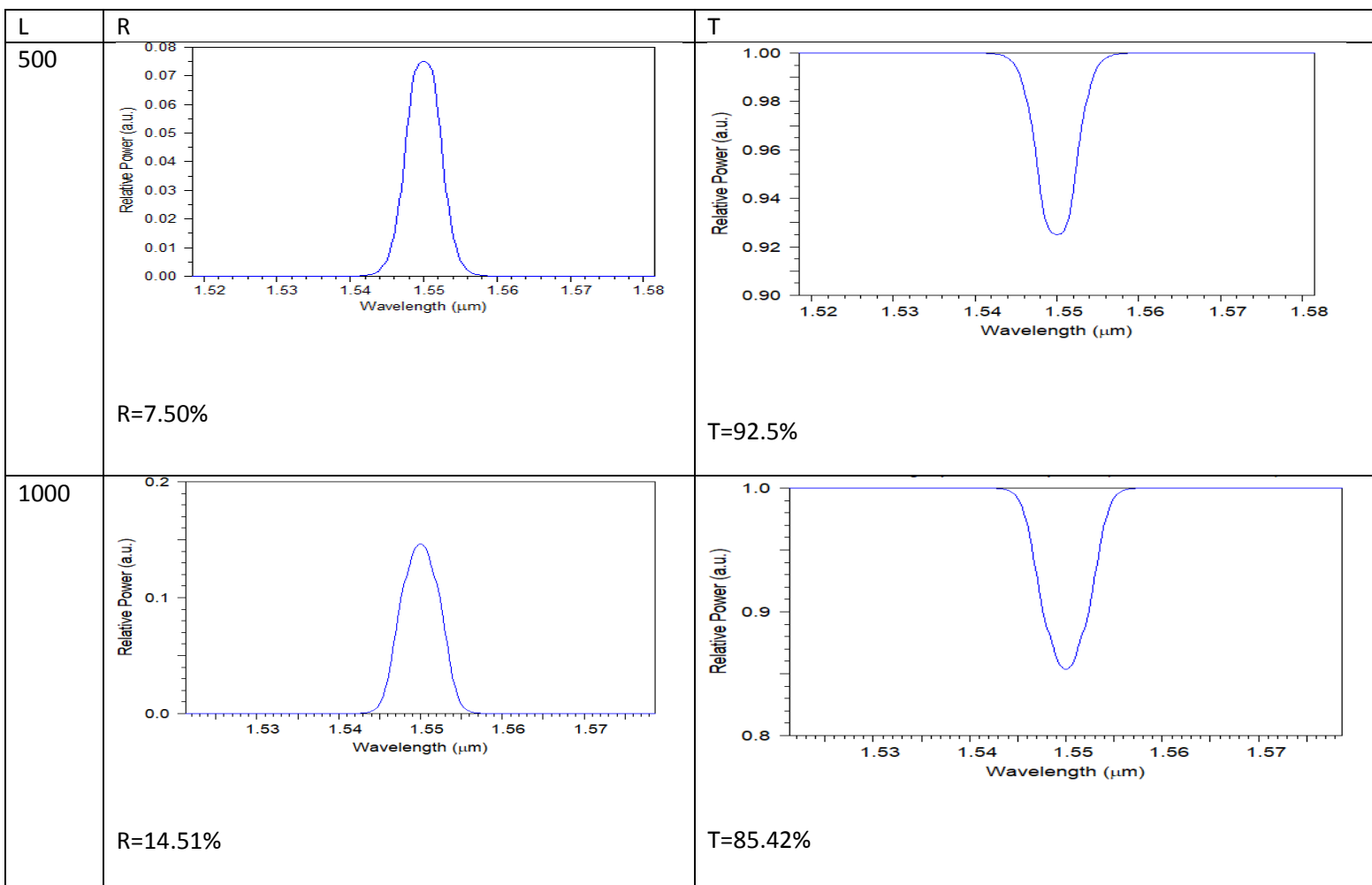
III.2.2.2 L'impact de la longueur du réseau sur la réflectivité

