

**République Algérienne Démocratique et
Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique.
Université Amar Thelidji – Laghouat**



Faculté de technologie

Département d'électronique

Mémoire de Master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Réalisé par :

M^{elle}. Reggab Fatima

Thème

**Etude et simulation des Réseau de Bragg sur fibre optique pour la
compensation de la dispersion chromatique dans les systèmes de transmission
optique haut débit.**

Soutenu le : 14 /06/2023

Devant la commission d'examen composée de :

Birane Mouhoub	M. C.A	Président
Saleh Chaker	M. C.B	Examineur
Sonne Abdelkader	M. C.A	Rapporteur

Année Universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous remercions Dieu le Tout Puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté et le pouvoir d'entamer et d'achever ce travail.

Et qui ne remercie pas les gens ne remercie pas le bon Dieu
Primo, nous remercions celui qui a été derrière ce travail
Monsieur Dr. Sonne
ses précieux conseils et son suivi attentif et enrichissant.

Secundo, nos remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté de juger notre modeste travail.

Finalement, nous remercions toute personne qui a participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail, messieurs et mesdames enseignants qui ont veillé à notre formation, à nos collègues avec qui nous avons fait notre cursus universitaire.

Dédicace

JE dédie ce travail à :

Ma mère Omhani

Mon père Aissa

Mon fiancé

Mon frère Ahmed

Qui ont été derrière nous depuis le premier jour de notre naissance, qu'ils étaient et ils le sont toujours des lumières dans les nuits obscures par leurs prières sincères et protectrices. Ils étaient et ils sont toujours un socle sur lequel on s'appuie. On leur dit sans votre présence, on ne pouvait jamais atteindre ce beau jour, on ne peut jamais fêter ce jour et on ne pourra jamais trouver plus chers que vous.

Nos chers frères et chères sœurs

Qui nous ont aidés avec leurs conseils, leur soutien moral qui a adouci les nuits blanches et l'effort pénible.

Nos amies chacune avec son nom

Pour leurs aides et supports dans les moments atroces.

Résumé

ملخص

تعد الألياف الضوئية الآن واحدة من أكثر وسائل الاتصال البصري عالي السرعة استخدامًا في النقل لمسافات طويلة. مثل غيرها، فإن الألياف الضوئية لها بعض عوامل الحد من الانتشار مثل التشتت اللوني والفقد. الهدف من عملنا هو التعويض عن تأثير تشتت اللون في الطول الموجي " $\lambda = 1.5$ ميكرومتر" باستخدام تقنية الألياف الضوئية (FBG) وفقًا لبرنامج المحاكاة. البصريات تعد مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال استخدام ألياف Bragg المحززة أفضل خيار لتعويض تأثير التشتت الناتج عن الألياف أحادية الوضع

الكلمات الرئيسية

الاتصال البصري، الألياف البصرية الأحادية (SMF)، ألياف شبكة براغ (FBG)، التشتت اللوني.

Résumé

La fibre optique est maintenant l'un des moyens de communication optique à haut débit les plus utilisés dans la transmission à longue distance. Comme d'autres, les fibres optiques ont certains facteurs limitant la propagation tels que la dispersion chromatique et les pertes. Le but de notre travail est de compenser l'effet de la dispersion des couleurs dans " $\lambda = 1.5\mu\text{m}$ " longueur d'onde en utilisant la technologie de fibre de réseau de Bragg (FBG) selon le logiciel de simulation. OPTISYSTME

En comparant les résultats obtenus grâce à l'utilisation des fibres réseau de Bragg est la meilleure option pour compenser l'effet de dispersion causé par les fibres monomode .

Mots-clés :

Connexion optique, fibre optique monomode (SMF), fibre réseau Bragg(FBG) ,la dispersion chromatique .

Summary

Fiber optics are now one of the most widely used means of high-speed optical communication in long-distance transmission. Like others, fiber optics have certain factors limiting propagation such as chromatic dispersion and losses. The purpose of our work is to compensate for the effect of chromatic dispersion in " $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ wavelength" in WDM multiplexing systems using Bragg Network Fiber Technology (FBG) according to the simulation software. OPTISYSTME

By comparing the results obtained through the use of the two technologies, the use of Bragg network fibers is the best option to compensate for the dispersion effect caused by single-mode fibers .

Keywords:

Optical Connection, Single Mode Fiber (SMF), chromatic dispersion, Bragg Network Fiber

Liste des Figures

<i>Figure I.1: Réseau grand distance.</i>	4
<i>Figure I.2: Réseau Métropolitain</i>	5
<i>Figure I.3: réseau local LAN.</i>	6
<i>Figure I.4: Schéma de principe d'un système de transmission optique.</i>	7
<i>Figure I.5: Principe de la diode électroluminescente.</i>	8
<i>Figure I.6: Spectre d'émission d'un DL.</i>	9
<i>Figure I.7: Schémas de principe de laser.</i>	10
<i>Figure I.8: Modulation directe.</i>	11
<i>Figure I.9 : Modulation directe d'une diode laser</i>	11
<i>Figure I.10: Modulation directe</i>	12
<i>Figure I.11: Schéma simplifié d'un modulateur de Mach-Zehnder</i>	13
<i>Figure I.12: photodiode PIN.</i>	15
<i>Figure I.13: structure de la fibre.</i>	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure I.14: exemple d'un amplificateur optique</i>	16
<i>Figure I.15: Structure d'un amplificateur.</i>	17
<i>Figure I.16: Réponses fréquentielles du filtre.</i>	18
<i>Figure II.17: Présentation temporelle de la régénération des données d'entrée.</i>	18
<i>Figure II.1. Schéma d'une fibre optique.</i>	23
<i>Figure II.2 : Principe de réflexion].</i>	25
<i>Figure II.3. Principe de réfraction.</i>	25
<i>Figure II.4 : Phénomène de réflexion totale.</i>	26
<i>Figure II.5. Principe du guidage dans la fibre optique par réflexion totale interne.</i>	26
<i>Figure II.6: Cône d'acceptance</i>	27
<i>Figure II.7: Fibre à saut d'indice.</i>	28
<i>Figure II.8: Fibre à gradient d'indice</i>	28
<i>Figure II.9: fibre monomode.</i>	29
<i>Figure II.10: Schéma de principe du multiplexage WDM.</i>	30
<i>Figure II.11: L'atténuation dans la fibre optique.</i>	31
<i>Figure II.12: La dispersion d'une fibre optique.</i>	32
<i>Figure II.13: Impact de la dispersion chromatique sur un signal optique</i>	32
<i>Figure II.14: Dispersion du matériau en fonction de la longueur d'onde.</i>	33
<i>Figure II.15: Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde.</i>	35
<i>Figure II.16: Dispersion du guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre optique.</i> ...	35
<i>Figure II.17: Effet de la PMD sur le mode</i>	37

Liste des Tableaux

<i>Figure II.18: Le phénomène de dispersion intermodale.</i>	38
<i>Figure II.19: Perte par courbure</i>	39
<i>Figure II.20: perte par micro-courbure</i>	39
<i>Figure II.21: structure de fibre de Bragg.</i>	40
<i>Figure II.22: Schéma illustrant les propriétés d'un réseau de Bragg.</i>	41
<i>Figure II.23: Profil de l'indice de réfraction : (a) réseau uniforme, (b) réseau apodisé avec une fonction de type gaussien</i>	42
<i>Figure II.24: Fibre à réseau de Bragg à pas variable linéairement.</i>	42
<i>Figure II.25: Profil de l'indice de réfraction : réseau de Bragg linéaire à pas variable.</i>	43
<i>Figure III.1: L'interface de Travail sur OptiGrating.</i>	47
<i>Figure III.2: L'interface de travail sur OptiSystem.</i>	48
<i>Figure III.3: L'effet de l'atténuation et la dispersion chromatique Sur la transmission.</i>	49
<i>Figure III.4: Profil d'indice de la fibre monomode standard la G-652.</i>	49
<i>Figure III.5: Variation de l'indice de la gaine et l'indice de cœur de la G-652 avec la longueur d'onde.</i>	51
<i>Figure III.6: Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique De la fibre G-652.</i>	51
<i>Figure III.7: Bloc d'une chaîne de transmission optique pour testé l'effet de la dispersion chromatique sur une impulsion gaussienne avec la fibre G-652</i>	52
<i>Figure III.8: L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une gaussien sur la fibre optique G-652 à 1550 nm</i>	53
<i>Figure III.9: L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une séquence d'impulsions gaussien (01010010) sur la fibre optique G-652 à 1550 nm</i>	54
<i>Figure III.10: Spectre de réflectivité d'un réseau de Bragg uniforme</i>	56
<i>Figure III.11: Temps de retard d'un réseau de Bragg uniforme</i>	56
<i>Figure III.12: Fibre à réseau de Bragg à pas variable linéairement.</i>	57
<i>Figure III.13: Spectre de réflectivité d'un réseau de Bragg à pas variable (chirpé)</i>	58
<i>Figure III.14: Le temps de retard de deux réseaux chirpés avec deux chirp opposés : (a) le chirp est positive, (b) le chirp est négative</i>	59
<i>Figure III.15: Bloc d'une chaîne de transmission optique avec la FBG compensatrice</i>	60
<i>Figure III.16: L'effet de la fibre compensatrice sur la dispersion chromatique de la fibre de ligne.</i>	61

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

<i>Tableau II.1 : L'atténuation va varier suivant la longueur d'onde [16].</i>	31
<i>Tableau III.2 : Les coefficients de multiples matériaux de verre à base de silice.....</i>	50

Liste des Abréviations

A

AOSC : Amplificateur optique à semi-conducteur

E

DCF: Dispersion Compensative Fiber.

DWDM: Dense wavelength division multiplexing.

F

FTTB: Fiber to the Building.

FTTH: Fiber to the Home.

FTTN: Fiber to the Neighbor hood.

L

LAN: Local Area Network

Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LED : Light Emitting Diode

M

MAN: Metropolitan Area Network

MEA : Modulateur Electro-absorbant

MZM : Modulateur Mach-Zehnder

O

ON : l'ouverture numérique

P

PIN/ Positive Intrinsèque Négative

R

3R Retiming, Reshipping, Regenerating

S

SDH / Synchronous Digital Hierarchy

W

WAN: Wide Area Network

Table de Matières

Remerciements	I
<i>Dédicace</i>	II
ملخص	III
Résumé	III
Summary	III
Liste des Figures	IV
Liste des Abréviations	VII
Table de Matières	VIII
Introduction générale	1
I.1 Introduction	4
I.2 Les Différents Types de Réseaux	4
I.2.1 Le réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network).....	4
I.2.2 Le réseau métropolitain (MAN, Metropolitan Area Network).....	5
I.2.3 Le réseau local LAN(Local Area Network).....	6
I.3 Description des systèmes de transmission optique	7
I.3.1 Emetteur optique	7
I.3.1.1 Source Optique.....	8
I.3.1.2 Le modulateur	10
I.3.2 Le Bloc Récepteur	14
I.3.3 La Fibre Optique	16
I.3.4 Les Amplificateurs Optiques.....	16
I.3.5 L'amplificateur électrique.....	17
I.3.6 Le filtrage	17
I.3.7 Circuit de décision	18
I.3.8 Les Fibres de Compensation.....	19
I.4 Conclusion	19
chapitre II: Généralité sur les fibres optiques et réseau de Bragg	21
II.1 Introduction	22
II.2 La Fibre Optique	22
II.3 Structure de la fibre optique	22
II.4 Evolution de la transmission de signaux par fibre optique	23
II.4.1 Le principe de propagation de la lumière dans une fibre optique.....	24
II.4.2 Principe de guidage dans les fibres et ouverture numérique	26
II.5.Types des fibres	27

II.5.1	Fibres multimodes	27
➤	Fibres optiques à saut d'indice	28
➤	Fibres optiques à gradient d'indice.....	28
II.5.2	Fibres monomodes	28
II.6.	Les avantages de la fibre optique.....	29
II.7	Système WDM	29
II.8.	Problèmes de transmission	30
II.8.1	L'atténuation	30
II.8.2	La dispersion chromatique	32
II.8.2.1	La dispersion matériaux (on ne peut pas le changer)	33
II.8.2.2	La dispersion de guide.....	34
II.8.3	La biréfringence.....	36
II.8.4	La dispersion de polarisation (PMD)	36
II.8.5	La dispersion modale.....	37
II.8.6	Dispersion intermodal	37
II.8.7	Pertes extrinsèques	38
➤	Les pertes par courbure	39
➤	Les pertes par micro-courbure	39
II.9	Principe de fonctionnement des fibres à réseau de Bragg	40
II.9.1	Réseau de Bragg uniforme	41
II.9.2	Réseau de Bragg à pas variable (Réseau de Bragg chirpé).....	42
II.10	Conclusion.....	43
chapitre III:	Compensation de la dispersion chromatique par réseau de Bragg	45
III.1	Introduction.....	46
III.2	Présentation du logiciel Optiwave Système	46
III.2.1	OpriGrating.....	47
III.2.2	OptiSystem	47
III.3	Effets de La dispersion chromatique sur la transmission	48
III.4	Techniques de compensation de la dispersion chromatique	55
III.5.	Contrôle de la dispersion chromatique par l'utilisation des fibres à réseau de Bragg.....	55
Conclusion Générale	64
Bibliographie.....	65

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction générale

Le besoin humain de communication n'a cessé de croître et ne peut être satisfait, c'est pourquoi la recherche dans ce domaine se poursuit depuis des années et continue de le faire aujourd'hui, en raison de l'augmentation de la demande dans ce domaine en général. En conséquence, le transfert de connaissances d'un point à un autre nécessite la mise en place d'une série d'accords liés, au moyen de la transmission et des grandeurs physiques liées à la propagation et à l'analyse du signal. Ces transmissions ont évolué au fil du temps, mais elles ont conservé le même principe structurel basé sur l'émetteur et les canaux émis et reçus, puisque ces procédés ont permis la découverte de nouveaux accords de transmission et de vitesse de transmission avec les fibres optiques. Depuis quelques années, la fibre optique, après avoir supplanté le câble coaxial, est devenue un des médias les plus utilisés pour transporter tous types de données (audio, vidéo, Internet). Ce choix est dû aux efforts soutenus des chercheurs dans le domaine des télécommunications optiques. Avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, La fibre optique a rempli très bien ce rôle de support de transmission. Mais, au milieu des années 1990 la popularité croissante de l'internet et d'autres facteurs s'avère nécessaire d'améliorer toujours les caractéristiques de propagation dans les fibres en augmentant la bande passante. Cependant cette stupéfiante montée en débit a rendu le signal de plus en plus sensible à certains facteurs limitatifs pour les fibres optiques au cours de la propagation du signal, parmi de ces problèmes on a la dispersion chromatique. La dispersion chromatique est la propriété de la fibre optique qui provoque l'élargissement de l'impulsion lors de la propagation à travers la fibre optique dans le cœur, ce qui a pour effet d'introduire des distorsions dans le signal transmis en bout de fibre.

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

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

Dans ce mémoire nous évoquons surtout le problème de la dispersion chromatique dans la fibre optique, les causes et les conséquences qui en résultent l'élargissement temporel des

Introduction Générale

impulsions qui composent le signal. L'objectif principal de notre mémoire est consacré à l'étude de la compensation de dispersion chromatique dans les fibres optiques en utilisant le Réseau de Bragg sur fibre optique (FBG).

Ce mémoire est organisé comme suit, le premier chapitre est consacré aux généralités sur les principes de liaison par fibre optique. Dans ce chapitre, nous allons présenter les principes de fonctionnement des différents composants dans les systèmes par fibres optiques. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique des fibres optiques, on va mettre un coup d'œil sur les différents types de ces fibres et on va présenter leurs principales caractéristiques. Enfin, le troisième chapitre de ce mémoire sera consacré à la simulation à l'aide du logiciel OptiSystem et OptiGrating de la compensation de la dispersion chromatique dans les fibres optiques en utilisant le Réseau de Bragg sur fibre optique (FBG).

Chapitre I :
Généralité sur les liaisons par fibres
optiques

I.1 Introduction

L'apparition de la fibre optique a totalement révolutionné le monde des télécommunications. La conception de systèmes de transmission à très grande capacité est désormais possible. De plus, les échanges à travers ces systèmes sont de plus en plus nombreux et la demande de services de plus en plus élevée. Il en résulte un bouleversement des réseaux de télécommunications précédents et un besoin de mettre en place de nouvelles structures. Nous avons choisi dans ce premier chapitre d'apporter un bref descriptif des réseaux optiques et de présenter les composants constituant un système de transmission numérique sur fibre optique.

I.2 Les Différents Types de Réseaux

Les systèmes de transmission par fibres optiques peuvent être trouvés dans tous les niveaux du réseau :

I.2.1 Le réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network)

Il est déployé à l'échelle d'un pays ou d'un continent, et ses nœuds sont de très grands centres urbains. Ce type de système :

- comprend des systèmes terrestres ou sous-marins.
- véhicule des données à grande vitesse sur des longues distances de plus de 100 km.
- peut utiliser des répéteurs pouvant régénérer le signal optique. Ces répéteurs sont constitués par des régénérateurs optoélectroniques 3R (Retiming, Reshipping, Regenerating) et par des amplificateurs optiques.

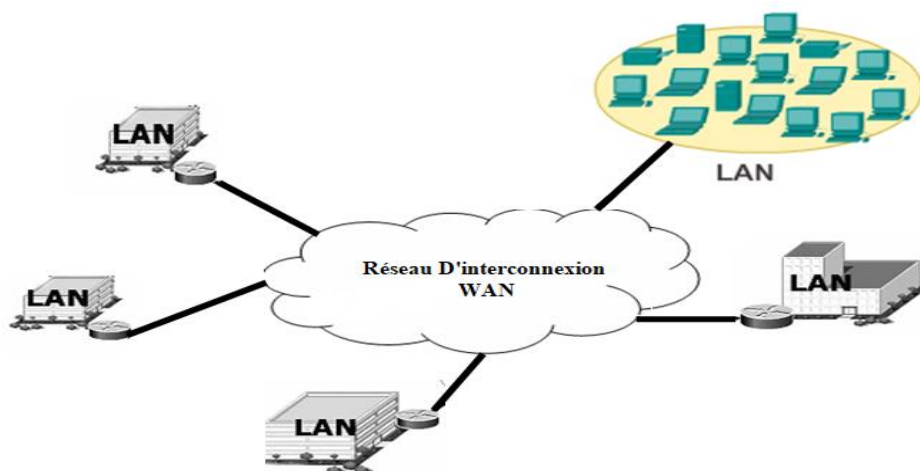


Figure I.1: Réseau grand distance.

I.2.2 Le réseau métropolitain (MAN, Metropolitan Area Network)

C'est un réseau qui dessert une grande ville et ses environs. Ce type de réseau :

- À une longueur qui varie entre 1 à 100 km.
- À un grand degré de connectivité.
- Utilise des anneaux métropolitains qui se caractérisent généralement par un trafic maillé avec un certain degré de concentration lié à l'interconnexion avec le réseau longue distance. Les anneaux d'accès collectent en général le trafic de plusieurs nœuds pour le concentrer vers un nœud partagé avec un réseau métropolitain structurant.
- Doit, à la différence du réseau longue distance, prendre en charge des formats, des protocoles et des débits de transmission très divers.
- Mêlent les trafics de la hiérarchie numérique synchrone (SDH) ou autre encore. Les amplificateurs optiques sont essentiels pour les applications de ce type de réseau.
- Est souvent équipé par des cartes transpondeurs multi-débits universelles, acceptant n'importe quel débit de 100 Mb/s à 2.5 Gb/s.
- Utilise le DWDM, offrant les mêmes avantages que les systèmes à longues distances.
- Les distances étant plus faibles, nécessite moins d'amplificateurs optiques, ce qui permet d'étendre la bande spectrale au-delà des amplificateurs dopés à l'erbium et réduit les problèmes de dispersion.

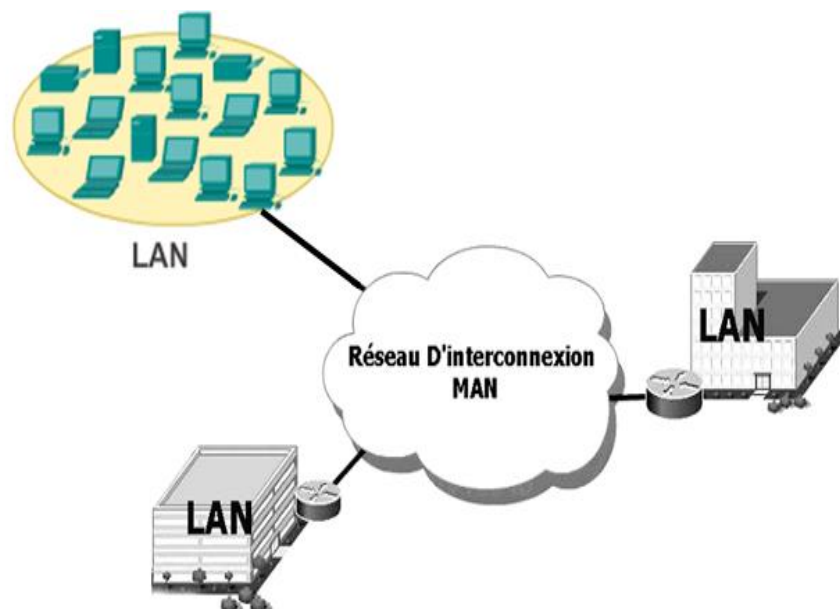


Figure I.2: Réseau Métropolitain

I.2.3 Le réseau local LAN(Local Area Network)

Aussi appelé réseau d'accès ou de desserte, ce réseau :

- À une longueur qui varie de 2 à 50 m ;
- Est constitué par une partie en fibre entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné.
- L'optique entre désormais dans les réseaux de desserte grand public, on parle de FTTx (Fiber To The ..., « fibre jusqu'à ... ») : quartier (FTTN, pour Neighborhood), au pied d'immeuble (FTTB, pour Building), au domicile (FTTH, pour Home) .