Chapitre 03 Résultats et discussions

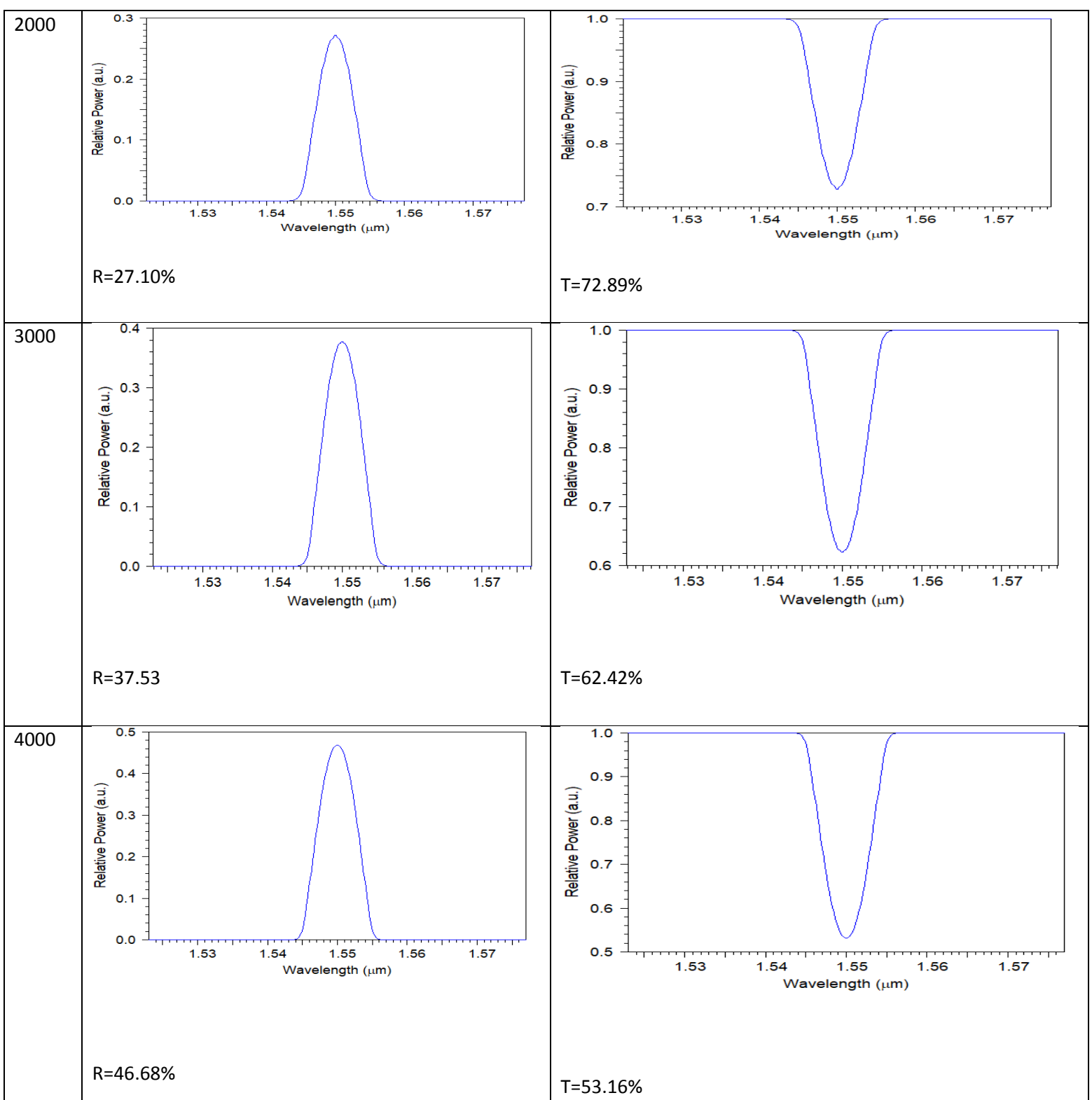
On étudie l'influence de la longueur du réseau sur la réponse spectrale de la FBG.