Les liens de fibre longue courrier (milliers de kilomètres) tels que les câbles sous-marins constituent l'épine dorsale ou le noyau d'un réseau de télécommunication. Un WAN (figure I.1) est généralement constitué de liaisons de communications couvrant une vaste région, comme un pays. Un MAN (figure I.2) est optimisée pour une zone géographique allant de plusieurs blocs de bâtiments à des villes entières. Un réseau local est un réseau couvrant une zone plus petite, comme un campus ou un bâtiment [1].

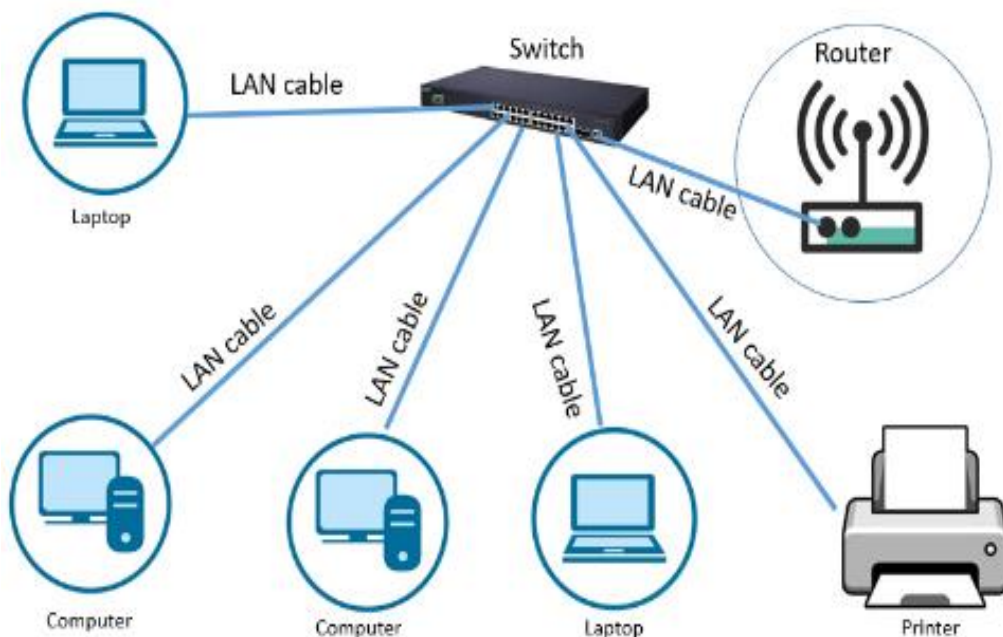


Figure I.3: réseau local LAN [1].

I.3 Description des systèmes de transmission optique

La liaison optique est basée sur trois blocs fondamentaux pour assurer le transfert des données, elle est constituée d'un émetteur optique qui sert à envoyer des données (signal électrique) par le câble optique et les convertis à un signal optique qui se propage avec une certaine atténuation et dispersion, à la fin, au niveau du récepteur optique, le signal propagé sera converti en un signal électrique avec une diminution des pertes de donnée (fig. I.4) [2].

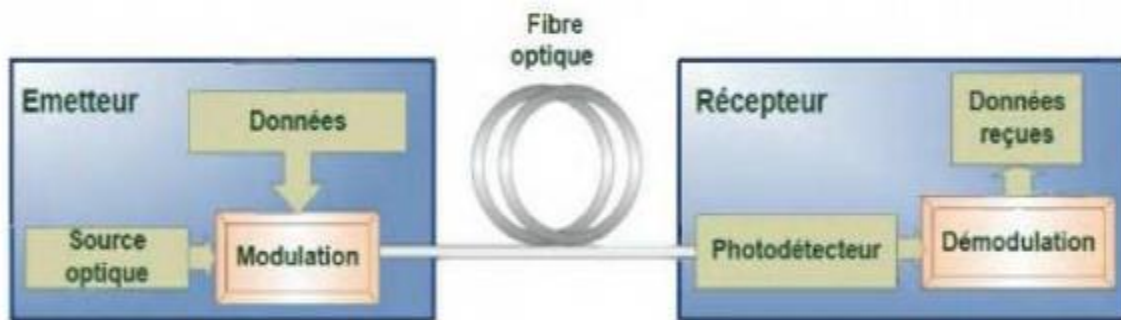


Figure I.4: Schéma de principe d'un système de transmission optique [2].

I.3.1 Emetteur optique

Les facteurs essentiels qui conditionnent le choix d'un émetteur pour télécommunication par fibre optique sont, le spectre d'émission, qui doit correspondre aux fenêtres de transparence et de faible dispersion de la fibre utilisée, la possibilité de modulation du rayonnement émis, et la réalisation d'un couplage efficace émetteur - fibre. Les fibres optiques de silice sont caractérisées par des fenêtres centrées à 1.3 à 1.55 μ que nous verrons dans le deuxième chapitre, et des diamètres qui varient entre plusieurs centaines de microns et quelques microns. Les sources doivent par conséquent émettre un rayonnement modulable, centré sur l'une de ces longueurs d'onde, et avoir une surface active de faible dimension. En conséquence les diodes électroluminescentes et les diodes lasers sont particulièrement bien adaptées. Comparativement aux diodes lasers, les diodes électroluminescentes sont plus facilement modulables, ont une meilleure durée de vie et sont beaucoup moins chères. Par contre, les diodes lasers ont une surface émettrice plus faible, ce qui permet d'utiliser des fibres de plus petite section et par la suite de diminuer la dispersion inter mode. D'autre part, le rayonnement émis par une diode laser est pratiquement monochromatique, plus puissant et moins divergeant, ce qui augmente le rendement du couplage émetteur - fibre [2].

I.3.1.1 Source Optique

➤ La diode DEL

Lorsqu'une jonction PN est polarisée dans le sens direct, les électrons, qui sont majoritaires dans la région de type n, sont injectés dans la région de type p où ils se recombinent avec les trous. Inversement pour les trous, la structure de base d'une diode Électroluminescente, LED (Light Emitting Diode) est une jonction PN réalisée à partir de Semi-conducteurs dans lesquels les recombinaisons des porteurs excédentaires sont essentiellement radiatives. La structure type d'une diode électroluminescente et son principe de fonctionnement sont représentés sur la figure (1.5)

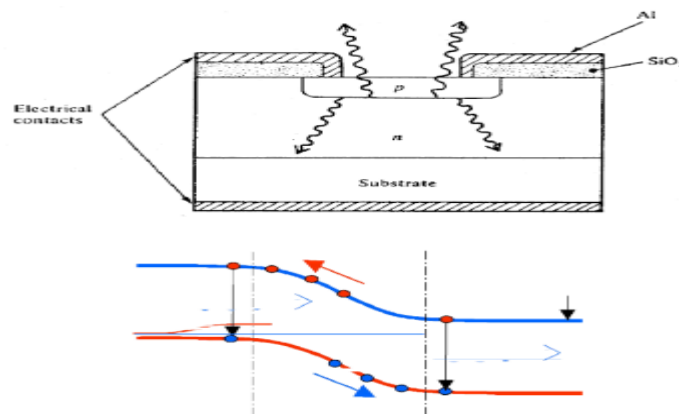


Figure I.5: Principe de la diode électroluminescente [2].

Une tension de polarisation directe fixe la séparation des niveaux de Fermi. Les recombinaisons des porteurs excédentaires se manifestent dans trois régions différentes qui sont d'une part la zone de charge d'espace, et d'autre part les régions neutres n et p. Dans chacune de ces dernières, la zone émettrice est limitée à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. La zone de charge d'espace joue un rôle mineur dans la mesure où elle est très étroite en raison du fait que la jonction est fortement polarisée dans le sens direct. La mobilité des électrons étant beaucoup plus grande que celle des trous, le taux d'injection d'électrons dans la région de type p est plus important que le taux d'injection de trous dans la région de type p. C'est la raison pour laquelle cette région constitue la face émettrice dans la structure. Il faut ajouter que pour des raisons d'intensité d'émission, les régions n et p de la diode sont très dopées. Ces dopages importants se traduisent par une diminution du gap que l'on peut montrer qu'elle est plus importante dans la région p que dans la région n. Cette différence de gap favorise encore l'injection d'électrons par rapport à celle de trous. Le spectre (type de

longueur d'onde), c'est-à-dire la couleur du rayonnement émis par une diode électroluminescente, est évidemment conditionné par le gap du matériau de type p, dans lequel se produit l'essentiel des recombinaisons radiatives. Dans la mesure où certaines transitions mettent en jeu des niveaux d'impuretés, le spectre d'émission est aussi conditionné par le type de dopant. Les différents matériaux utilisés à l'heure actuelle permettent de couvrir pratiquement tout le spectre visible.

➤ **La diode laser**

Laser est l'acronyme anglais de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (en français, amplification de la lumière par émission stimulée de radiations). La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, elle est caractérisée par : une faible largeur spectrale et une bande passante importante. Le spectre est monomode longitudinal (voir figure I.6) [3].

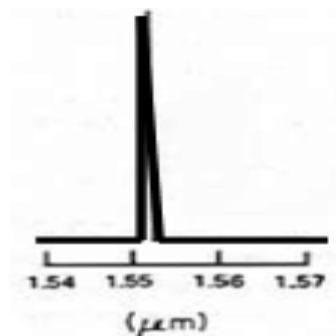


Figure I.6: Spectre d'émission d'un DL[3].

Le laser est composé de trois éléments essentiels (voir figure I.7) :

- Le milieu actif.
- La pompe : source énergétique qui réalise l'inversion de population.
- La cavité, limitée par deux surfaces, l'une réfléchissante presque à 100%, l'autre à 98% de façon à laisser sortir le faisceau laser [3].

Cette cavité forme, avec le milieu actif, un amplificateur

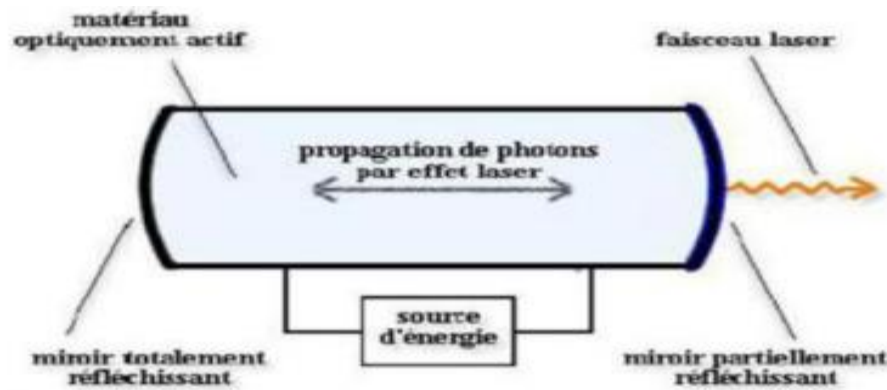


Figure I.7: Schémas de principe de laser [3].

Les lasers utilisent l'émission stimulée. On provoque, par l'intermédiaire d'un courant à haute densité, un important excès de porteurs qui rend possible une forte émission stimulée. Cet effet d'amplification est dû à une avalanche de photons [3].

La diode laser présente les caractéristiques suivantes :

- La source DL est cohérente et monochromatique.
- Largeur de spectre étroite, et la bande passante qui atteint quelques gigahertz.
- Diagramme de rayonnement directif (émissions se font dans la même direction).
- Utilisée dans les systèmes de transmission à grand distance.
- La densité de courant de seuil est de quelque dizaine de milliampères.

I.3.1.2 Le modulateur

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer cette information sur un signal physique à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation, qui est une fonction essentielle de tout système de transmission. Pour réaliser la modulation, on a deux possibilités :

➤ Modulation directe

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement : la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée modulation directe. Ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser. La modulation directe connaît

beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en œuvre. Un inconvénient majeur de cette méthode est que lorsqu'on module en amplitude le courant d'injection d'un laser cette opération s'accompagne d'une modulation de fréquence parasite ou chirp. Ces effets, conjugués à la dispersion chromatique de la fibre, provoquent un élargissement de l'impulsion d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande (voir figure I.8) [3].

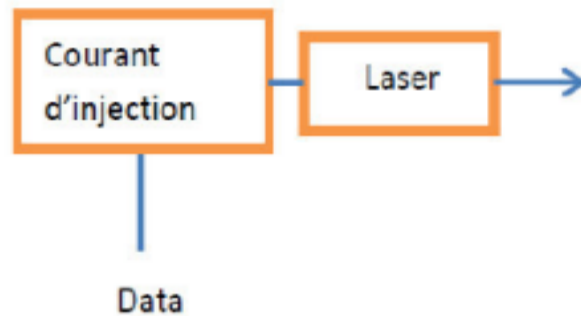


Figure I.8: Modulation directe [3].

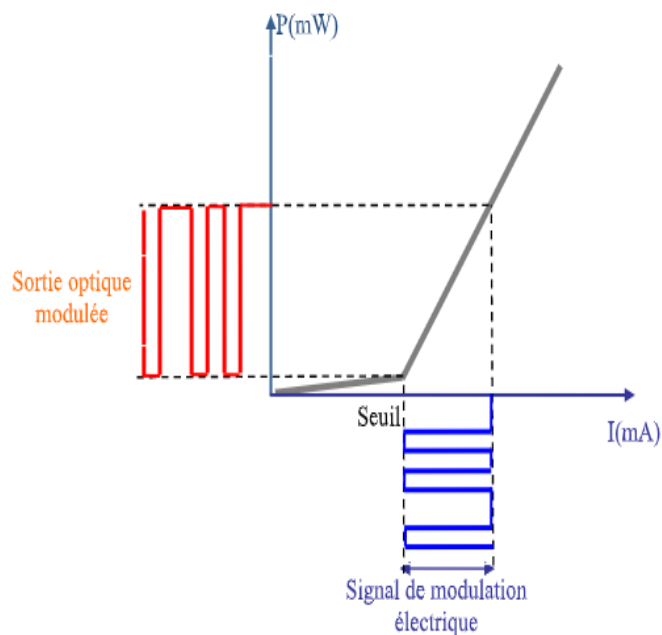


Figure I.9 : Modulation directe d'une diode laser [3].

➤ Modulation externe

Les propriétés des diodes lasers vues précédemment font que la modulation directe est satisfaisante jusqu'à 5 Gigahertz environ mais qu'au-delà, cette méthode n'est plus applicable.

Trop de dégradations (oscillations de relaxation, chirp, bruit, ...) apparaissent et limitent les capacités de transmission. La modulation externe est une bonne alternative permettant au laser d'émettre un signal constant. Et tous les défauts dus à la modulation du courant de polarisation seront atténués. Elle consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents sur le signal optique. La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable : le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe $v(t)$, modulée et représentative de l'information à transmettre. Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon $v(t)$. La modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc d'envoyer des débits plus élevés (voir figure I.9) [3].

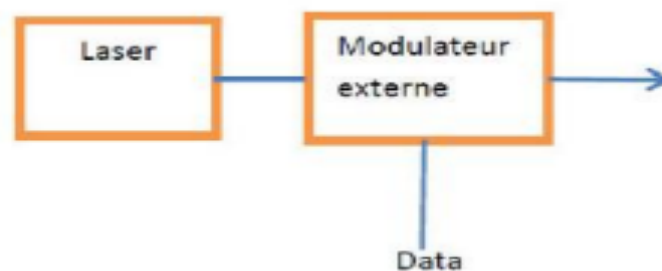


Figure I.10: Modulation directe [3].

Plusieurs types de modulateurs sont disponibles, en particulier nous nous intéresserons au modulateur Mach-Zehnder et au modulateur électro-absorbant.

- **Modulateur Mach-Zehnder**

Les effets électro-optiques sont la base de ces types de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique, variant selon la modulation des données [4].

Le modulateur Mach-Zehnder (MZM) est, dans sa version la plus simple, un interféromètre constitué généralement d'un bras de référence et d'un bras dans lequel une variation de phase est induite par effet électro-optique (variation de l'indice de réfraction du cristal). Ces deux

bras sont deux guides optiques parallèles et de longueurs égales. Si aucune tension n'est appliquée aux guides d'ondes, la lumière incidente est divisée de manière égale entre les deux bras de l'interféromètre. La recombinaison des ondes provenant des bras conduit à une figure d'interférence.

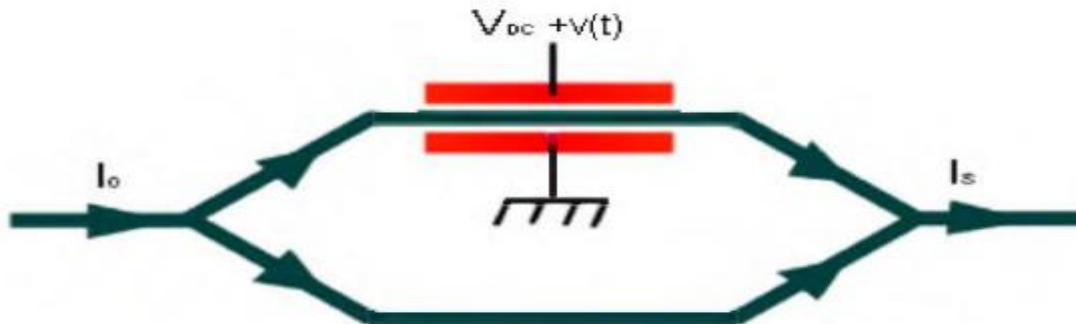


Figure I.11: Schéma simplifié d'un modulateur de Mach-Zehnder [4].

La technique utilisée pour moduler l'amplitude d'un faisceau consiste à lui faire traverser un interféromètre de Mach-Zehnder (Figure I.10) dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras.

La lumière est couplée dans deux guides par un embranchement en Y. Les deux faisceaux se recombinaient ensuite dans un deuxième embranchement en Y. L'indice de réfraction du matériau électro-optique, placé sur l'un des bras de l'interféromètre, est modifié par l'application d'une tension, entraînant ainsi un déphasage entre les deux faisceaux. Suivant leur différence de marche (phase relative), les deux faisceaux interfèrent de manière constructive (toute la puissance optique est disponible en sortie), ou destructive (aucune lumière n'est injectée dans le guide de sortie). Entre ces deux extrêmes, tous les états intermédiaires sont possibles et la modulation de la lumière reproduit celle de la tension appliquée.

L'absence de modulation de phase parasite évite ainsi tout problème de transmission lié au chirp.

L'interféromètre de MZM constitue donc un modulateur d'intensité. En utilisant ce type de composant, il est possible de réaliser un émetteur optique par modulation d'amplitude. L'intensité à la sortie peut être de façon générale, représentée par

Les modulateurs de Mach-Zehnder commercialisés sont en très grande majorité réalisés sur des substrats LiNbO₃ qui permettent de réaliser des guides à très faibles pertes (< 0,2 dB/cm) [4].

- **Modulateur Electro-absorbant (MEA)**

Le principe de fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur soumis à un champ électrique. Leur particularité intéressante est qu'ils peuvent être facilement intégrés avec les diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation. Les performances dépendent du matériau utilisé (massif ou à puits quantiques). Les dispositifs dont le guide est formé de puits quantiques permettent d'obtenir une efficacité d'électro-absorption par unité de longueur plus importante et une bande passante plus élevée mais ils demandent une tension de commande plus forte et sont plus sensibles à la polarisation de la lumière que les dispositifs dont le guide est formé de matériaux massifs.

Malgré la sensibilité à la polarisation, l'avantage de cette structure est de permettre d'associer sur un même substrat d'InP une diode laser fonctionnant en continu et un modulateur d'intensité.

Le modulateur électro-absorbant est transparent lorsqu'il reçoit une tension nulle et absorbant pour une tension négative. Le circuit de commande du modulateur va alors forcer le niveau haut des données à 0 Volt et le niveau bas à une valeur choisie selon l'extinction souhaitée.

I.3.2 Le Bloc Récepteur

Tout comme il existe plusieurs méthodes pour écrire l'information sur le signal lumineux, il existe différentes techniques pour la récupérer. Néanmoins, le photo détecteur est toujours nécessaire pour convertir le signal optique en électrique. Pour simplifier, nous pourrions le comparer à un compteur de photons et un générateur d'électrons. La première méthode de détection est appelée directe. Elle consiste en la conversion, grâce à une photodiode, des fluctuations de puissance optique porteuses de l'information en fluctuations de courant électrique. D'autres méthodes dites cohérentes (détecteurs hétérodyne et homodyne).

La détection directe permet d'extraire le signal qui module en amplitude une onde, on peut le redresser, ou plus généralement le faire passer dans un dispositif non linéaire, tel qu'une diode. Un signal basse fréquence, le signal modulant et des harmoniques sont alors émis. Les harmoniques peuvent être éliminées par filtrage, dans la mesure où la fréquence de l'onde porteuse est très grande devant la fréquence maximale du spectre du signal modulant. Ce procédé est classiquement appelé détection directe.

Le photodétecteur peut être réalisé soit par une diode PIN, soit une photodiode à avalanche (PDA). Le principe de fonctionnement reste inchangé, il permet de traduire le signal optique envoyé par la fibre optique en signal électrique, qui sera traité par des dispositifs électroniques [4].

➤ **Photodiode PIN**

Positive Intrinsèque Négative Photodiode cette photodiode, polarisée en inverse, est réalisée à partir de trois couches de semi-conducteur. Deux couches fortement dopées P+ et N+ entre lesquels existe une couche de grande résistivité (presque intrinsèque) où il existe très peu de charges mobiles. Les photodiodes PIN sont les plus utilisés car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante (voir figure I.11) [5].

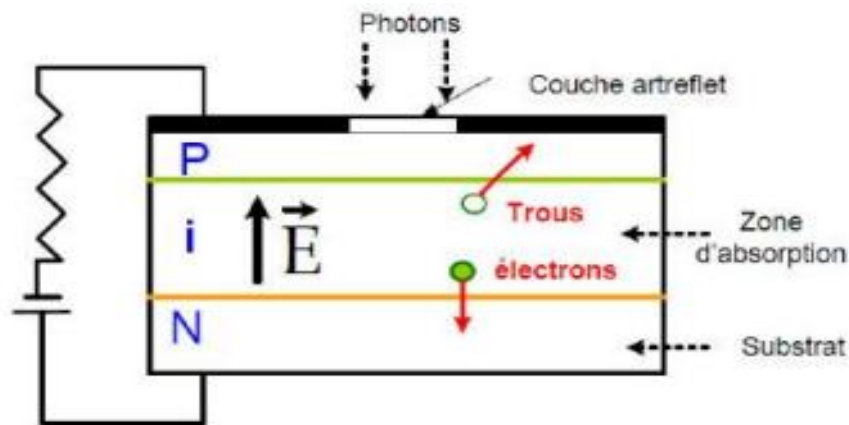


Figure I.12: photodiode PIN [5].

En transmissions optique les photo-détecteurs doivent :

- Offrir un bon couplage avec la fibre.
- Avoir une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement.
- Avoir une bande passante convenable.
- Avoir une faible exigence du point de vue tension de source.
- Pas d'influence des conditions extérieures sur les caractéristiques.
- Avoir une grande fiabilité (bon rendement quantique) et un faible coût.
- Avoir un temps de réponse très court et un faible bruit additionnel [5].

I.3.3 La Fibre Optique

Dans le système de première génération, il y avait des fibres multimodes et des diodes laser à $0,9\mu\text{m}$, leurs débit quelques Gb/S. Dans le système de seconde génération on trouve des fibres unimodales, diodes lasers à $1,3\mu\text{m}$, avec un débit de 10 Gb/S. Tant dit que dans la troisième génération, les diodes lasers à $1,5\mu\text{m}$, minimisation de l'atténuation, leur débit de 500 Gb/S. Et pour la quatrième et dernière génération, il y a la possibilité d'utiliser plusieurs longueurs d'onde simultanément avec un débit de 100000Gb/S [2].

I.3.4 Les Amplificateurs Optiques

Comme nous l'avons vu, les informations sont transmises sur de très longues distances. Elles sont soumises à de multiples effets décrits plus haut qui dégradent le signal (atténuation, élargissement, déphasage..). C'est pourquoi tout au long de la ligne des répéteurs sont positionnés afin de régénérer le signal (R), de le remettre en forme (2R) voir de le resynchronisé ou récupérer le rythme (3R). La plupart des lignes déjà installées possèdent des répéteurs purement électroniques. Le signal est donc converti (optique-électrique O/E) remis en forme, re-synchronisé, etc. Et reconvertir électrique-optique (E/O). Ce type de répéteurs emploie des circuits électroniques ultra rapides, donc très coûteux et complexes à mettre en œuvre, pour pouvoir gérer le nombre de canaux qui croît régulièrement pour augmenter les débits de transmission, surtout à de telles vitesses de fonctionnement. Les systèmes actuels utilisent dorénavant, des répéteurs purement optiques, facile à mettre en œuvre et permettant d'effectuer cette tâche à la « vitesse optique ». La remise en forme et la régénérescence du signal, sera faite par un amplificateur optique à l'aide d'une fibre dopée à l'erbium, la resynchronisation par l'emploi de fibre de compensation.

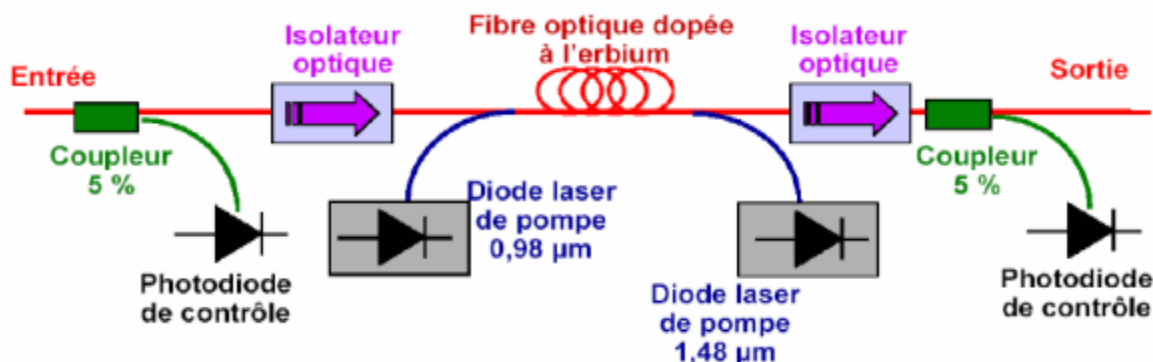


Figure I.13: exemple d'un amplificateur optique [6].

I.3.5 L'amplificateur électrique

Le courant émis par la photodiode est faible. Ainsi, un pré-amplificateur est couramment utilisé pour augmenter l'amplitude du signal de sortie [4].

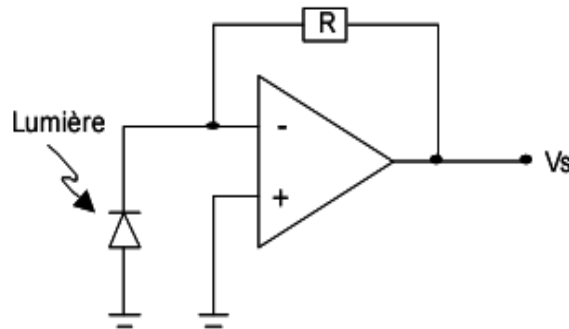


Figure I.14: Structure d'un amplificateur.

I.3.6 Le filtrage

Le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait. Le courant photodéecté est affecté par des bruits qui contribuent à dégrader les performances des systèmes de communication.

Afin de minimiser le bruit en sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande la plus petite possible, tout en ne créant pas d'interférences inter symboles. On utilise le filtre de Nyquist dont la largeur de bande de bruit, dans les conditions habituelles, vaut approximativement $\Delta F = 0.8 \times F_r$, avec F_r , la fréquence rythme du signal [4].

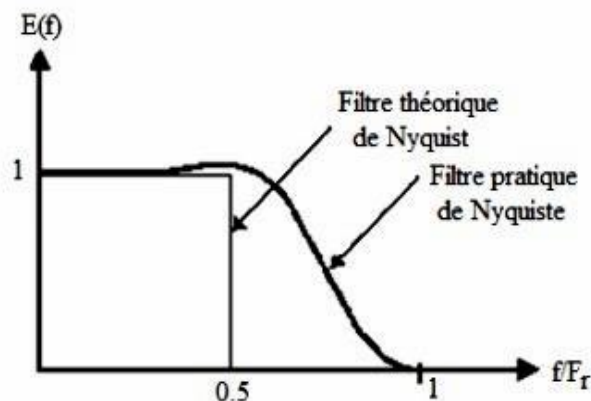
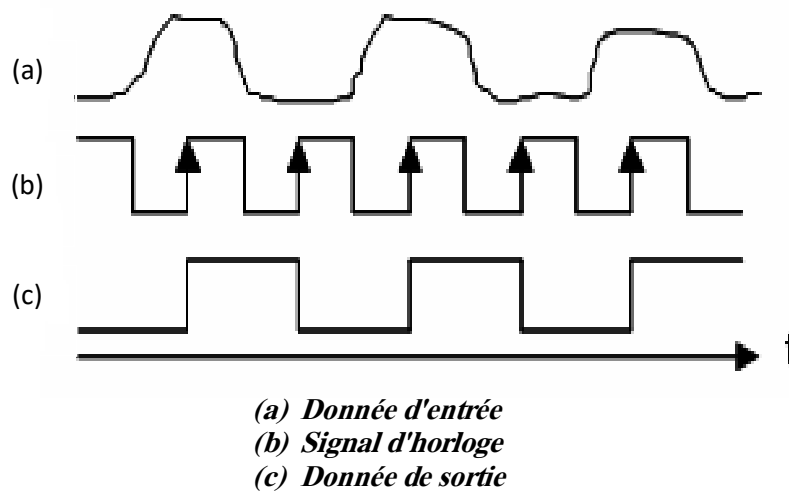


Figure I.15: Réponses fréquentielles du filtre.

I.3.7 Circuit de décision

Pour une récupération parfaite des données transmises, une remise en forme du signal détecté est donc nécessaire en utilisant un bloc de décision composé d'un détecteur à seuil et d'un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation. Leur tâche est de comparer le signal de données à un certain seuil d'amplitude, puis de décider le niveau correspondant du signal (« bit 1 » ou « bit 0 »), et ceci à chaque front d'horloge. Ainsi, le signal d'entrée de la bascule, qui est en réalité le signal de sortie après la détection par le photodétecteur, doit avoir une amplitude assez élevée pour la fonction de « décision » [14].

L'horloge doit être synchronisée sur le signal incident. Cette récupération de rythme est effectuée grâce à une boucle à verrouillage de phase classique.

*Figure II.16: Présentation temporelle de la régénération des données d'entrée.*

I.3.8 Les Fibres de Compensation

La dispersion chromatique peut être compensée par un dispositif créant des fonctions de transfert inverse de celle d'une fibre standard, tel que les fibres à compensation de dispersion (DCF, Dispersion Compensative Fiber).

Elle consiste alors à introduire un tronçon de longueur adapté de cette fibre dont la dispersion est de signe opposé par rapport à celle de la fibre de ligne. La DCF est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux éléments extérieurs, son avantage majeur est son caractère large bande, mais elle présente aussi des inconvénients comme les pertes linéiques non négligeables [2].

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement le système de télécommunication par fibre optique. Tous d'abord nous avons commencé par les différents types de réseaux puis on a expliqué le principe de l'émetteur et celui du récepteur optique. Après nous avons présenté la fibre optique sa structure, le principe de propagation dans la fibre et les différents types de fibres optiques. Enfin, nous avons évoqué les principales caractéristiques de la fibre optique. A l'heure actuelle, c'est la dispersion chromatique de la fibre et non pas l'atténuation et le facteur limitant de la transmission de signaux à haut débit sur de longues distances. Ce phénomène sera détaillé dans le prochain chapitre.

Chapitre II :
Généralité sur les fibres optiques et réseau de Bragg

II.1 Introduction

Les systèmes de communication à fibres optiques affectent désormais nos vies comme l'électronique et les ordinateurs, les fibres optiques présentent de nombreux avantages tels qu'une faible perte et un poids léger, mais la caractéristique importante est sa très large bande passante, qui atteint des milliers de milliards de bits par seconde, les fibres optiques ont occupé une place dans le domaine des communications, car elles ont remplacé les fils de cuivre, la technologie de la fibre optique s'est développée rapidement au cours des dernières décennies, ce qui la rend compétitive par rapport aux autres moyens de communication.

II.2 La Fibre Optique

Une fibre optique est un guide d'onde cylindrique et diélectrique aussi fin que des cheveux humains, constitué de matériaux à faible perte tel que verre de silice ; dans sa forme la plus simple, elle se compose d'une partie centrale appelée le cœur, d'indice de réfraction n_1 , et d'une gaine optique, d'indice de réfraction n_2 , entourée par un revêtement protecteur pour le protéger des dommages environnementaux et mécaniques [7].

Le guidage de la lumière dans la fibre se fait par la réflexion totale interne. Cela n'est garanti que si deux conditions sont réunies ; la première condition est que le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui du cœur, la deuxième condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique (ON) [8] :

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

II.3 Structure de la fibre optique

Les fibres optiques sont de longs poils en verre d'une grande pureté, ces poils sont alignés ensemble dans un faisceau appelé câble figure (II.1).

La fibre optique se compose de trois parties principales comme suit :

Le cœur : C'est du verre ultra clair (cylindrique) et représente le chemin dans lequel la lumière se déplace.

La gaine : Une substance qui entoure le noyau de verre et agit en sens inverse Retour de la lumière au centre de la fibre optique.

La protection : Une pellicule plastique protège la fibre Les dommages Visuels et la casse

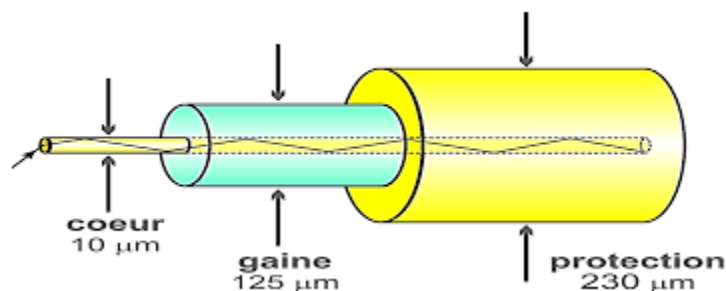


Figure II.1. Schéma d'une fibre optique [8].

II.4 Evolution de la transmission de signaux par fibre optique

Au début des années 50, l'idée de transmettre des signaux à haut débit en utilisant des porteuses dans la région optique était déjà établie. Malheureusement, à cette époque-là, n'étaient disponibles ni la source de lumière ni le milieu de transmission appropriés. En 1970, suite à l'invention de la diode laser, l'attention des chercheurs s'est focalisée dans le développement d'un milieu de transmission adéquat.

Au début des années 70, le concept de confinement de la lumière ainsi que la possibilité d'utiliser des fibres optiques comme milieu de transmission étaient largement diffusés. Le seul problème qui restait à résoudre était haut niveau de pertes de propagation qui, à l'époque, montait jusqu'à 1000dB/km.

A la fin des années 70, deux événements ont beaucoup favorisé le développement des systèmes de communication par fibre optique. D'une part, la première diode laser à l'arséniure de gallium a été réalisée. D'autre part, des fibres optiques avec pertes d'insertion de l'ordre de 20dB/km pour des longueurs d'onde proches du micron ont été fabriquées.

La première génération commerciale de systèmes de communications à fibre optique a été disponible en 1980. A cette époque, la transmission se faisait par fibre multimode en silice, la longueur d'onde utilisée était de $0.8 \mu m$ et le débit de transmission était de 45Mb/s.

Une deuxième génération de systèmes à fibres optiques utilisant la longueur d'onde de $1.3 \mu m$ est apparue au début des années 80, l'avantage le plus important était la plus faible atténuation ($\approx 1dB/km$). Malheureusement, le débit de transmission était limité aux alentours de 100Mb/s. cette limitation était due à la dispersion intermodale des fibres multimodes.

Quelques années plus tard, le débit de transmission a pu être augmenté grâce à l'utilisation de fibres monomodes.

La fibre monomode de silice présente une atténuation d'environ 0.6 dB/km à la longueur d'onde de 1.3 μm , valeur de longueur d'onde où la fibre manifeste précisément le niveau de dispersion le plus faible. D'autre part, le niveau d'atténuation le plus bas (0.2 dB/km) se présente près d'une longueur d'onde de 1.55 μm [18].

II.4.1 Le principe de propagation de la lumière dans une fibre optique

La vitesse de la lumière dépend du matériau ou du milieu à travers lequel elle se déplace. Dans l'espace libre, la lumière se déplace à sa vitesse maximale possible, soit 3×10^8 m/s. Lorsque la lumière traverse un matériau, elle présente certains comportements expliqués par les lois de la réflexion, de la réfractionetc. Avant d'étudier comment la lumière se propage réellement à travers la fibre, ces lois doivent être expliquées [19].

- **L'indice de réfraction** : Est une grandeur qui caractérise les propriétés optiques d'un matériau, on peut définir cette grandeur par :

$$\eta = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad \text{II.2}$$

Où

ϵ_r : La permittivité relative du milieu.

μ_r : La perméabilité relative du milieu.

- **Réflexion** : La loi de réflexion stipule que lorsque le rayon de lumière est incident sur une surface réfléchissante à un angle d'incidence i_1 par rapport à une normale, le rayon sera réfléchi à partir de la surface à un angle i'_1 par rapport à la normale qui est égal à l'angle d'incidence ($i_1 = i'_1$).

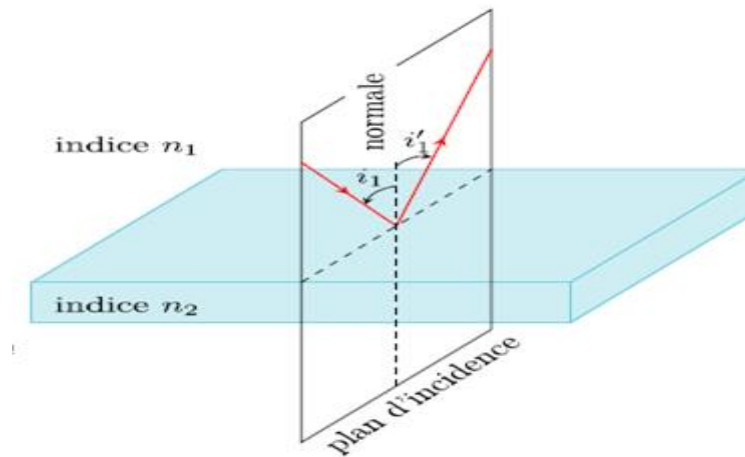


Figure II.2. Principe de réflexion [19].

- **Réfraction** : La réfraction se produit lorsque le rayon lumineux passe d'un milieu à un autre, c'est-à-dire que le rayon lumineux change de direction à l'interface. La réfraction se produit chaque fois que la densité du milieu change.

L'expérience montre que la réfraction obéit aux lois suivantes :

- Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale à la surface sont dans le même plan d'incidence.

Les angles d'incidence i_1 et de réfraction i_2 sont liés par la loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad \text{II.3}$$

Si $n_2 > n_1$, on dit que le milieu (2) est plus réfringent ; en passant du milieu (1) au milieu (2), la lumière s'approche alors de la normale.

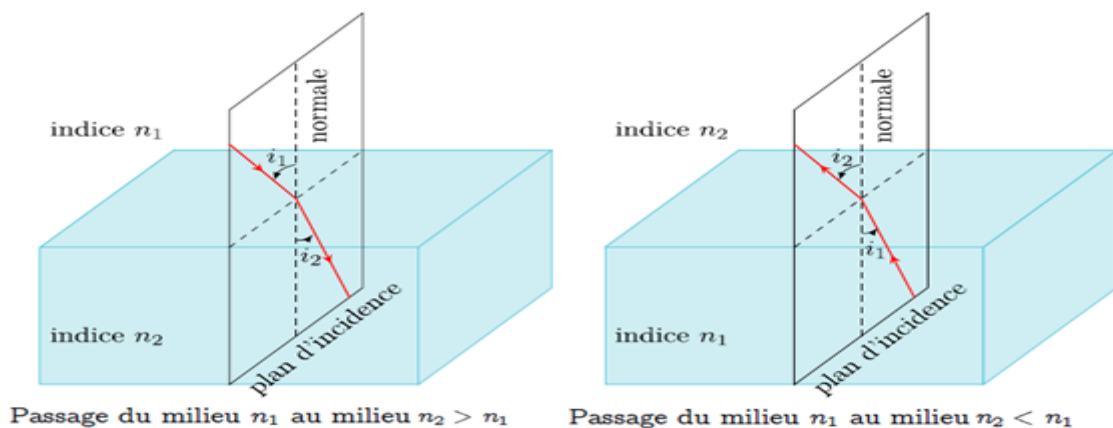


Figure II.17. Principe de réfraction [19].

- Les valeurs de l'angle réfracté i_2 sont liées à celles de i_1 et de n_2/n_1 . Il s'en suit plusieurs conséquences :
 - Réfraction limite : Propagation vers un milieu plus réfringent, Le rayon réfracté $i_2 < i_1$ existe et atteint une valeur limite donnée par $i_1 = 90^\circ$ et $\sin i_{2l} = n_1/n_2$.

Réflexion totale : Propagation vers un milieu moins réfringent (Si $n_2 < n_1$), le rayon réfracté s'éloigne de la normale. Il existe alors un angle limité d'incidence i_l tel que

$\sin i_l = n_2/n_1$ et tel que $i < i_l$ le rayon réfracté disparaît ; seul le rayon réfléchi existe : on parle alors de réflexion totale car toute l'énergie se retrouve dans le rayon réfléchi.

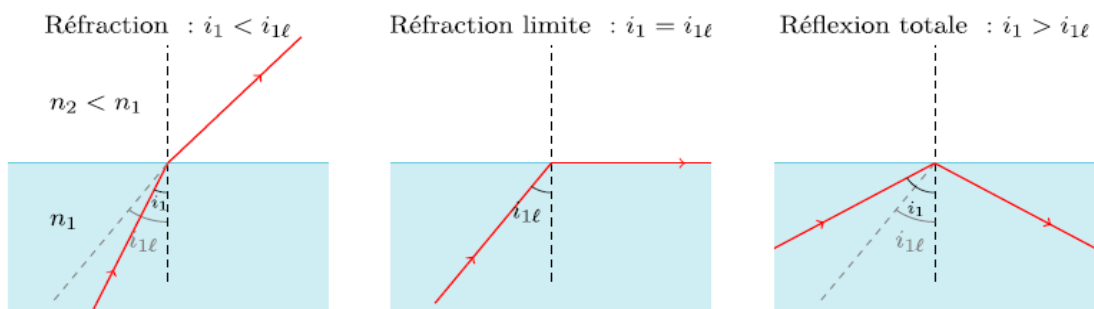


Figure II.18 : Phénomène de réflexion totale [19].

II.4.2 Principe de guidage dans les fibres et ouverture numérique

Les propriétés guidantes d'une fibre optique reposent sur le principe physique de la réflexion totale interne décrite précédemment (figure II.5). Le cœur et la gaine de la fibre optique ont des indices de réfractions différents. Ainsi pour qu'il y ait propagation de la lumière, l'indice de réfraction du cœur de la fibre doit être plus grand que celui de la gaine de sorte que l'on retrouve un effet miroir à l'intérieur de la gaine. La lumière est donc confinée à l'intérieur du cœur. Pour avoir une propagation de la lumière sans perte dans la fibre optique, tous les rayons lumineux heurtant l'interface entre le cœur et la gaine devra respecter la condition de réflexion totale interne [19].