Dans cette simulation, les paramètres géométriques et optiques de la structure à pas variable utilisée sont : **D=10 μ m**, **coefficient chirp=0.004**. **Pas initiale=0.5**, **delta=0.008**, **ModDelta=0.0012**

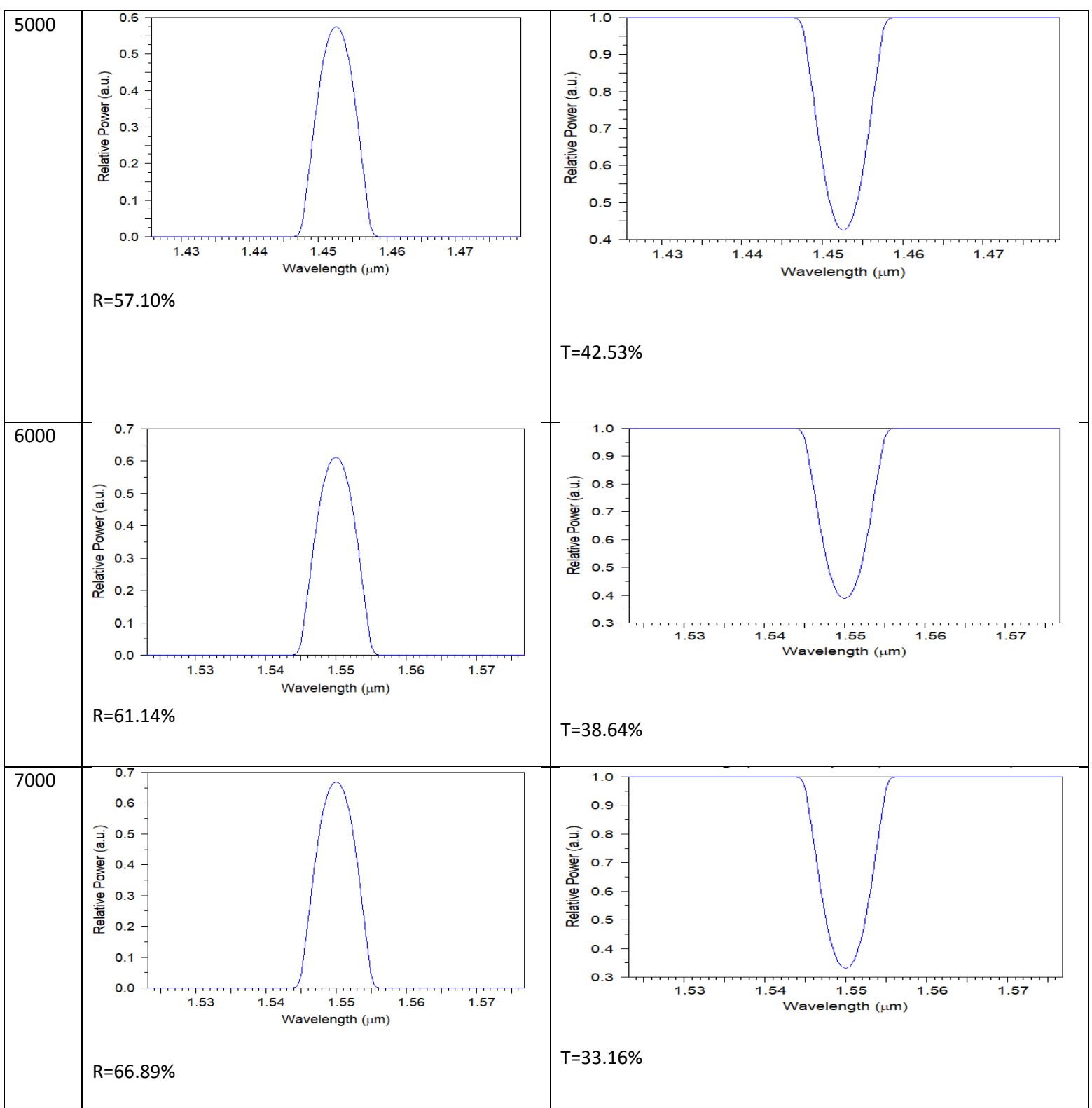
Pour différents valeurs de la longueur du réseau (**L=500 μ m** jusqu'à**10000**), nous avons tracé à chaque fois la valeur du coefficient de réflexion qui correspond. Figure(III.6).