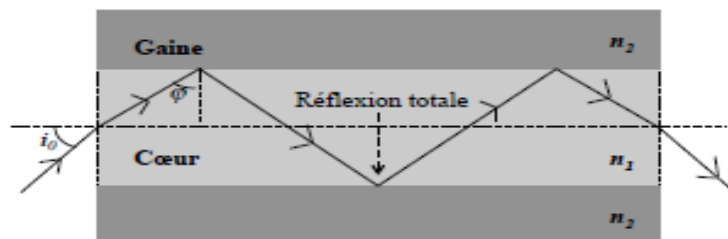


Figure II.19. Principe du guidage dans la fibre optique par réflexion totale interne [19].

Si l'on considère un rayon incident sur le cœur de la fibre optique avec un angle d'injection θ_0 , il existe un angle d'injection maximal $\theta_{0\max}$, au-delà duquel les rayons ne sont plus guidés dans la fibre (figure II.5). On passe de la réflexion totale à la réfraction. La condition d'injection est $\theta_0 < \theta_{0\max}$. En tenant compte des lois de Descartes cet angle est :

$$\eta_0 \cdot \sin \theta_{0\max} = \eta_1 \cdot \sin \theta_c = \eta_1 \cdot \cos \phi_{\min} = \eta_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right)^2} \quad \text{II.4}$$

Une caractéristique très importante des fibres optiques est l'ouverture numérique ON définie par:

$$\text{ON} = \sin \theta_{0\max} = \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2} = \eta_1 \sqrt{2\Delta} \quad \text{II.5}$$

$$\Delta = \frac{\eta_1^2 - \eta_2^2}{2\eta_1^2} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} \quad \text{II.6}$$

Avec Δ est la différence d'indice relative

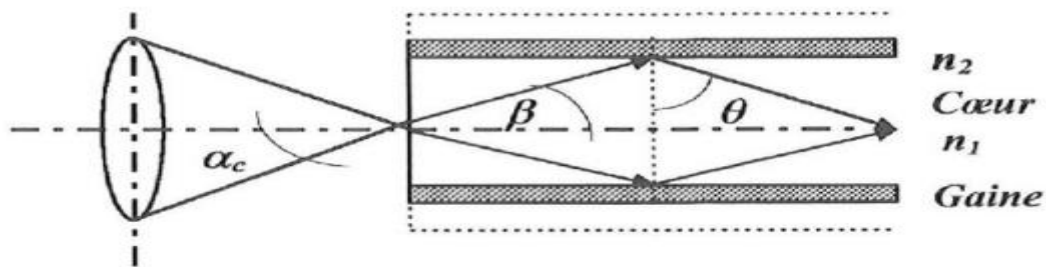


Figure II.20: Cône d'acceptance [18].

Le faisceau 1 entre dans la fibre avec un angle supérieur à celui du cône d'acceptance, il atteint l'interface cœur-gaine avec un angle inférieur à l'angle critique, il est donc réfracté dans la gaine et perdu. Tous les faisceaux à l'intérieur du cône (faisceaux 2 et 3, par exemple) subissent la réflexion totale interne et sont donc guidés [18-19].

II.5.Types des fibres

Les fibres optiques peuvent être classées selon leur diamètre et leur longueur d'onde en deux catégories principales, multimode et monomode.

II.5.1 Fibres multimodes

La fibre multimode présente l'avantage de transférer plusieurs modes (trajets lumineux), dans cette famille, on retrouve deux sous-catégories.

➤ Fibres optiques à saut d'indice

Ces fibres se distinguent par le grand diamètre du cœur et la grande ouverture numérique qui permet l'entrée d'une grande quantité de lumière sur la fibre optique, utilisée pour transférer des informations sur une courte distance et une bande passante limitée, et son coût est faible, figure (II.7).

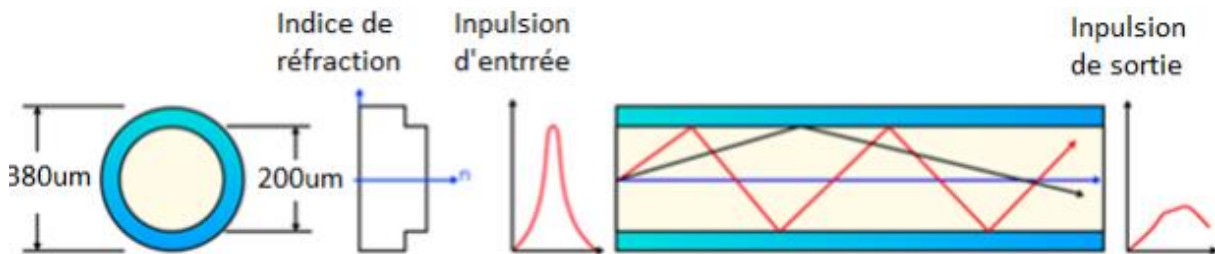


Figure II.21: Fibre à saut d'indice [8].

➤ Fibres optiques à gradient d'indice

Le cœur se caractérise par un indice variable qui augmente progressivement de n_1 à l'interface gaine-cœur jusqu'à n_2 au centre de la fibre, ils sont utilisés pour des distances moyennes et une bande passante moyenne - élevée. (Figure. II.8).

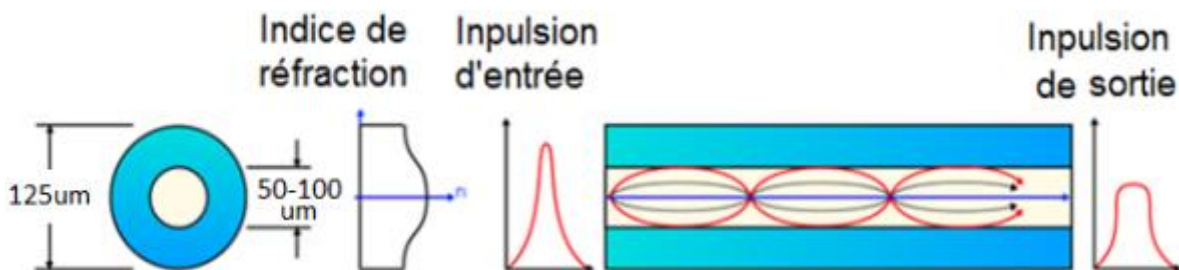


Figure II.22: Fibre à gradient d'indice [8].

II.5.2 Fibres monomodes

Un seul signal optique est transmis dans chaque fibre de la fibre du faisceau, ces fibres monomodes sont caractérisées par un diamètre de cœur de seulement quelques micromètres. L'onde se propage sans réflexion, les pertes sont donc minimales et il n'y a pas de dispersion modale, il est utilisé dans les réseaux téléphoniques. (Figure. II.9).

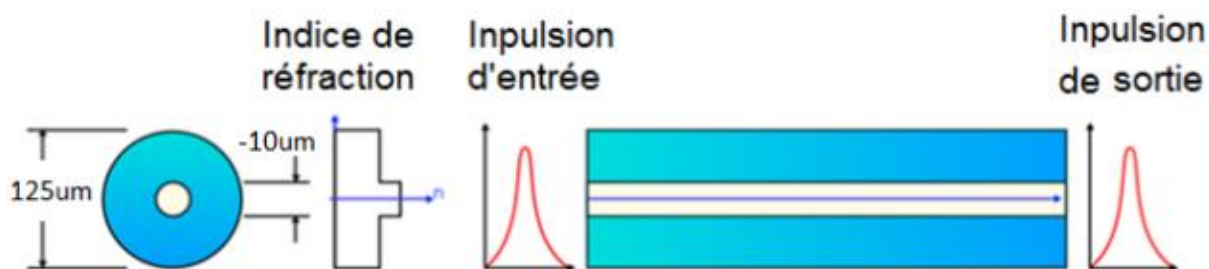


Figure II.23: fibre monomode [8].

II.6. Les avantages de la fibre optique

Les fibres optiques ont des avantages sur les autres systèmes utilisés dans Le domaine des communications est l'un de ces avantages :

- ✓ La compatibilité avec la technologie numérique.
- ✓ La fibre optique offre des débits 100 fois plus élevés que le réseau actuel en cuivre.
- ✓ Le taux T/N est possiblement 10 (GB/sec) sur la fibre optique mais 1 (GB/sec) sur le câble coaxial.
- ✓ Elle permet de transporter une grande quantité de données sur de très longues distances, sans atténuation significative du signal.
- ✓ La fibre fournit un moyen de transmission extrêmement sécurisé, car il n'y a aucun moyen de détecter les données transmises.
- ✓ Aucune interférence électromagnétique.
- ✓ En raison de la très petite taille, du poids léger et de la grande flexibilité.
- ✓ Manque de signaux électriques dans la fibre, donc il ne cause pas dangers.

II.7 Système WDM

Cette partie vise à présenter une vue générale sur la technique de multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing). Le multiplexage à répartition de longueur d'onde WDM consiste à utiliser des longueurs d'ondes légèrement différentes (couleur différente) pour transmettre différents signaux sur une même fibre (figure II.10). Cette technologie a permis d'augmenter le débit de transmission dans les liens point à point. Plusieurs signaux générés indépendamment dans le domaine électronique sont convertis vers le domaine optique en utilisant des diodes lasers de différentes longueurs d'onde mais assez proches. Les signaux résultants sont ensuite multiplexés et couplés à une fibre optique

[9]. Le récepteur ou le nœud de répartition n'aura qu'à démultiplexer le signal pour obtenir les divers canaux de départ. Afin d'augmenter la capacité totale d'un système WDM, il est possible de jouer sur le débit transporté par chaque canal ou sur le nombre de canaux.

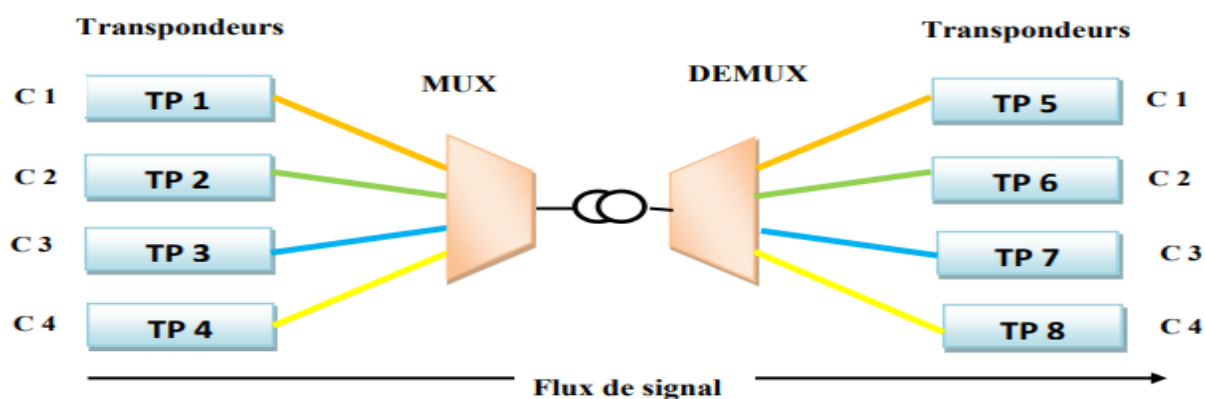


Figure II.24: Schéma de principe du multiplexage WDM [10].

Les premiers systèmes WDM apparus vers 1995 offraient des débits de 10 Gbit/s (soit 4canaux multiplexent sur la bande C ayant une capacité nominale de 2,5 Gbit/s), le premier réseau long distance à avoir bénéficié de cette technique est le réseau sous-marin Sea-MeWe3 mis en service en 1998 avec un débit de 20 Gbit/s (soit $8 \times 2,5$ Gbit/s) [10].

L'avantage de la technique WDM est qu'elle ne dépend pas de la vitesse des équipements électroniques. Mais le nombre de longueurs d'onde qu'une fibre peut transporter est borné : d'une dizaine de longueurs d'ondes il y a quelques années, on est passé à plusieurs centaines aujourd'hui. De plus, en WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissants avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux [11].

II.8. Problèmes de transmission

II.8.1 L'atténuation

L'atténuation dans les fibres résulte de plusieurs mécanismes, toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement, aux basses longueurs d'onde, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes, les impuretés sont aussi des sources de pertes non négligeables, le signal subira des pertes supplémentaires à chaque connexion entre fibres (pertes par connecteur), ces pertes engendrent l'atténuation de

la puissance lumineuse lors de sa propagation, la figure (II.11) représente l'atténuation dans la Fibre optique.

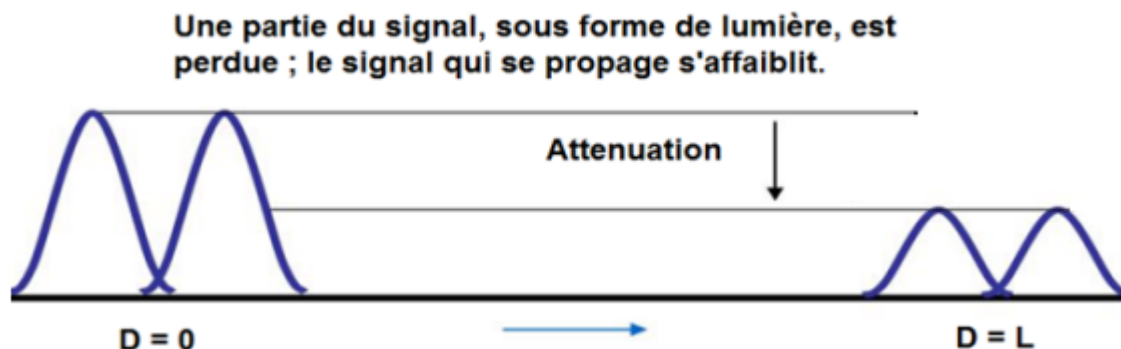


Figure II.25: L'atténuation dans la fibre optique [15].

Soient P_0 et P_L les puissances à l'entrée et à la sortie d'une fibre de longueur (L). L'atténuation linéaire se traduit alors par une décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la longueur de fibre (Loi de B er-Lambert) :

$$P_L = P_0 \cdot e^{-\alpha L} \quad \text{II.7}$$

O  : α est le coefficient d'atténuation linéaire. On utilise souvent le coefficient $\alpha(\text{dB})$ exprimé en (dB/km) : $\alpha(\text{dB}) = 4,343 \alpha$.

L'atténuation va varier suivant la longueur d'onde, la diffusion Rayleigh limite ainsi les performances dans le domaine des courtes longueurs d'onde.

Tableau II.1 : L'atténuation va varier suivant la longueur d'onde [16].

Année	Pertes (dB/km)	Longueur d'onde (nm)
1970	20	
1974	2-3	1060
1976	0.47	1200
1979	0.20	1550
1986	0.154	1550
2000	0.1484	1570

II.8.2 La dispersion chromatique

La dispersion chromatique est l'étalement ou l'élargissement du domaine temporel des impulsions lumineuses du signal de transmission. Le temps mis par un signal pour parcourir l'unité de longueur (L), dépend de la longueur d'onde (λ).

Deux longueurs d'ondes différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse. Ce qui a pour effet d'introduire des distorsions dans le signal transmis en bout de fibre. (figureII.12).

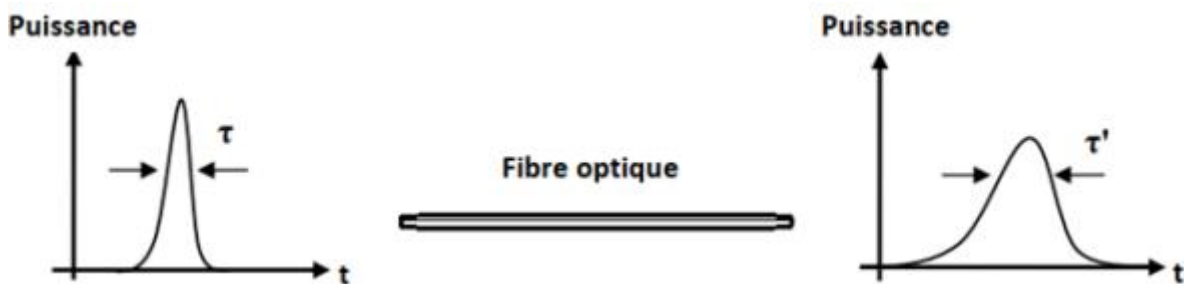


Figure II.26: La dispersion d'une fibre optique [15].

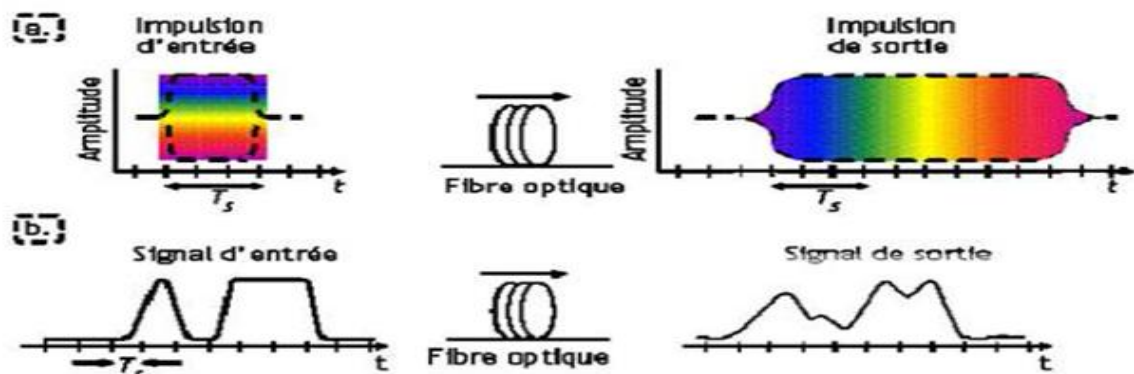


Figure II.27: Impact de la dispersion chromatique sur un signal optique :

(a)représentation spectral ; (b) représentation temporelle.

Le paramètre de dispersion chromatique est défini comme la dérivée du temps de Propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km, il peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \cdot \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \tag{II.8}$$

On le donne généralement en [Ps/(nm.km)]

La dispersion chromatique résulte des deux sources, la figure (II.13) montre les différents types de dispersion.

II.8.2.1 La dispersion matériaux (on ne peut pas le changer)

Elle trouve son origine dans la dépendance fréquentielle de la réponse des électrons de valence du matériau diélectrique (silice) soumis à un champ optique excitateur, cette réponse dynamique se traduit par une dépendance fréquentielle de l'indice de réfraction du matériau. Cette dépendance de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde induit une modification de la vitesse de groupe propre au milieu et doit être incluse dans les lois de propagation de la lumière dans le guide [13].

La dispersion du matériau est :

$$D_{\text{mat}} = \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$$

II.9

On le donne généralement en [(Ps / nm.km)]

La figure (II.14) illustre la variation de la dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde.

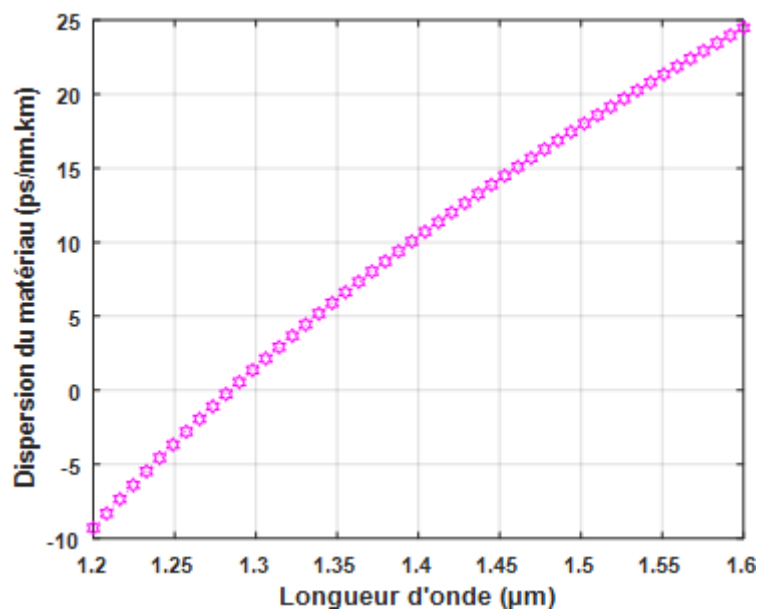


Figure II.284: Dispersion du matériau en fonction de la longueur d'onde.

Nous intéressons à la dispersion de la silice qui est le matériau utilisé pour fabriquer les fibres optiques. La dispersion de la silice est une fonction continûment croissante. Elle est

fortement négative aux courtes longueurs d'onde car la courbure de l'indice est significative dans cette zone spectrale.

II.8.2.2 La dispersion de guide

De la distribution d'énergie de la fibre dépend de longueur d'onde, la dispersion du guide d'onde est particulièrement importante pour les fibres monomodes.

Le fait que les ondes se propagent dans un guide et non dans un milieu illimité entraîne une dépendance de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde, cette influence du guidage correspond à une nouvelle contribution à l'évolution spectrale des temps de groupe [16].

La dispersion de guide d'onde liée à la structure géométrique du guide d'onde, elle résulte de la variation de la constante de propagation β avec la fréquence normalisée V (qui dépend-elle même de la longueur d'onde λ) ; la dispersion du guide est toujours négative et dépend des paramètres de la fibre [16].

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

$$D_g = -\frac{n_1 \Delta}{c \lambda} \cdot v \frac{d^2(vb)}{dv^2} \quad \text{II.10}$$

On le donne généralement en [$\text{Ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$]

$$\text{où : } \Delta = \frac{n_1 n_2}{n_1} \text{ et } \frac{d^2(vb)}{dv^2} \approx 0.08 + 0.5439(2.834 - v^2)$$

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

Δ : est la différence d'indice.

V : La fréquence spatiale normalisée.

En combinant les équations (Dm) et (Dg), la dispersion chromatique s'écrit sous la forme suivante :

$$D_{\text{chrom}} = \frac{n_1 \Delta}{c \lambda} \cdot v \frac{d^2(vb)}{dv^2} - \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \quad \text{II.11}$$

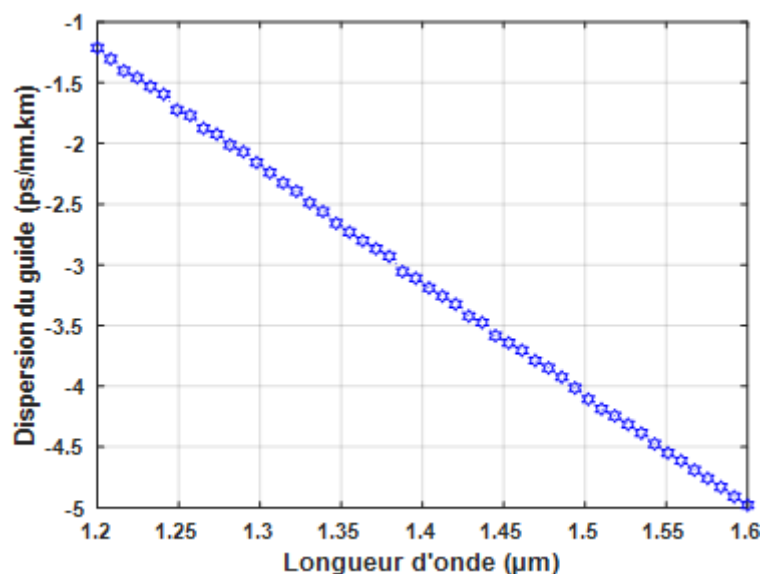


Figure II.29: Dispersion du guide en fonction de la longueur d'onde.

Les deux types de dispersion, guide et matériau, se compensent ainsi exactement à la longueur d'onde de 1310nm donnant ainsi une dispersion chromatique nulle pour cette longueur d'onde, ce qui est le principal avantage à travailler dans la seconde fenêtre de transmission (Figure II.16).

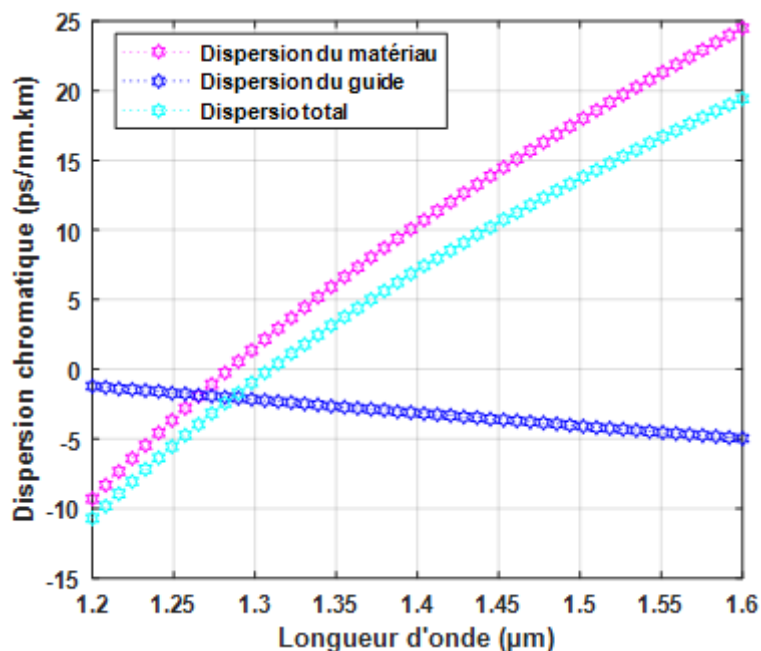


Figure II.16: Dispersion du guide, du matériau et dispersion chromatique d'une fibre optique.

II.8.3 La biréfringence

La biréfringence dans les fibres est une notion très importante dans le domaine des capteurs à fibres optiques. Elle est à la base de nombreuses applications [21].

Elle est toujours associée à celle d'état de polarisation qui est décrit par la direction moyenne du vecteur champ électrique. Une modification ou une variation de biréfringence entraîne une évolution de l'état de polarisation incident, d'où la nécessité de bien connaître les différents mécanismes de la biréfringence [22].

Les capteurs à fibres optiques "intrinsèques" où la fibre est l'élément sensible à une grandeur physique extérieure (pression, température ...), font appel non seulement, aux biréfringences induites par la grandeur en question mais aussi aux biréfringences internes ou intrinsèques, c'est à dire qui sont propres à la fibre (généralement introduites volontairement lors de la fabrication) [23].

La biréfringence de phase est définie comme la différence entre les constantes de propagation des deux états de polarisation β_y et β_x , elle est traditionnellement notée B_θ . Elle peut s'exprimer en fonction des indices effectifs, $n_{eff,y}$ et $n_{eff,x}$, vus par les champs électriques respectifs des deux états de polarisation :

$$B_\theta = \frac{|\beta_y - \beta_x|}{k_0} = |n_{eff,y} - n_{eff,x}| \quad \text{II.12}$$

Avec

k_0 le module du vecteur d'onde dans le vide.

II.8.4 La dispersion de polarisation (PMD)

En plus de la dispersion chromatique, il existe aussi une autre forme de dispersion qui perturbe la propagation des signaux dans une fibre optique : la dispersion de polarisation. L'origine de la PMD vient du fait que le mode fondamental (LP_{01}) d'une fibre monomode est une combinaison de deux modes électromagnétiques notés LP_{01}^x et LP_{01}^y qui ne se propagent pas à la même vitesse de groupe dans la fibre si celle-ci présente une biréfringence résiduelle de forme ou de contrainte (figure II.17) [24].

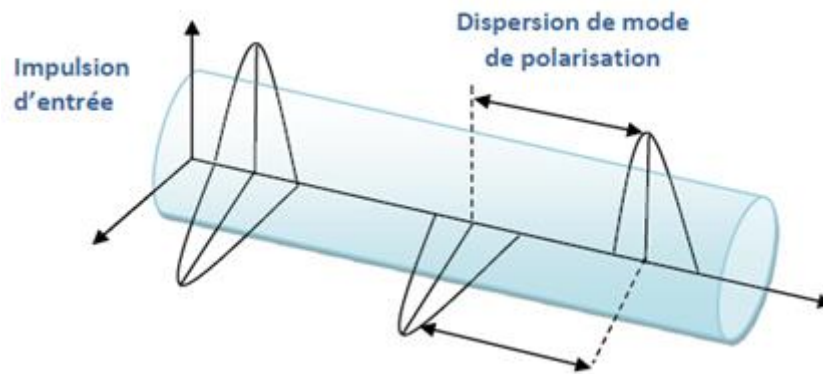


Figure II.17: Effet de la PMD sur le mode

La valeur de cette dispersion est faible devant la dispersion chromatique. Pour les fibres standards, la PMD est typiquement de l'ordre de $0,05 \text{ ps/km}^{1/2}$.

II.8.5 La dispersion modale

Ce type de dispersion se produit car les différents types de fibres ont plusieurs modes la vitesse de groupe appropriée, et donc après un certain temps de propagation, différentes situations seront compensées les unes pour les autres, ce phénomène n'est visible que dans les fibres optiques de basemultimodes, on ne le trouve pas dans les fibres monomodes où le noyau est très mince.

II.8.6 Dispersion intermodale

La cause principale de l'élargissement des impulsions dans les fibres optiques multimodes est la dispersion intermodale. Cet élargissement est provoqué par les différences des temps de parcours des rayons (ou des modes). La dispersion intermodale D_i est l'élargissement temporel maximum τ d'une impulsion par unité de longueur de fibre [25].

$$D_i = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} = \frac{\tau}{L} (\text{ps/km}) \quad \text{II.13}$$

Avec t_{\max} et t_{\min} respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide. Dans une fibre à saut d'indice, le rayon le plus rapide est celui dont le trajet est parallèle à l'axe de la fibre. Ce rayon est associé à l'angle θ égale à 0 et au mode appelé

(mode fondamental). De même, le rayon le plus lent fait un angle par rapport à l'axe de la fibre avec θ_{\max} défini par :

$$\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}}{\eta_1}\right) \quad \text{II.14}$$

Avec

$$\tau = t_{\max} - t_{\min} = \eta_1 \cdot t_{\min} \cdot \Delta \quad \text{II.15}$$

$$\Delta = \frac{\eta_1^2 - \eta_2^2}{2 \cdot \eta_1^2} \quad \text{II.16}$$

Finalement on exprime la dispersion intermodale par :

$$D_i = \frac{\eta_1 \cdot \Delta}{c} \quad \text{II.17}$$

L'obtention d'une dispersion intermodale réduite se fait en minimisant Δ ou en utilisant une fibre à gradient d'indice. En effet, dans ce cas-là, l'indice de réfraction η_1 du cœur décroît avec le rayon de celui-ci de sorte que les rayons axiaux (à trajet court) voient un indice élevé (leur vitesse c/η est alors réduite) tandis que les rayons périphériques (à trajet long) voient un indice plus bas.

Dans le cas d'une fibre optique monomode, cette dispersion est nulle et ne sera donc pas prise en compte.

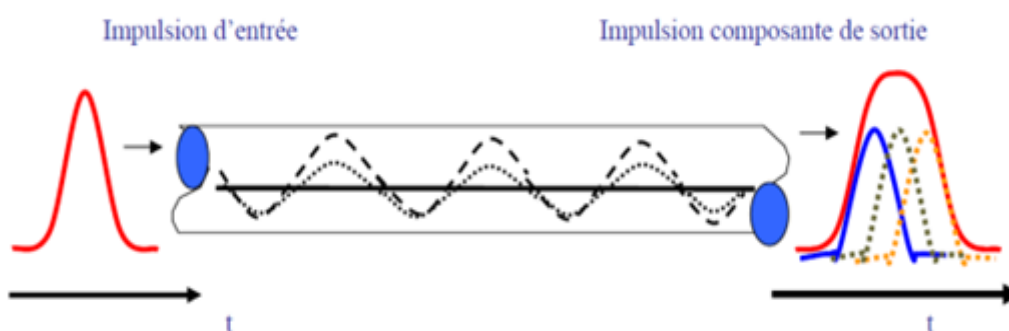


Figure II.30: Le phénomène de dispersion intermodale [25].

II.8.7 Pertes extrinsèques

Les pertes extrinsèques sont des pertes dues aux conditions d'utilisation et de fabrication des fibres. Il y a principalement deux types de pertes : celles qui sont dues à la

pose de la fibre (courbures et micro courbures) et celles qui sont dues à la nécessité de raccorder plusieurs fibres pour couvrir de longues distances [26].

➤ **Les pertes par courbure**

Lorsqu'on courbe la fibre, une partie de l'énergie lumineuse peut échapper au se perdre dans la gaine. Ce phénomène s'appelle pertes par courbure [26].

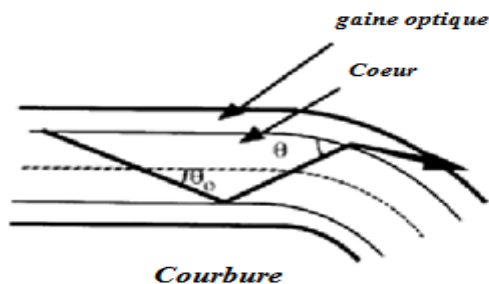


Figure II.19: Perte par courbure [26].

➤ **Les pertes par micro-courbure**

Les pertes par courbure sont souvent négligeables en pratique, mais les pertes par micro courbures peuvent augmenter l'atténuation de manière significative si on ne prend pas les précautions nécessaires lors de la fabrication et de la manutention des câbles (figure I.20) [26].

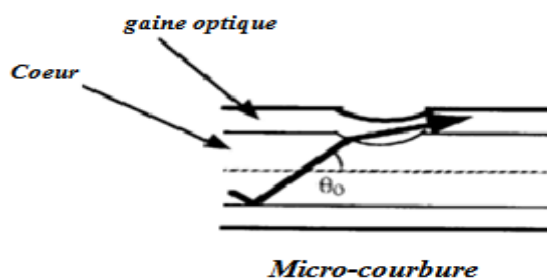


Figure II.20: perte par micro-courbure [26].

Elles Apparaissent lors de la fabrication des câbles lorsque des contraintes mécaniques provoquent des microdéformations de la fibre, entraînant des pertes de lumière. Elles sont à peu près indépendantes de la longueur d'onde. Ces pertes dépendent aussi bien de la fibre elle-même que du revêtement. Elles augmentent très vite lorsque le diamètre de la fibre diminue [26].

II.9 Principe de fonctionnement des fibres à réseau de Bragg

Les réseaux de Bragg à fibre sont un cas particulier des réseaux de diffraction qui sont utilisés dans de nombreux instruments optiques. Un réseau de Bragg fibré est un morceau de fibre optique, généralement de longueur ne dépassant pas quelques millimètres [14], et dont l'indice de réfraction du cœur est modulé de façon périodique, comme le représente le schéma de la figure (II.21).

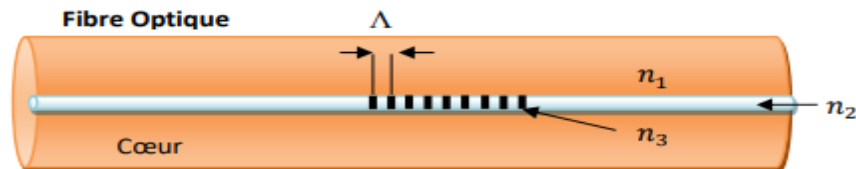


Figure II.21: structure de fibre de Bragg [17].

La fibre à réseau de Bragg agira comme un filtre sélectif de longueur d'onde à bande étroite. Cela signifie que si la lumière d'une source à bande large parcourt la fibre optique, seule la lumière sur une largeur spectrale très étroite, centrée sur la longueur d'onde du réseau de Bragg sera réfléchi. La lumière restante poursuivra son chemin le long de la fibre jusqu'au prochain réseau de Bragg sans avoir perdu de ses propriétés. La longueur d'onde du réseau de Bragg est essentiellement définie par la période de la microstructure et de l'indice de réfraction du cœur. Le réseau de Bragg est une structure symétrique, ainsi il reflétera toujours la lumière selon la longueur d'onde peu importe d'où provient la lumière [18].

Le pas du réseau est fixé par les paramètres géométriques des dispositifs de photo-inscription et les variations de l'indice par l'amplitude du signal UV sur la fibre. En fonction du pas du réseau et de l'indice effectif de la fibre n_{eff} , la longueur d'onde de Bragg du réseau s'écrit [17]:

$$\lambda_B = 2.n_{eff} \Lambda \quad \text{II.18}$$

Où n_{eff} est l'indice de réfraction effectif et Λ est la période de réseau. Ceci est la condition de résonance de Bragg. A partir de l'équation (II.2), on remarque que la longueur d'onde de Bragg dépend de l'indice de réfraction et de la période de réseau. Une petite quantité de lumière incidente est réfléchi à chaque changement périodique de l'indice de réfraction. La totalité des ondes lumineuses réfléchies sont combinées dans une à une longueur d'onde particulière. La longueur d'onde à laquelle la réflexion a lieu est appelée 'la longueur d'onde

de Bragg'. Seules les longueurs d'onde autour de la longueur d'onde de Bragg sont fortement réfléchies ou transmises. La réflectivité de la lumière incidente atteint un pic à la longueur de Bragg. Pour les autres, la structure est pratiquement transparente. Le réseau de Bragg dans la fibre est donc un réflecteur ou un transmetteur sélectif en longueur d'onde. Toute modification du pas du réseau ou de l'indice effectif de la fibre entraîne un décalage du spectre réfléchi et transmis [17].

Parmi les propriétés de ce réseau ; c'est qu'il permet de comprimer une impulsion déformée, comme il est montré sur la figure (II.22).

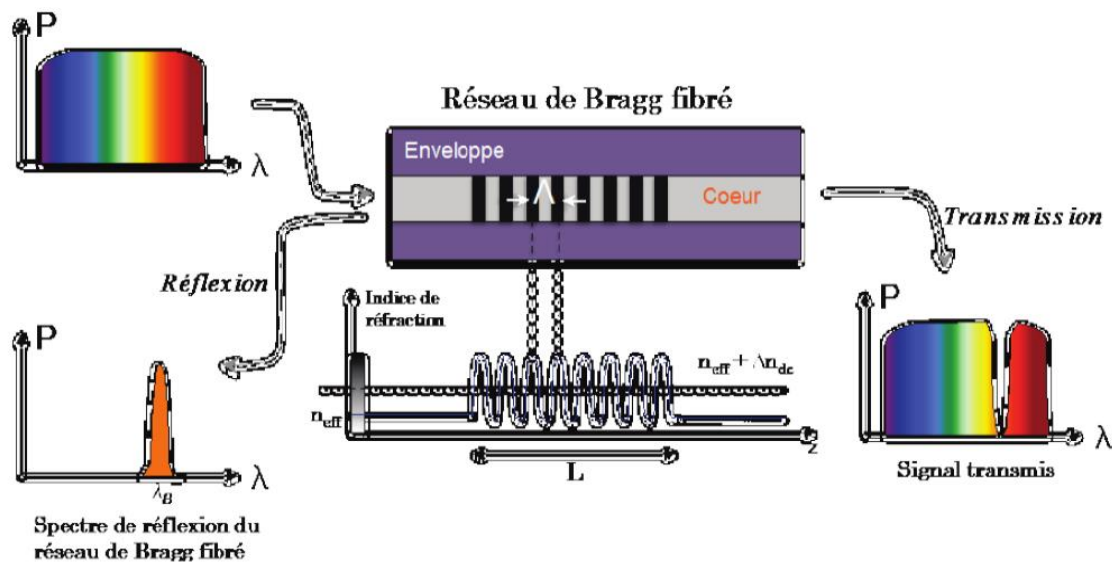


Figure II.22: Schéma illustrant les propriétés d'un réseau de Bragg [17].

II.9.1 Réseau de Bragg uniforme

Dans ces réseaux standards, la modulation d'indice de réfraction varie suivant une fonction quasi-sinusoïdale sur une section de longueur L du cœur de la fibre optique. Dans cette section du réseau, le profil de l'indice de réfraction s'écrit de la forme générale suivante :

$$n(z) = n_0 + \frac{\delta n(z)}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_0} z\right) \quad \text{II.19}$$

Où z est l'abscisse le long de la fibre optique. En dehors de segment L du réseau, l'indice vaut l'indice moyen n_0 de la fibre optique, Λ_0 est la période de modulation. Pour un réseau

uniforme l'amplitude de modulation $\delta n(z)$ est constant. Il est possible de paramétrer cette amplitude avec une fonction d'enveloppe de type gaussien ou sinc.....etc. Il également possible de paramétrer la période en fonction de la longueur. La période est constante dans le cas d'un réseau uniforme. Donc, une fibre de Bragg

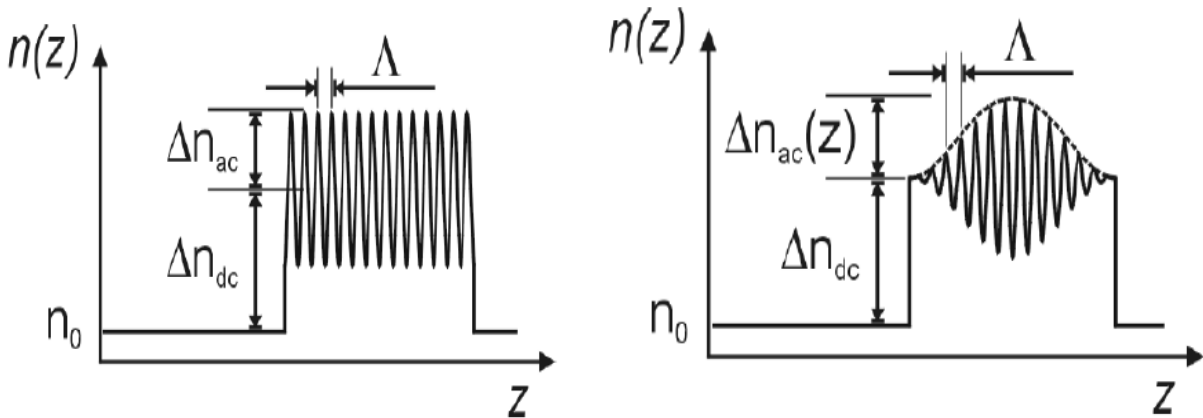


Figure II.23: Profil de l'indice de réfraction : (a) réseau uniforme, (b) réseau apodisé avec une fonction de type gaussien

II.9.2 Réseau de Bragg à pas variable (Réseau de Bragg chirpé)

Le réseau de Bragg à pas variable (chirpé) est un réseau dont la période varie le long de la fibre. Il ya deux quantités variables qui peuvent être changées pour obtenir un réseau à pas variable : l'une est de changer la période de Bragg, et l'autre est de varier l'indice de réfraction le long de la direction de propagation dans la fibre.

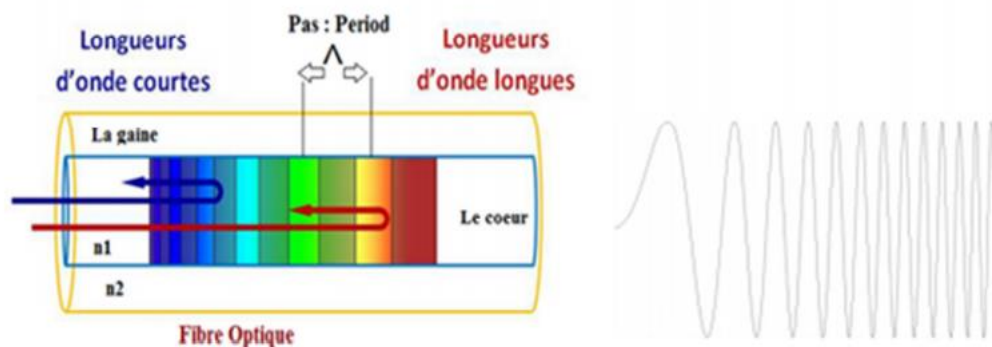


Figure II.24: Fibre à réseau de Bragg à pas variable linéairement.

La figure II.24 montre un réseau de Bragg linéaire et à pas variable. Dans ce cas, la période du réseau varie linéairement avec la longueur tout le long du réseau de Bragg. Le réseau réfléchit des longueurs d'onde variables le long de la longueur du réseau avec une dépendance entre la valeur de la longueur d'onde réfléchie et la position dans le réseau. Cela veut dire que la longueur d'onde de Bragg varie en fonction de la longueur de réseau de Bragg.