Chapitre 03 Résultats et discussions



Chapitre 03 Résultats et discussions



Chapitre 03 Résultats et discussions

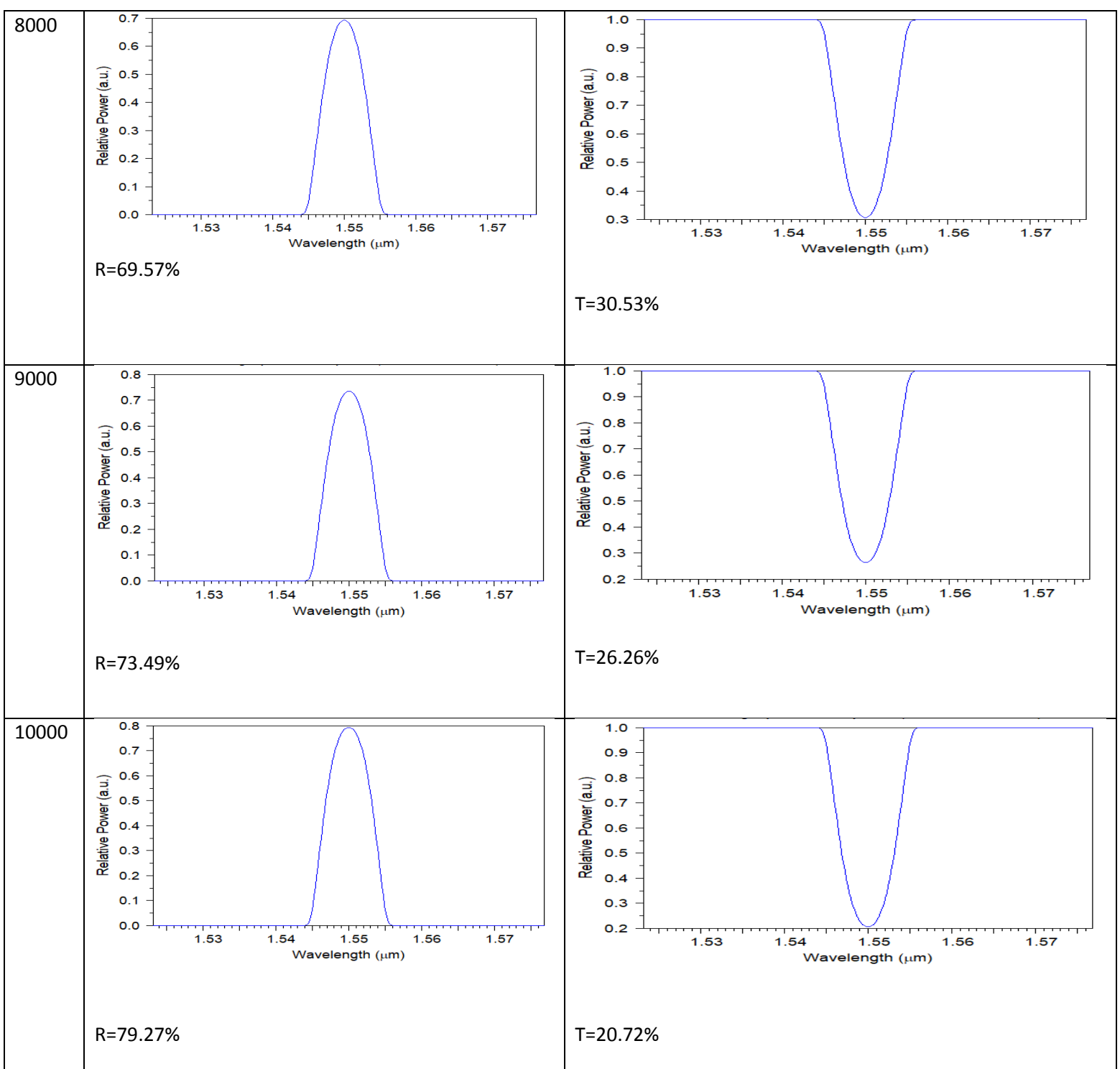


Figure III.6: Réponse spectrale de la FBG pour différents valeurs de la longueur du réseau et pour (**ModDelta**=0.0012, **Delta**=0.008, **Période**=0.5, **Chirp Coefficient** =0.004)

La figure (III.6) montre que la réponse spectrale augmente avec la longueur du réseau.