La variation d'indice effective d'un réseau chirpé s'exprime de la manière suivante :

$$n(z) = n_0 + \frac{\delta n(z)}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_0 + C_\Lambda z} z\right) \quad \text{II.20}$$

Où C_Λ est le coefficient de chirp.

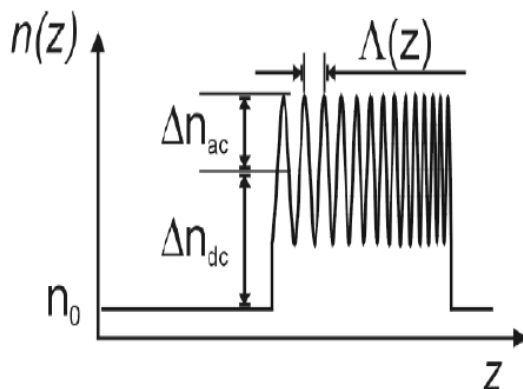


Figure II.315: Profil de l'indice de réfraction : réseau de Bragg linéaire à pas variable.

Ce type des fibres présente une période non uniforme sur toute la longueur de la portion du réseau. La période peut être variée de façon symétrique, soit de manière progressive ou destructive entre les deux extrémités du réseau. La figure II.25 montre la variation de l'indice de réfraction pour ce type de réseaux. Une variation du pas (ou d'indice de modulation), il est possible d'introduire un délai entre les différentes longueurs d'onde ce qui permet de compenser la dispersion chromatique dans les systèmes de transmission.

II.10 Conclusion

Les fibres optiques sont très utilisées actuellement grâce à leur large bande passante. Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement les différentes générations et l'évolution de la

fibre optique et nous avons présenté ses caractéristiques ainsi que les avantages et inconvénients et les problèmes que peuvent être posés lors de la transmission.

Enfin, on a présenté aussi les différents types des réseaux de Bragg, ces derniers sont très intéressants pour des applications adaptées aux besoins de l'utilisateur, telles que les systèmes de communications optiques, notamment, dans les systèmes de compensation de la dispersion chromatique.

Chapitre III
Compensation de la dispersion chromatique par
réseau de Bragg

III.1 Introduction

Malgré que les fibres optiques aient considèrent comme les meilleurs supports de transmission, mais la dispersion est l'une des limitations majeures qui peuvent provoquer des déformations du signal transmis. Le progrès technique dans les transmissions par fibre optique a été rendu possible grâce au contrôle de la dispersion chromatique.

Dans ce chapitre, on s'intéresse dans un premier temps à l'étude des réponses spectrales des réseaux de Bragg uniforme. Ensuite et pour corriger l'accumulation de la dispersion chromatique dans les systèmes de télécommunication à long distance, on présente une structure de réseau de Bragg ayant un pas variable

La conception des systèmes associés est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. De plus, il est demandé à ces derniers à la fois de transporter des capacités d'informations de plus en plus importantes, et de se renouveler très rapidement. La méthode expérimentale, qui consiste en des mesures itératives sur un banc de test, est très coûteuse en temps et en argent. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance intéressante pour trouver des solutions, aussi bien au niveau du composant que du système. Les logiciels peuvent être une aide à la conception et à la prise de décision, tout en évitant la multiplication d'essais compliqués et onéreux

Il existe certains logiciels particuliers qui permettent la simulation des circuits optiques et optoélectroniques comme Linksim, Comsis et Lumerical

Dans ce chapitre nous allons étudier quelques méthodes de contrôle de la dispersion chromatique en utilisant les logiciels Optigrating et OptiSystem de Optiwave Systems.

III.2 Présentation du logiciel Optiwave Système

Optiwave est un leader émergent dans le développement de logiciels innovants pour la conception, la simulation et l'optimisation de composants, de liaisons, de systèmes et de réseaux pour les domaines des nanotechnologies photoniques, de l'optoélectronique, des réseaux optiques et d'autres applications photoniques [27].

III.2.1 OptiGrating

OptiGrating est un réseau complexe qui est approximé par une séquence de segments uniformes et analysé en connectant les segments avec la méthode de matrice de transfert bien connue. Cela donne au concepteur les informations nécessaires pour tester et optimiser les conceptions de réseaux.

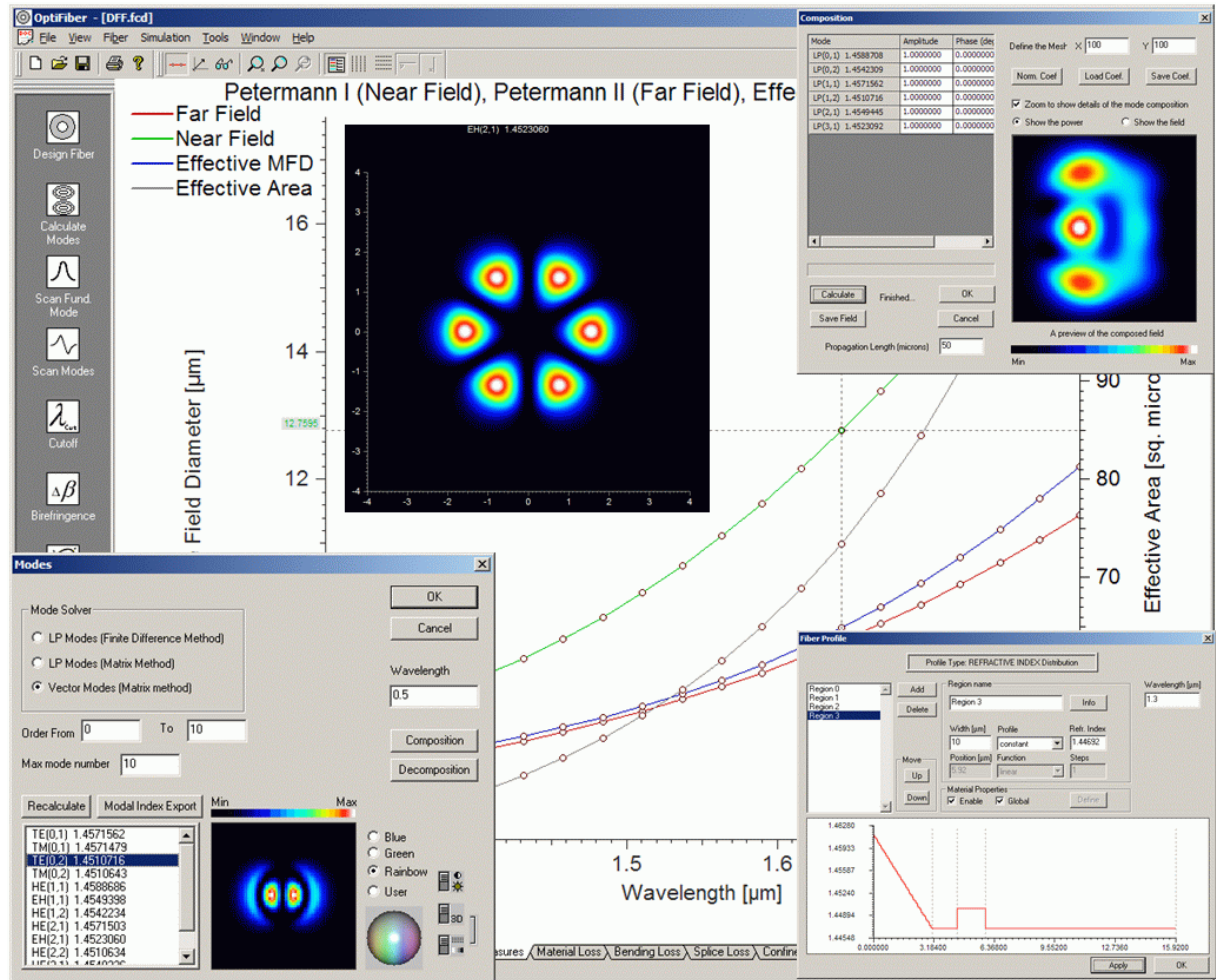


Figure III.1: L'interface de Travail sur OptiGrating.

III.2.2 OptiSystem

Dans une industrie où la rentabilité et la productivité sont essentielles au succès, OptiSystem permet de minimiser les contraintes de temps et de réduire les coûts liés à la conception des systèmes optiques, des liaisons et des composants. OptiSystem est un outil de conception de logiciels innovant, évolutif et puissant. Il permet aux utilisateurs de planifier, de vérifier et de simuler presque tous les types de liaisons optiques dans la couche de transmission d'un large éventail de réseaux optiques : LAN, SAN, MAN aux portées ultra-longues. Il offre une conception des couches de

transmission de communication optique et une planification des composantes jusqu'au niveau du système, et présente visuellement l'analyse et les scénarios.

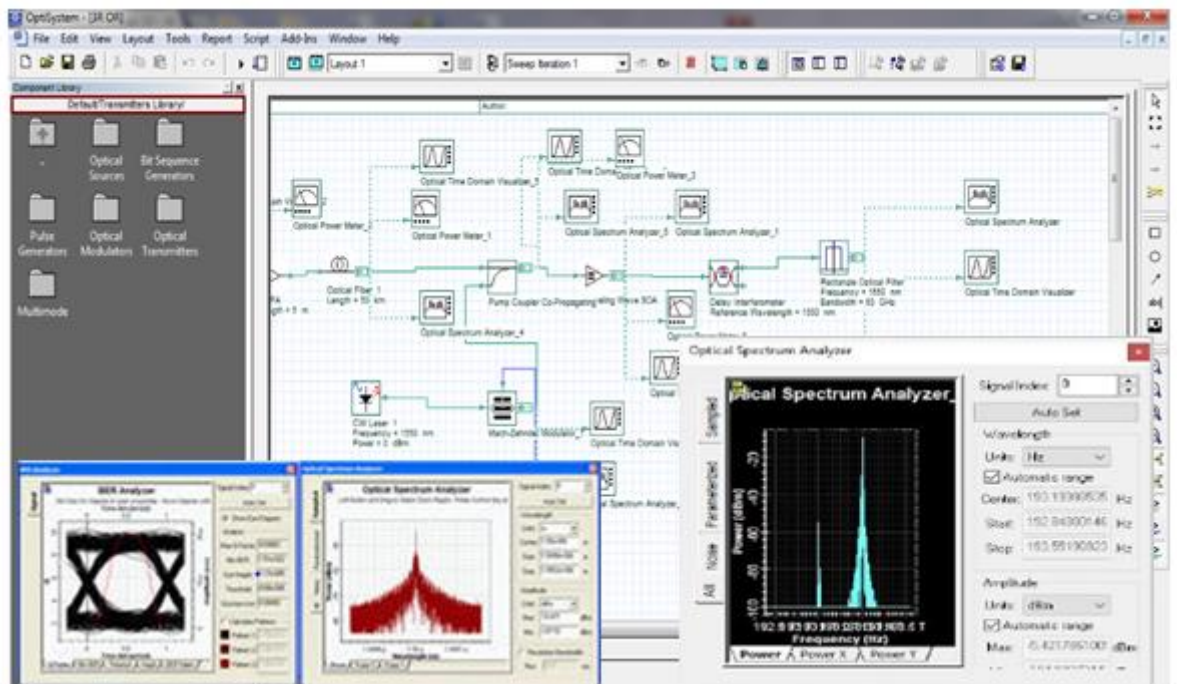


Figure III.2: L'interface de travail sur OptiSystem.

III.3 Effets de La dispersion chromatique sur la transmission

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne donc différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques. Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre symboles est possible. Cet élargissement τ se calcule ainsi :

$$\tau = D(ps/nm.km) * L(km) * \Delta\lambda(nm) \quad \text{III.1}$$

Avec D le coefficient de dispersion chromatique de la fibre, L la longueur de la fibre et $\Delta\lambda$ la largeur spectrale de la source [20].

Sur la figure III.3 nous vérifions que plus la longueur de la fibre et long plus l'atténuation et l'étalement subi lors de la propagation est important.

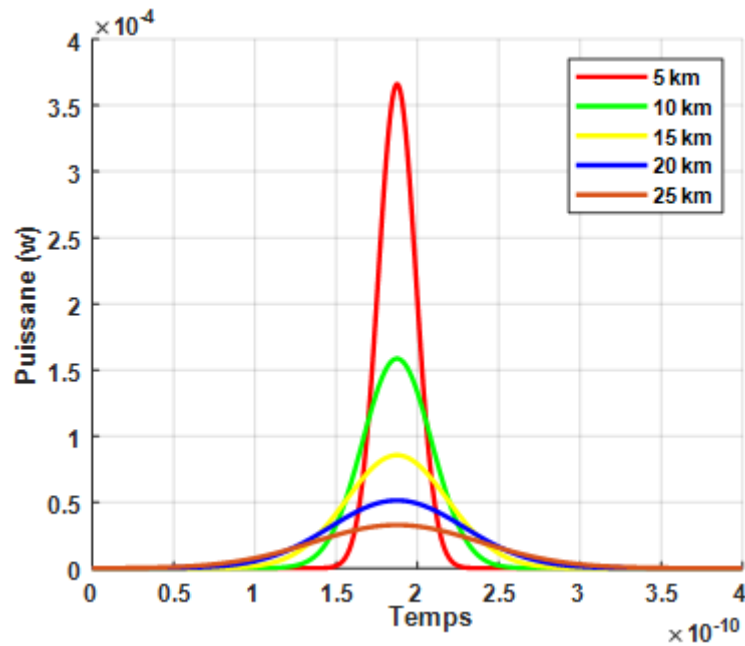


Figure III.3: L'effet de l'atténuation et la dispersion chromatique Sur la transmission.

Dans le but de voir l'effet de la dispersion chromatique et son contrôle sur la transmission, une fibre monomode standard du type G-652 dont les paramètres opto-géométrique (profil d'indice) et l'évolution de l'indice du cœur et la gaine sont respectivement donnés dans les figures III.3 et III.4.

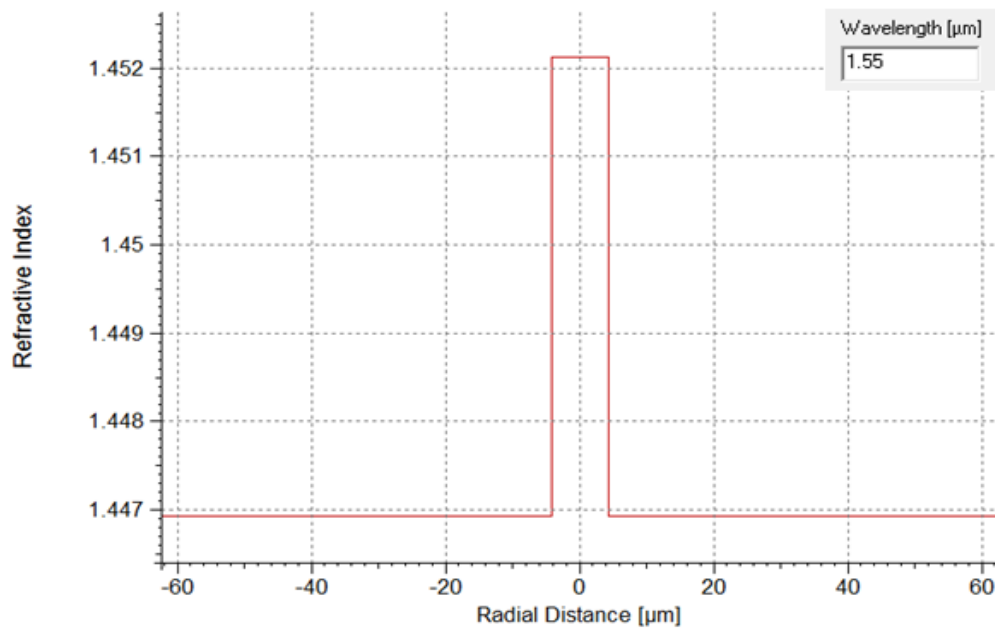


Figure III.4: Profil d'indice de la fibre monomode standard la G-652.

Plusieurs matériaux de verre à base de silice ont été fabriqués et leurs propriétés ont été mesurées. Les indices de réfraction sont généralement exprimés à l'aide des coefficients de Sellmeier (Eq III.2). Le tableau III.1 présente les coefficients de multiples matériaux de fibres optiques [28].

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{G_1\lambda^2}{\lambda^2-\lambda_1^2} + \frac{G_2\lambda^2}{\lambda^2-\lambda_2^2} + \frac{G_3\lambda^2}{\lambda^2-\lambda_3^2} \quad \text{III.2}$$

Avec les coefficients de sellmeier:

G : forces d'oscillateur des transitions.

λ_k^2 : places des énergies respectives de transition.

λ : la longueur d'onde incident.

n : l'indice de réfraction.

Tableau III.2 : Les coefficients de multiples matériaux de verre à base de silice.

Constantes de Sellmeier	Concentration de germanium, C (% mole)			
	0 (silice pure)	3.1	5.8	7.9
G1	0.6961663	0.7028554	0.7088876	0.7136824
G2	0.4079426	0.4146307	0.4206803	0.4254807
G3	0.8974794	0.8974540	0.8956551	0.8964226
λ_1	0.0684043	0.0727723	0.0609053	0.0617167
λ_2	0.1162414	0.1143085	0.1254514	0.1270814
λ_3	9.896161	9.896161	9.896162	9.896161

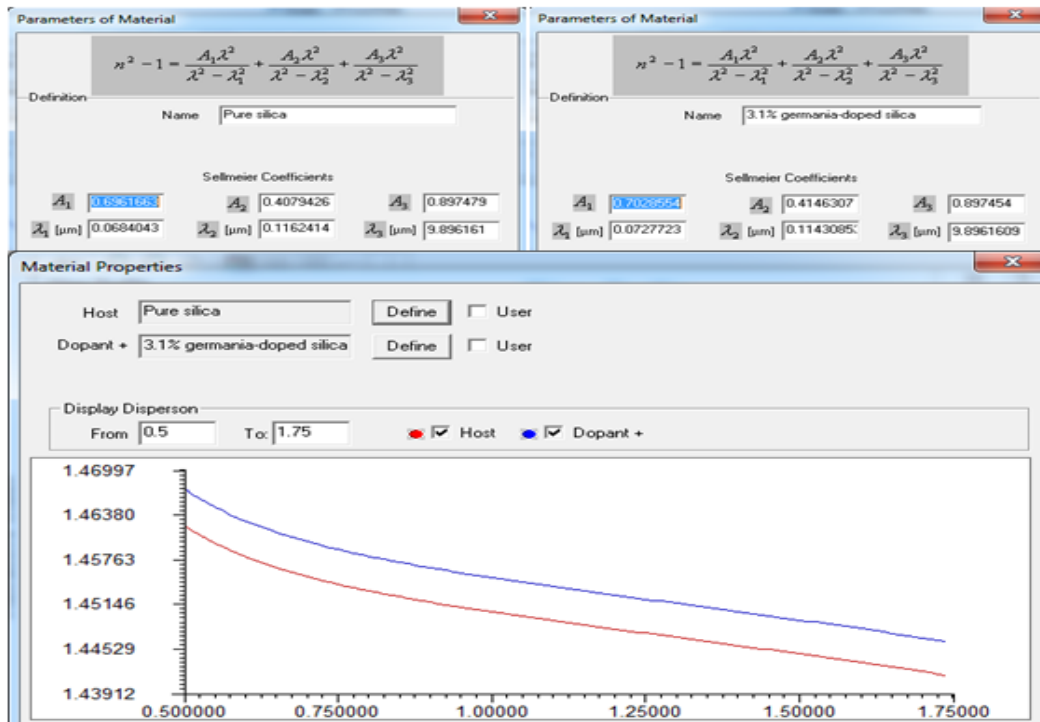


Figure III.5: Variation de l'indice de la gaine et l'indice cœur de la G-652 avec la longueur d'onde.

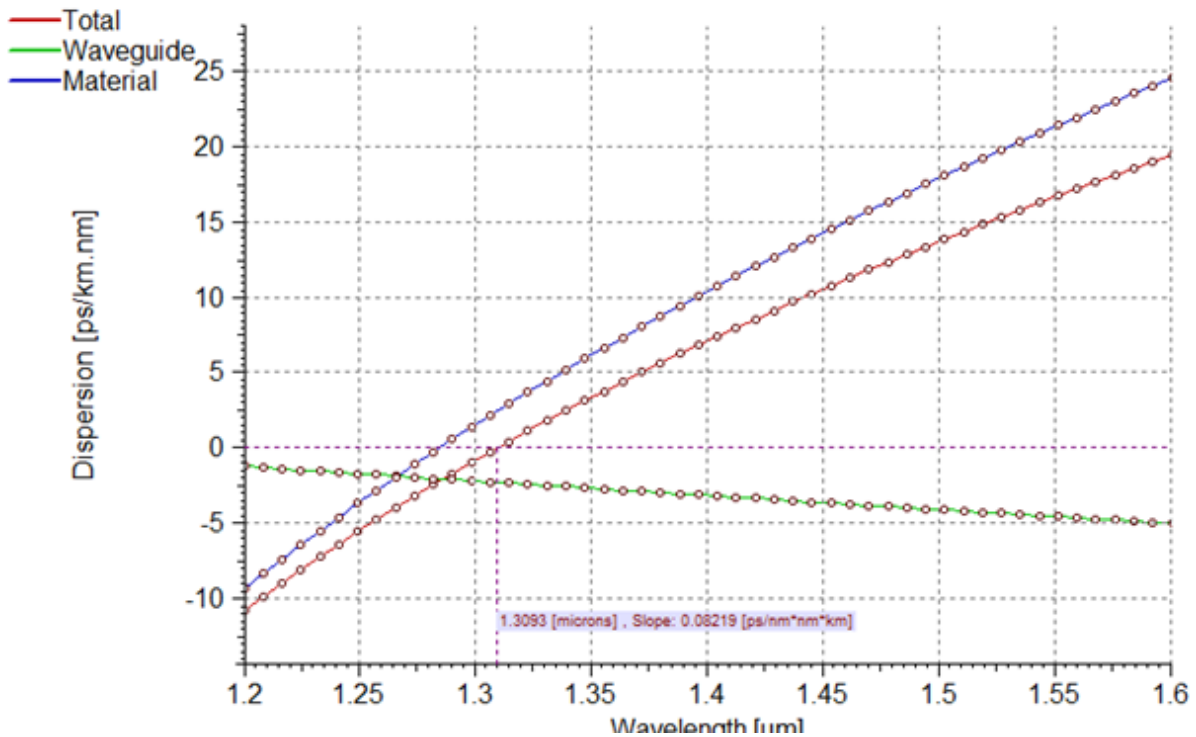


Figure III.6: Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique De la fibre G-652.

D'après la figure III.6, on remarque que la dispersion chromatique est nulle pour une longueur d'onde de 1310 nm et de 17ps/nm.km pour la longueur d'onde 1550 nm. La dispersion se divise en deux parties : une partie où elle est négative dite régime de dispersion normale, dans cette partie les composantes spectrales correspondant aux basses fréquences ont des vitesses plus élevées donc se déplacent vers l'avant de l'impulsion. Et une partie où la dispersion chromatique est positive dite régime de dispersion anormale dont les hautes fréquences sont les plus rapides. Dans ces deux parties de la figure, la dispersion chromatique conduit à un élargissement d'impulsion car elle propulse certaines composantes spectrales à l'avant de l'impulsion et d'autres à l'arrière.

Pour étudier l'effet de la dispersion sur la propagation d'une impulsion dans la fibre optique G-652, nous faisons appel aux blocs ci-dessous et nous devons régler certains paramètres tels que la fréquence optique et la largeur d'intensité des impulsions (40 Gbit/s), la longueur de fibre et la valeur de la dispersion chromatique (figure III.6).

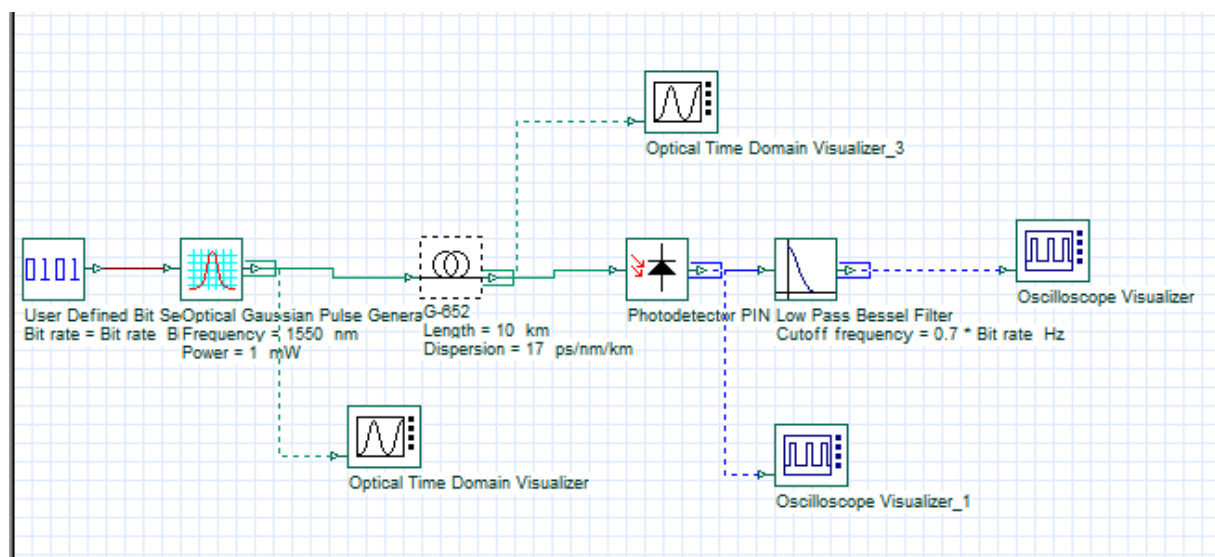
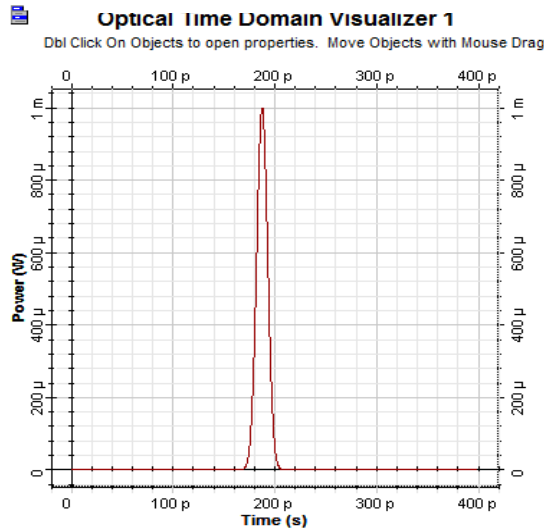


Figure III.7: Bloc d'une chaîne de transmission optique pour tester l'effet de la dispersion chromatique sur une impulsion gaussienne avec la fibre G-652

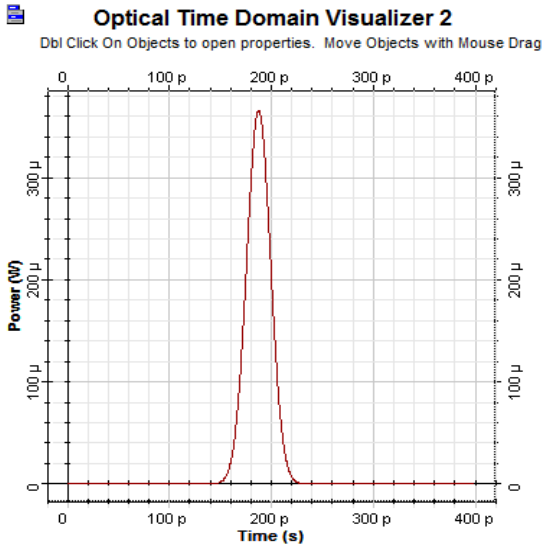
La figure III.8 illustre l'étalement et l'atténuation d'une impulsion gaussienne pour différentes longueurs de fibre. Le calcul de l'étalement est effectué pour la fibre optique G-652 travaillant à la longueur d'onde de 1550 nm, pour laquelle l'atténuation et la dispersion chromatique valent respectivement 0.2 dB/km et 17 ps/km.nm.

En analysant ces courbes nous remarquons que la largeur temporelle de l'impulsion augmente de manière considérable avec l'augmentation de la longueur de la fibre.

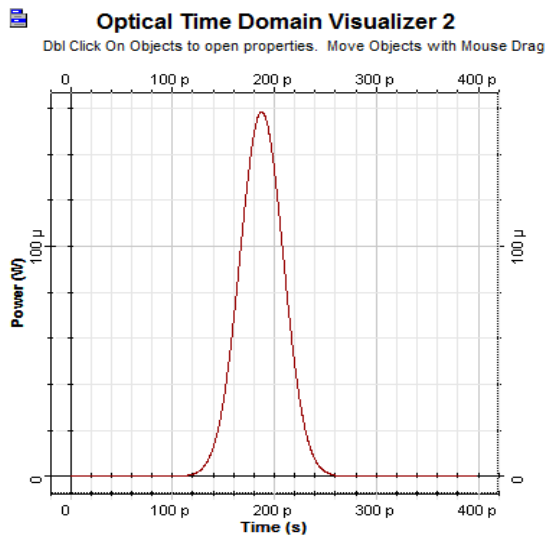
L'impulsion Gaussien à l'entrée de la fibre



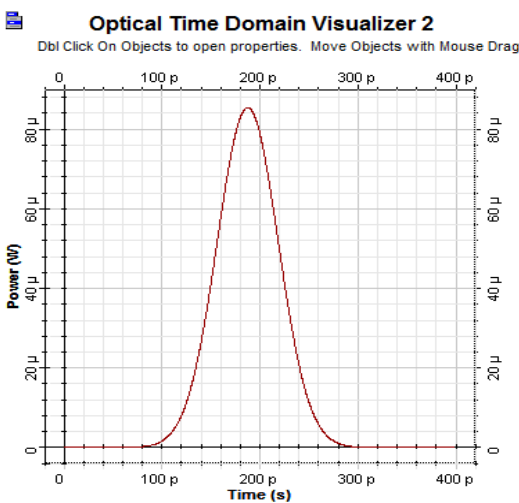
L'impulsion Gaussien à la sortie de la fibre (L=5 km)



L'impulsion Gaussien à la sortie de la fibre (L=10 km)



L'impulsion Gaussien à la sortie de la fibre (L=15 km)



L'impulsion Gaussien à la sortie de la fibre (L=20 km)

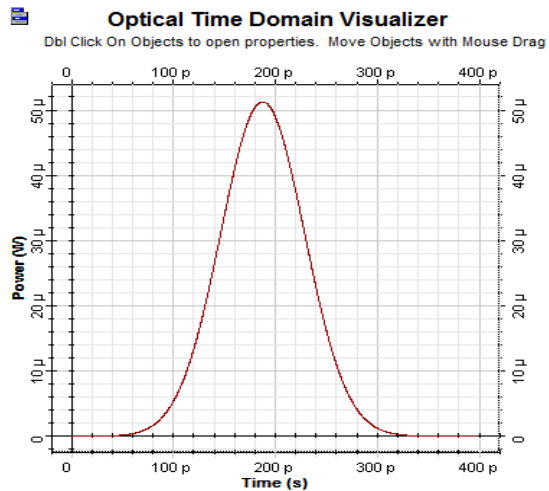


Figure III.8: L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une gaussien sur la fibre optique G-652 à 1550 nm

Afin de voir l'effet de l'interférence entre les impulsions dues à la dispersion chromatique, nous avons injecté à l'entrée de la fibre une séquence d'impulsions gaussiennes (01010010).

La figure suivante représente les séquences d'impulsions à l'entrée et à la sortie de la fibre standard G-652. Suivant les deux courbes de la séquence d'impulsions représentées par la puissance en fonction de temps, nous remarquons qu'il y a une interférence (élargissement temporel et atténuation) entre les impulsions à cause de la dispersion chromatique. Pour résoudre ce problème nous devons suivre une des techniques de contrôle de la dispersion chromatique.

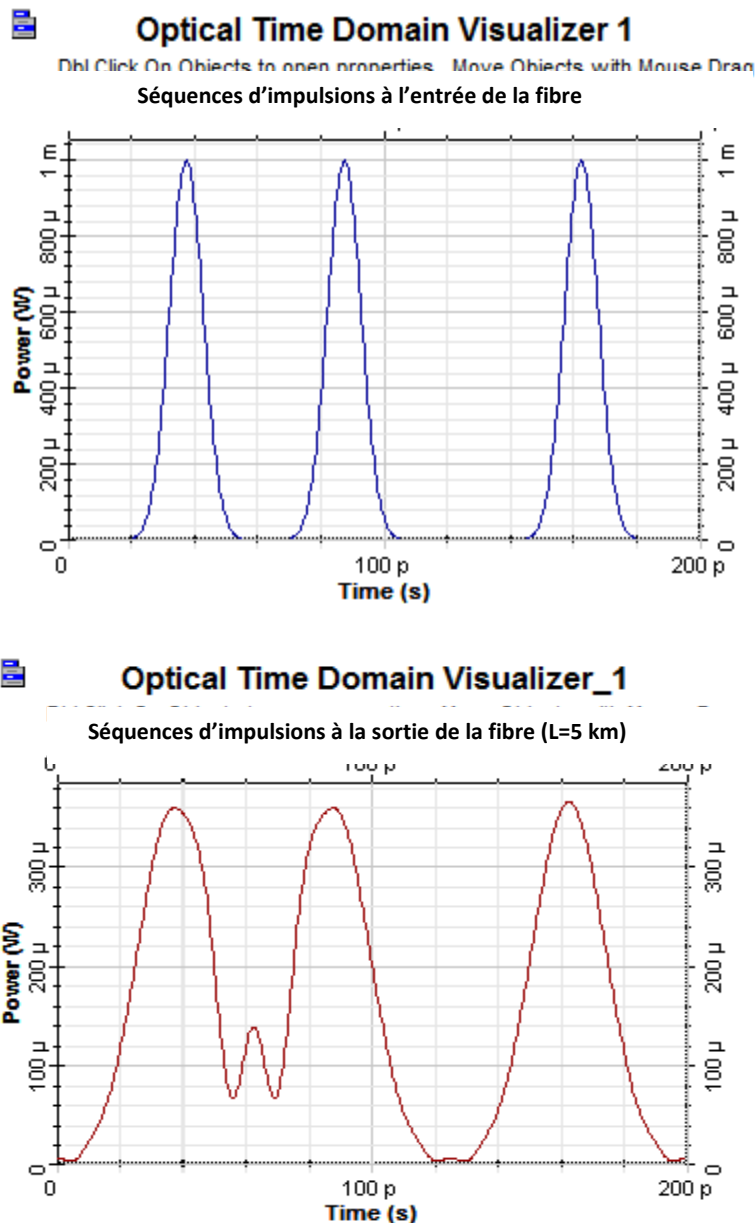


Figure III.9: L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une séquence d'impulsions gaussien (01010010) sur la fibre optique G-652 à 1550 nm.

III.4 Techniques de compensation de la dispersion chromatique

La dispersion chromatique est donc un facteur majeur de limitation des performances des systèmes de transmission sur fibre à haut débit. Et comme nous l'avons vu précédemment, les réseaux de télécommunication installés utilisent des fibres optiques monomodes optimisées à 1310 nm, longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est nulle, mais qui travaillent à 1550 nm (minimum d'atténuation), longueur d'onde pour laquelle elles présentent une dispersion chromatique de l'ordre de 17 ps/(nm.km). Afin de pouvoir garantir des débits de communication importants, il est donc indispensable de gérer cet étalement temporel.

Il y a principalement deux possibilités : utiliser des fibres ayant la dispersion chromatique modifiée quasiment nulle pour cette longueur d'onde (1550 nm) ou ajouter à la première fibre ayant la dispersion chromatique positive une seconde fibre à dispersion négative. On parle de compensation de dispersion. La mise en série de ces fibres permet de compenser et d'annuler les déformations des impulsions dues aux dispersions chromatiques.

Actuellement, les réseaux de Bragg photo-inscrits dans la fibre optique sont utilisés dans nombreux domaines d'application, grâce aux caractéristiques physiques excellentes, il est possible d'introduire un délai entre les différentes longueurs d'onde ce qui permet de compenser de la dispersion chromatique dans les systèmes de télécommunication. Il est en effet possible, avec un réseau de quelques centimètres, de compenser la dispersion chromatique induite par la propagation sur plusieurs centaines de kilomètres de fibre optique.

III.5. Contrôle de la dispersion chromatique par l'utilisation des fibres à réseau de Bragg

▪ Modélisation du Réseau de Bragg uniforme

La réflectivité ainsi que le temps de retard d'un réseau de Bragg uniforme sont représentées respectivement à la figure III.20 en utilisant les paramètres suivants : $\Lambda=0.53381$ nm, $n_{\text{eff}}=1.447$, $L=5$ mm et $\delta n=0.0001$.

D'après la figure III.10, que le spectre de la réflectivité et le temps de retard sont symétriques par rapport à la longueur d'onde de Bragg. Le pic du coefficient de réflexion est centré sur la longueur d'onde $\lambda=1550$ nm est qui est près de 100% atteint la saturation. Dans ce cas, le réseau présente une très forte réflectivité. il apparait également une bande de longueur d'onde, appelée bande interdite, celle-ci est centrée sur la longueur d'onde de Bragg.

En dehors de cette bande, la réponse spectrale présente des oscillations qui s'amortissent au fur et à mesure qu'elles s'éloignent de longueur d'onde de Bragg.

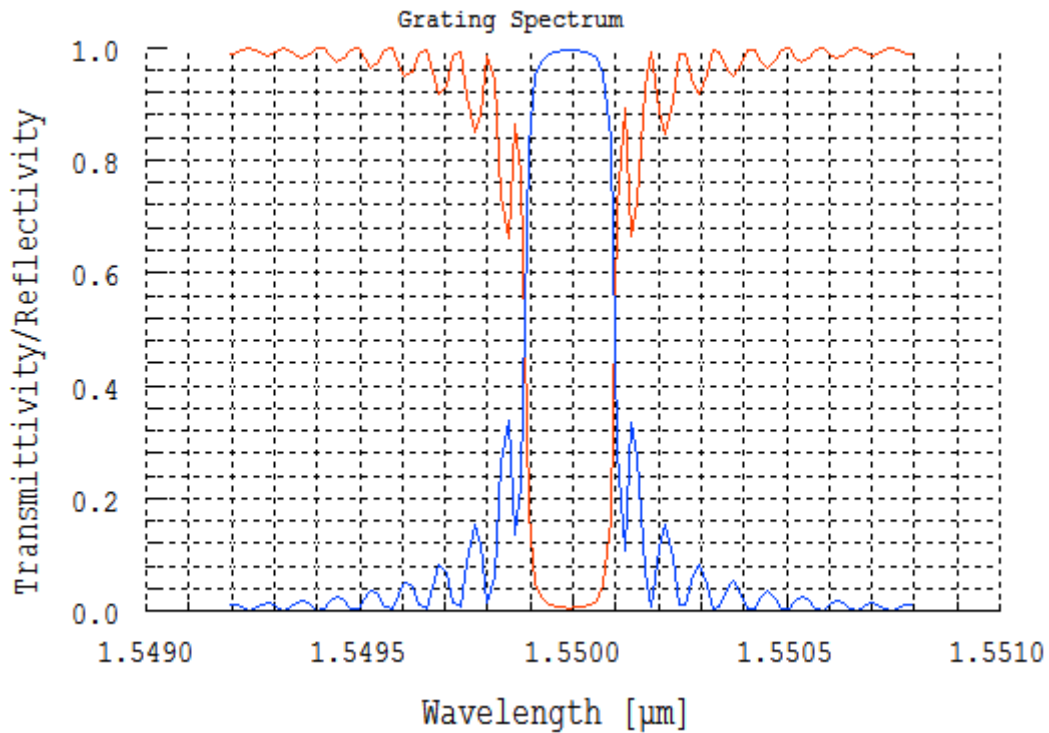


Figure III.10: Spectre de réflectivité d'un réseau de Bragg uniforme [29].

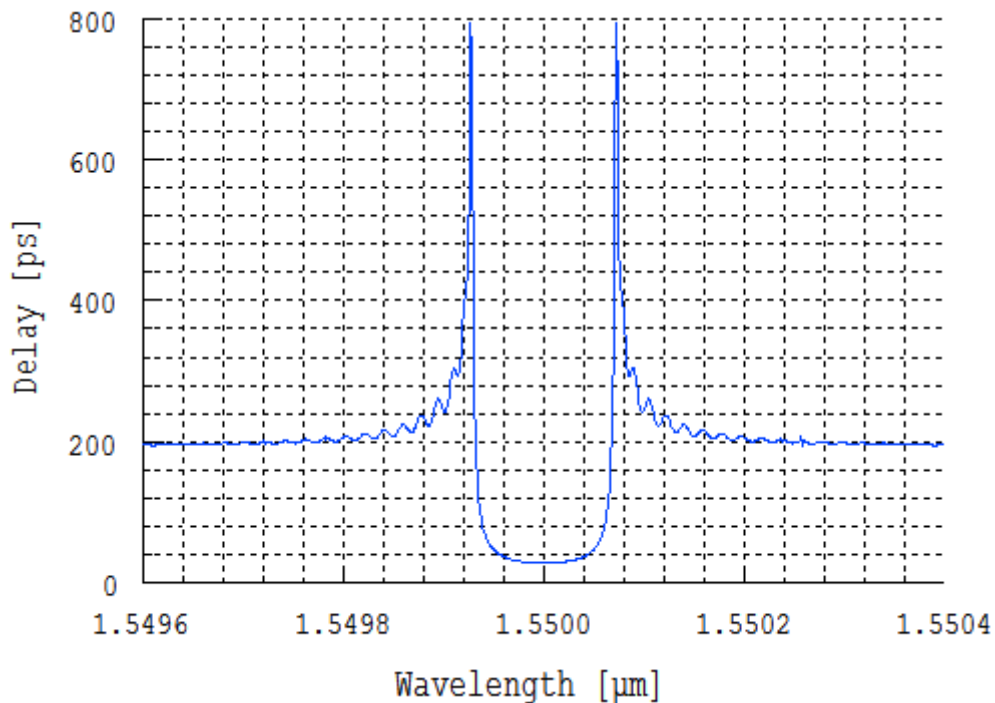


Figure III.11: Temps de retard d'un réseau de Bragg uniforme [29].

Ce qui nous intéresse de plus dans cette étude de réseau de Bragg est non seulement la représentation du spectre de réflexion, mais aussi le temps de retard que peut fournir ce réseau.

D'après la figure III. 11, on remarque que le temps de retard est constant à l'intérieur de la bande du spectre de réflexion. L'objectif de notre étude est d'arriver à avoir un temps de retard décroissant négative, pour justement compenser la dispersion de la vitesse de groupe que fournit la fibre de transmission. Cependant, Les FBG uniformes ne peuvent pas être utilisés pour la compensation de la dispersion chromatique. Par conséquent, ces réseaux peuvent être essentiellement utilisés comme filtres en mode de réflexion.

▪ Modélisation du Réseau de Bragg à pas variable

L'idée physique derrière cette compensation est de créer un réseau à pas variable qui nous permet de créer un délai entre les différentes composantes spectrales du signal. Si nous créons un réseau de fibres avec une période réduisant linéairement le long du réseau, en raison du fait que les fréquences les plus élevées se refléteront après une propagation plus longue dans le réseau, un délai entre les composantes de fréquence inférieure et supérieure apparaîtra, ce qui est juste à l'opposé de celui créé dans la fibre de transmission.