Chapitre 03 Résultats et discussions

On conclue que la variation du coefficient de réflexion est proportionnelle à la longueur du réseau de Bragg figure (III.7).

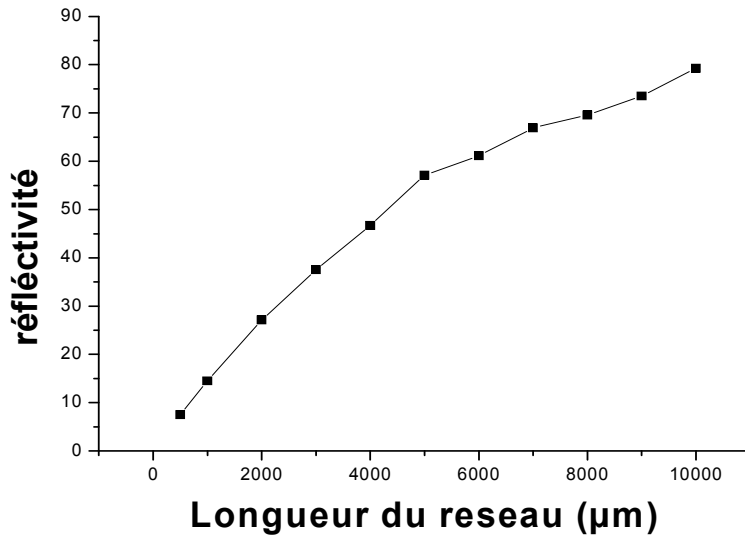


Figure III.7: Variation du coefficient de réflexion en fonction de la longueur du réseau

III.2.2.3 Compensation de la dispersion chromatique

La limitation majeure actuelle dans un lien optique est la transmission à travers de longues distances. On a vu dans le chapitre II qu'une impulsion de courte durée est très vulnérable au phénomène de dispersion chromatique, parce que, plus une impulsion est courte plus son spectre est large ; ce qui provoque un étalement spectral lors de la transmission. Or, les impulsions transmises se chevauchent, et il y aura par la suite des erreurs lors de la récupération du signal lumineux en réception.

En exploitant les résultats trouvés précédemment, on présente Le tracé de la courbe de dispersion en fonction de la longueur d'onde selon la figure (III.8)

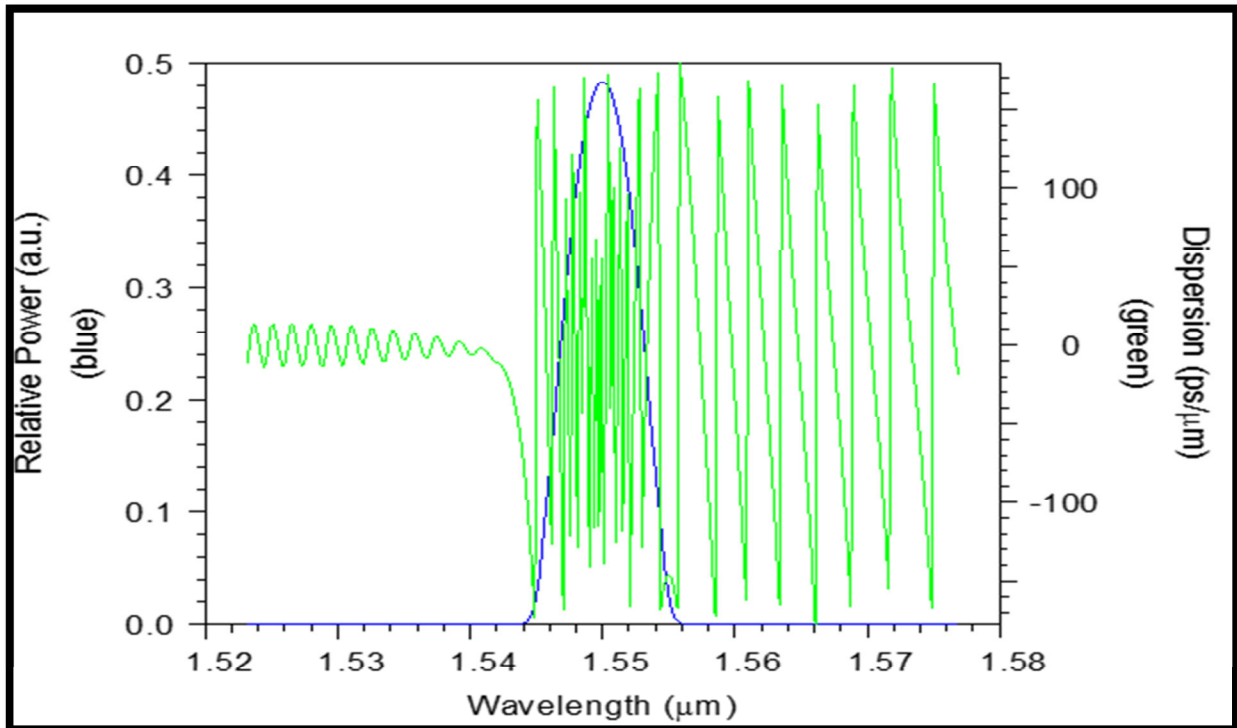


Figure III.8 : Courbe de la dispersion chromatique et du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde.

On remarque que le coefficient de dispersion chromatique, varie entre des valeurs positives et négatives et c'est justement l'objectif recherché : de trouver une dispersion décroissante afin de compenser la dispersion de la fibre de transmission.

Dans la littérature des fibres optiques, on sait que la dispersion s'annule à **1,3μm**, cependant à **1,55 μm**, elle vaut 17ps/nm.km, et c'est la raison pour laquelle on cherche à compenser cette dispersion à cette longueur d'onde.

Avec ce tronçon de fibre à réseau de Bragg, on peut bénéficier des avantages de cette longueur d'onde en ce qui concerne l'atténuation (car on a **0.2 dB** à **1.55μm** seulement, contre **0.5 dB** à **1.3μm**), et par conséquent on peut envoyer notre signal sur de très longue distance.

III.3 Conclusion

Selon les résultats obtenus, nous avons remarqué que chaque type de réseau a ses propres caractéristiques ; en effet la réponse spectrale de réflectivité dépend du pas de, de la profondeur de modulation, réseau ainsi que de sa longueur.

On a étudié l'influence des différents paramètres sur la réponse spectrale de la FBG, et ce ci dans le but de compenser la dispersion chromatique.

La FBG à pas variable, réfléchit les grandes longueurs d'ondes en début du réseau et les plus courtes en fin de réseau, donc elle permet de compenser la dispersion chromatique et par conséquent augmenter la capacité de transmission des fibres optiques

Conclusion Générale

Les réseaux de Bragg ont un rôle très important dans le domaine des télécommunications optiques. L'augmentation du débit sur les lignes de transmission utilisées aujourd'hui a fait de la dispersion chromatique un problème majeur. La dispersion de vitesse de groupe induite dans la fibre perturbe la propagation du signal dans les réseaux de télécommunications optiques.

Le phénomène se traduit par l'élargissement temporel des impulsions lumineuses constituant le signal, ce qui a pour effet d'introduire des distorsions dans le signal transmis en bout de fibre.

Une solution alternative consistait à recourir aux réseaux de Bragg à pas variable pour faire la compensation de la dispersion.

Le réseau de Bragg à pas variable est une technique de compensation très intéressante à cause des nombreux avantages qu'il présente. Une variation périodique et linéaire de son indice de cœur a permis d'avoir des caractéristiques spectrales très particulières : un spectre de réflexion sélectif centré autour de la longueur d'onde d'utilisation, compensation de la dispersion chromatique.....

Les réseaux à FBG permettent un transfert de puissance entre certains modes de propagation d'une fibre optique. Ceci est réalisé via la perturbation de la phase d'un mode de façon à ce qu'elle s'accorde avec la phase d'un autre mode, c'est « la condition de Bragg »

Lors de la simulation, on constate que les réseaux de Bragg à pas constant réfléchit la lumière centrée autour de la longueur d'onde de Bragg, pour application en tant que filtres sélectifs mais avec génération des lobes secondaires dans le profil du spectre de réflectivité. Par contre, pour la structure du réseau de Bragg chirpé, nous avons vu que la réflectivité dépend fortement des paramètres de réseau (chirp, longueur, variation d'indice...)

L'allure de la dispersion obtenue dans ce dernier cas présente des fluctuations : la dispersion est tantôt positive, tantôt négative. Les résultats obtenus sont encourageants et ils sont validés, en les comparant à la littérature [29].

Conclusion générale

La bibliographie

- [1] «Etude et Réalisation des Réseaux de Bragg pour des Applications Photoniques» GOURMALA Ouassila Thèse de Magister en électronique (option Signaux & Systèmes). Université de TLMECEN (2006).
- [2] K.O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, Photosensitivity in optical waveguides; application to reflection fiber fabrication, Appl. Phys. Lett. 32, (1978) 647-649
- [3] G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn, Formation of Bragg gratings on optical fibers by a transverse holographic method, Opt. Lett. 14, (1989) 823-825
- [4] Formation continue CEETAM pour ingénieurs «Composants optoélectroniques pour systèmes de transmission optique», Université Paris XI, (2001).
- [5] http://www.crdp.ac-grenoble.fr/imel/jlj/son_et_lumiere/lumiere/lumiere.htm
- [6] Agrwale, G.P (application of non linear fibre optique), Academic Press , san diego , CA 200
- [7] Etude d'une structure de liaison par fibre optique caractérisation de la propagation et bilan énergétique , Mémoire de magister en électronique , Préparée au Laboratoire LGEB (Laboratoire de Génie Electrique de Biskra, Riadh SAIDI /2009
- [8] généralité sur les fibres optique pdf , [www .amphenol-socapex.com](http://www.amphenol-socapex.com), christian.weiss@ac-bordeaux.fr
- [9] : Télécom Sur Fibres Optiques.(2^{eme} édition revue et augmentée), Pierre LECOY Hermés, Paris, 1992, 1997.
- [10] : Les Fibres Optiques. Jean Pierre NEROU. Le Griffon D'argile INC.
- [11] : Thèmes Actuels En Optique. Maurice FRANCON Prémérite à l'université Pierre et Marie CURRIE . Masson Paris, New York, Barcelone, Milan, Mexico, Saopaulo 1986.
- [12] : Propagation Et Caractérisation Des Fibres Optiques, CHERBI (épouse BAZI) LYND, École nationale polytechnique
- [13] : Télécommunications Optique. Dr SIDI ALI Mebarrek. Office des publications
- [14] Étude d'une Chaîne de télécommunication Optique, Mémoire de Fin de Cycle En vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en télécommunication , Université Abderahmane Mira de Bejaia , Année : 2012 /2013
- [15] S.GARIDEL, « Fabrication des réseaux de Bragg particuliers par lithographie électronique : application à la réalisation de dispositifs photoniques et optoélectroniques sur matériaux de la filière InP », Thèse de doctorat, Lille, 2004.

[16] T.E.MURPHY , « Design, fabrication and measurement of integrated Bragg grating optical filters »,

[17] A.F.Obaton, C.Palavicini, Y.Jaouen, M.Douay, P.Niay, M.Lièvre, « Caractérisation de réseaux de Bragg par réflectométrie optique à faible cohérence »

[18] S.GARIDEL, « Fabrication des réseaux de Bragg particuliers par lithographie électronique : application à la réalisation de dispositifs photoniques et optoélectroniques sur matériaux de la filière InP », Thèse de doctorat, Lille, 2004.

[19] Raman KASHYAP, « Fiber Bragg Grating », Academic Press 1999

[20] fabrication et applications des réseaux de bragg ultra –longs ,mathieu gagné .thèse de doctorat (génie physique) juillet 2015 université de montréal

[21]Optimisation de Masques de Phase pour l'exposition de Réseaux de Bragg à périodes variables sur fibre optique Par Pierre Vinchon Université du Québec Institut National de la Recherche Scientifique Centre Énergie Matériaux et Télécommunications ,Droits réservés de Pierre Vinchon, 2015

[22]Michel Hulin « Equations De Maxwell, Ondes Electromagnétiques » Edition Dunod,France (1997)

[23] R. Petit, "Ondes électromagnétiques en radioélectricité et en optique", Edition Masson (1989)

[24] Belfar Ahlam et Boudjaouad Rebiha (Etude et simulation des différents types de réseau de bragg),mémoire master informatique industriel, université Mohamed Elbachir El-ibrahimi de Bordj Bou Arreridj,2013

[25]« Design, Fabrication and Measurement of Integrated Bragg Grating optical filters » Thomas E. Murphy, these de doctorat, Massachusetts

[26] A.JEBALI , « Réalisation de réflecteurs de Bragg pour un Laser à fibre »,projet hiver, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne,2000

[27] Manuel [GratingMOD™ 1.1 User Guide](#) Mode

[28] R. Merzougui, A. Rebouh «L'influence des différents paramètres géométrique d'une réseau de Bragg (photo-inscrit dans le cœur d'une fibre optique) sur la réponse spectrale du FBG» , mémoire de master en électronique, Université de Bordj Bou-Arreridj, (2018).

[29] O. Guormala (Etude et réalisation de réseau de bragg pour des applications photoniques),mémoire de magister ,Université de Tlemcen ,(2006)

Résumé

La dispersion de la vitesse de groupe dans une fibre optique perturbe la propagation du signal dans les réseaux de télécommunications optiques. La plupart des fibres optiques utilisées dans les réseaux de transmission sont adaptées au standard de transmission autour de la longueur d'onde $\lambda=1330$ nm. A cette longueur d'onde, la dispersion de la vitesse de groupe est quasi nulle.

Cependant, à la longueur d'onde de transmission autour de 1550 nm où l'atténuation est nulle, la dispersion n'est pas négligeable, Ce phénomène provoque un élargissement temporel des impulsions si bien que deux trains d'onde consécutifs puissent éventuellement se recouvrir.

Une solution alternative consiste à recourir aux réseaux de Bragg à pas linéairement variable photo inscrits dans le cœur d'une fibre optique. Les petites périodes sont placées en fin de réseau pour réfléchir les hautes fréquences plus tard que les basses fréquences, dans le but d'avoir une dispersion négative.

L'objectif de ce travail est de caractériser ces éléments à dispersion normale dans le but de compenser la dispersion chromatique induite dans une fibre optique.

Mots clés, dispersion chromatique, fibre optique, réseaux de Bragg à pas variable.

Abstract

The dispersion of the group velocity in an optical fiber disrupts signal propagation in optical telecommunications networks. Most of the optical fibers used in the transmission networks are adapted to the transmission standard around the wavelength $\lambda = 1330$ nm. At this wavelength, the dispersion of the group velocity is almost zero.

However, at the transmission wavelength around 1550 nm where the attenuation is zero, the dispersion is not negligible. This phenomenon causes a temporal expansion of the pulses so that two consecutive wave trains can possibly overlap. .

An alternative solution is to use Bragg gratings with a linear pitch variable photo inscribed in the core of an optical fiber. The small periods are placed at the end of the network to reflect the high frequencies rather than the low frequencies, in order to have a negative dispersion. The aim of this work is to characterize these elements with normal dispersion in the order to compensate for chromatic dispersion induced in an optical fiber.

Key words, chromatic dispersion, optical fiber, chirped Bragg gratings.