Dans le but de compenser la dispersion chromatique, nous avons travaillé sur une structure de fibre à réseau de Bragg linéaire et à pas variable (figure III.12).

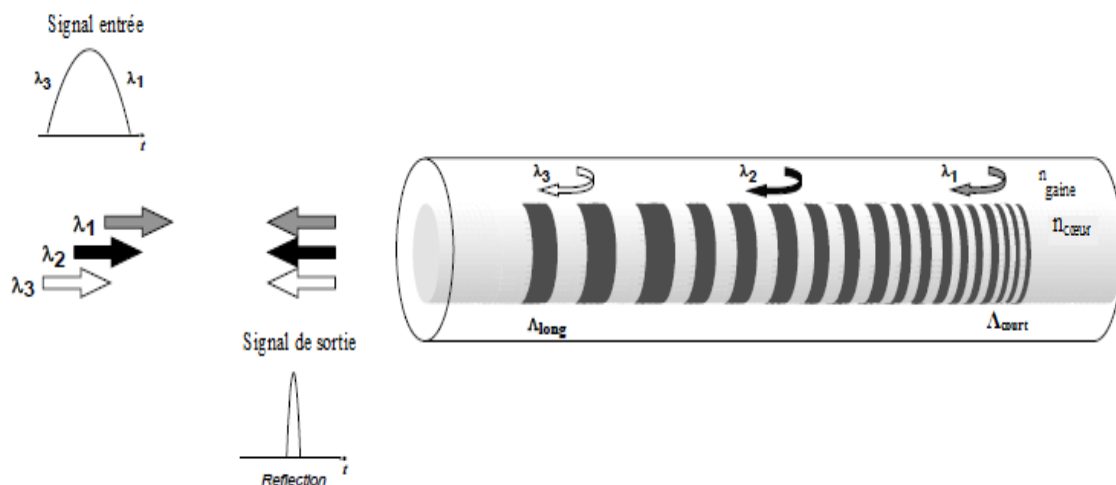


Figure III.12: Fibre à réseau de Bragg à pas variable linéairement.

Nous étudions la simulation d'un réseau de Bragg chirpé dans deux configurations différentes. Dans le premier cas, le chirp est positive $C_\Lambda = +2 \text{ nm}$ et il est négative $C_\Lambda = -2 \text{ nm}$ dans le deuxième cas. La réflectivité ainsi que le temps de retard d'un réseau de Bragg uniforme sont représentées respectivement à la figure III.10 en utilisant les paramètres suivants : $\Delta n = 0.0004$, $L = 10 \text{ mm}$, $n_{eff} = 1,447$, $\Lambda_0 = 51831 \text{ nm}$ et $C_\Lambda = 2 \text{ nm}$.

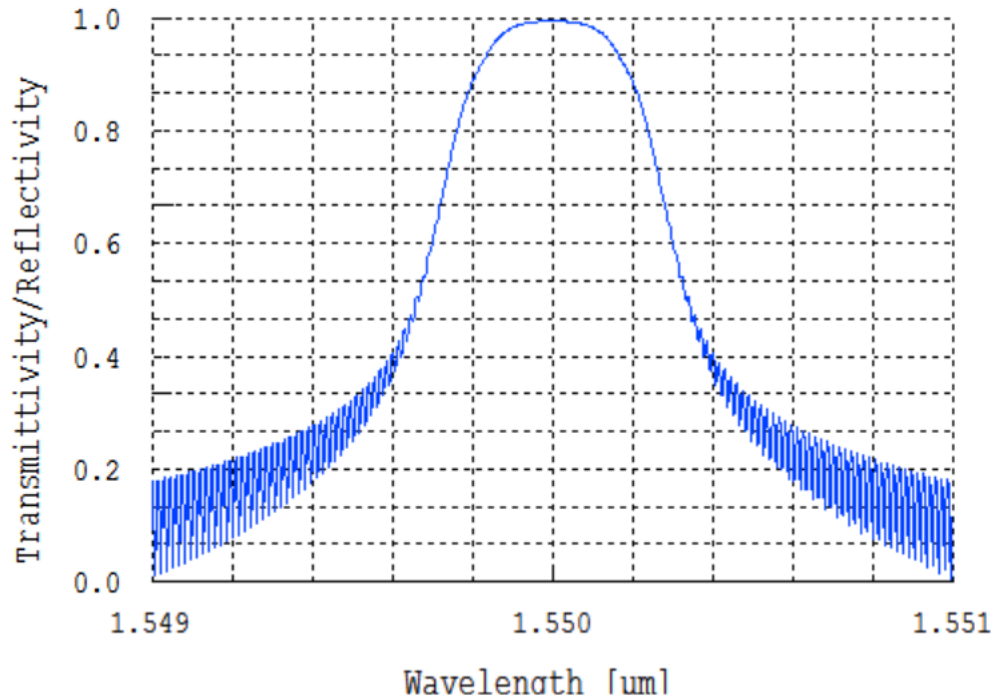
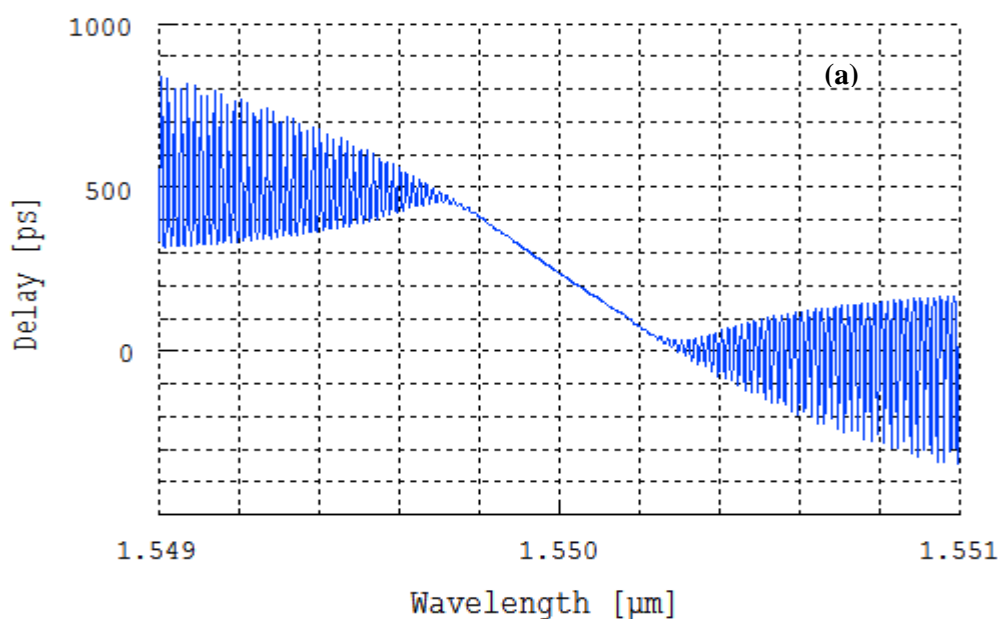


Figure III.13: Spectre de réflectivité d'un réseau de Bragg à pas variable (chirpé) [29].



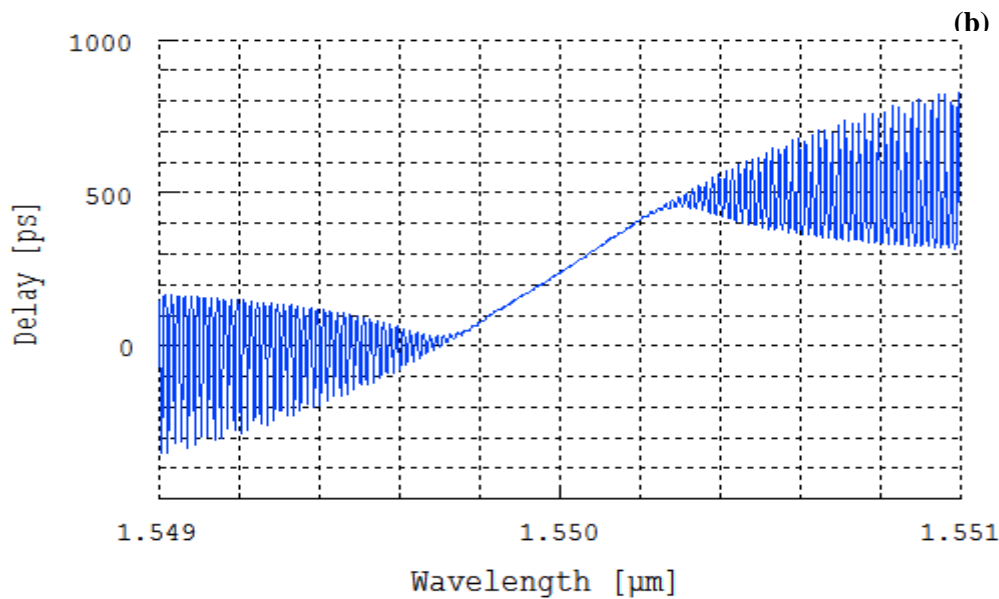


Figure III.14: Le temps de retard de deux réseaux chirpés avec deux chirp opposés : (a) le chirp est positive, (b) le chirp est négative [29].

D'après la figure III.13, on remarque que le spectre de la réflectivité des deux réponses spectrales des deux réseaux présente la même bande passante et le même maximum de réflectivité. On voit aussi que le pic du coefficient de réflexion est centré sur la longueur d'onde $\lambda=1550$ nm est qui est près de 100% atteint la saturation. Dans ce cas, le réseau présente aussi une très forte réflectivité

La figure III.14 montre le temps de retard en fonction de la longueur d'onde. On remarque qu'il y a une pente dans le temps de retard pour le réseau chirpé. Ce dernier introduit des délais différents pour différentes fréquences. Si le chirp est négatif le temps de retard augmente et au contraire si le chirp est positif le temps de retard se diminue. Cette pente dans le temps de retard joue un rôle important pour compresser l'impulsion dispersée c'est-à-dire permet de compenser la dispersion chromatique induite par la fibre dans le système de transmission. Par conséquent, les courtes longueurs d'onde vont être réfléchies à l'entrée du réseau, alors que les hautes longueurs d'ondes vont être réfléchies plus tard.

Par optimisations du profil d'indice de la fibre de Bragg linéaire à pas variable, il est possible d'ajuster la dispersion et d'obtenir des valeurs négatives ajustables, qui servent de fibre compensatrice de dispersion. Donc La caractéristique principale de ces fibres est présentée une dispersion chromatique de signe opposé à celui de la fibre de ligne. L'idée est alors de combiner les deux fibres en utilisant le bon rapport de longueur donné par :

$$k = \frac{L_{\text{fibre de ligne}}}{L_{\text{fibre DCF}}} = \left| \frac{D_{\text{DCF}}}{D_{\text{fibre de ligne}}} \right| \quad \text{III.1}$$

La dispersion chromatique totale (ou cumulée) notée D_T est alors définie par [14]:

$$D_T = D_{\text{fibre de ligne}} \cdot L_{\text{fibre de ligne}} + D_{\text{DCF}} \cdot L_{\text{DCF}} \approx 0 \quad \text{III.2}$$

Cette partie de notre travail montre comment OptiSystem peut fonctionner avec OptiGrating pour concevoir un élément de compensation de dispersion approprié dans les systèmes optiques.

L'objectif de la disposition est d'accomplir une compensation de la dispersion dans OptiSystem à l'aide d'un réseau de fibre avec un pas variable linéaire par OptiGrating. La chaîne de simulation est illustrée par la figure III.15.

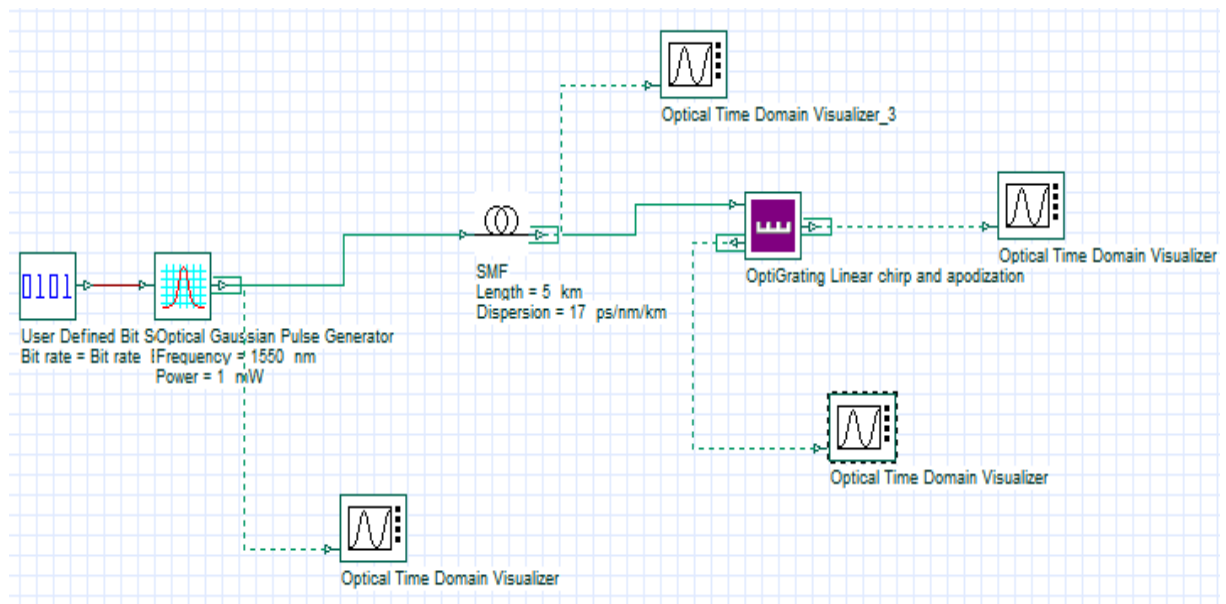


Figure III.15: Bloc d'une chaîne de transmission optique avec la FBG compensatrice[27].

D'après la figure III.16, on voit que la fibre de ligne introduit une dispersion qui élargit et déforme les impulsions. Pour annuler ces effets de dispersion sur la séquence nous avons ajouté une FBG chirpé et qui permet en ajustant ces paramètres, de compenser exactement la dispersion accumulée par la première fibre.

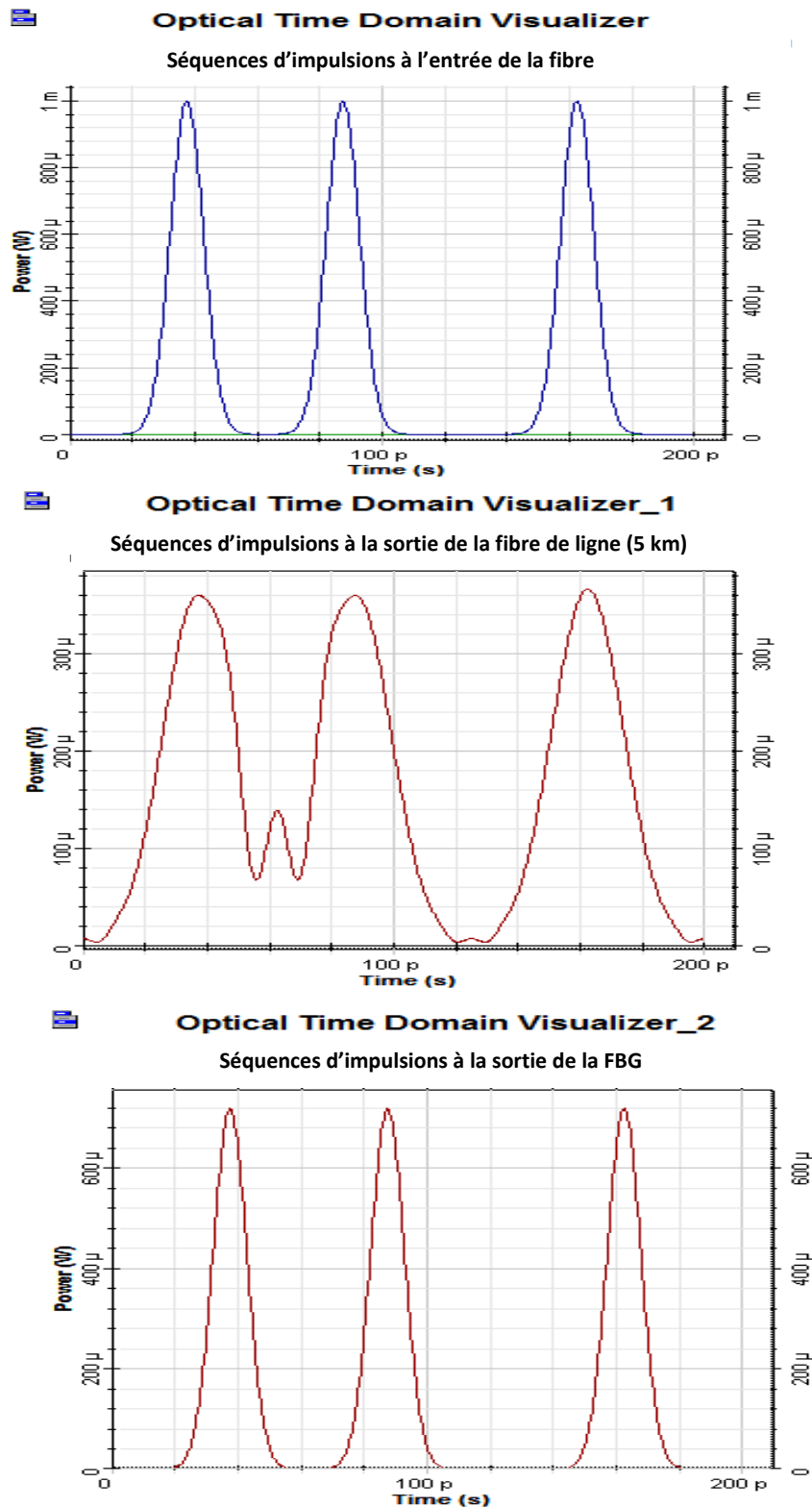


Figure III.16: L'effet de la fibre compensatrice sur la dispersion chromatique de la fibre de ligne [27].

Cependant, l'injection de l'impulsion étalée au travers un réseau de Bragg avec un chirp négatif, va être remis en forme. Car le rôle du FBG chirpé est de retarder les composantes

spectrales des petites longueurs d'ondes par rapport aux composantes basses fréquences (grandes longueurs d'ondes).

Conclusion :

Dans un premier temps afin de voir l'effet de la dispersion chromatique sur la transmission, on a simulé l'évolution de la dispersion chromatique de la fibre de ligne standard. Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'étude des principaux types des réseaux de Bragg. D'après les résultats de simulation obtenus, nous avons remarqué que chaque type de réseau à ses propres caractéristiques, et que le réseau de Bragg uniforme peut être essentiellement utilisés comme filtres en mode de réflexion. Par contre, une variation linéaire de la période a permis d'avoir non seulement un spectre de réflexion centré sur la longueur d'onde d'utilisation mais aussi un délai de groupe qui permette d'avoir une dispersion négative. La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la simulation d'une liaison par fibre optique en connectons OptiGrating avec OptiSystem afin de compenser la dispersion chromatique. Ces simulations montrent clairement la compensation de la dispersion en présence du réseau de Bragg.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'évolution des liaisons par fibre optique a permis aux réseaux de télécommunications d'atteindre un niveau de performances extraordinaires, Les capacités offertes par ces liaisons optiques n'ont cessé d'augmenter jusqu'à nos jours. L'un des problèmes majeurs apparu avec la montée en débit réside dans la valeur de la dispersion chromatique des fibres de ligne dont la plupart qui n'ont pas été optimisées pour fonctionner dans les fenêtres actuelles de transmission situées autour des 1.55 μm . L'étalement temporel est estimé à 17 ps/nm.km pour une fibre de ligne du type G-652, et de ce fait les débits de transmission se retrouvent naturellement limités. C'est pourquoi, l'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de modéliser les réseaux de Bragg dans le but de compenser la dispersion chromatique. C'est pourquoi il nous a paru important de commencer ce mémoire par une description des différents modules de la chaîne, ainsi que les diverses limitations rencontrées au cours de la propagation du signal. Cette description nous permet de maîtriser le concept théorique d'un tel système et simplifier sa conception.

La deuxième partie du travail a été dédiée à l'étude théorique des fibres optiques et des réseaux de Bragg afin de comprendre leur effet sur la transmission.

La troisième partie a été consacrée à l'optimisation des profils des réseaux de Bragg afin de contrôler la dispersion chromatique.

Bibliographie

- [1] L.PIERRE, Télécommunication optiques, Paris : Edition Hermès, 1992.
- [2] B. Hanane & B.Raouida, « étude d'un réseau optique ADM 10Gbit/s Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakri Belkaid-Tlemcen, Promotion juin 2013.
- [3] P.Lecoy, «Télécom sur fibres optiques», 3ème édition revue et augmentée.
- [4] M. MESLI Fatima Zohra & Melle. BENBARKA Imane, « laser a semi-conducteur dans les communications optique sécurisé par les chaos » Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakri Belkaid Tlemcen, Promotion juin 2015.
- [5] J. Laurent « Communications optiques a très haut débit » examain probatoire spécialité électronique, 2004 a paris.
- [6] R. SAIDI « ETUDE D'UNE STRUCTURE DE LIAISON PAR FIBRE OPTIQUE : CARACTERISATION DE LA PROPAGATION ET BILAN ENERGETIQUE » Mémoire de magister En Electronique, Université de Biskra, 2009
- [7] S. S. BENZERDJEB. C, "encodage de l'amplitude spectrale pour OCDMA," Université Abou BakrBelkaid Tlemcen, Algérie, 2013.
- [8] Y. ZOUINE, "contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA," Doctorat, Université de LIMOGE, France, 2005.
- [9] J. LAURENT, « communication optique à très haut débit », examen probatoire CNAM Paris, décembre 2004.
- [10] J. MAURY, « Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », Thèse de Doctorat, Université de LIMOGE, novembre 2003.
- [11] N. BOUDRIOUA, "Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique vers une compensation électronique de la PMD", Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, octobre 2007.
- [12] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Third Edition ed.: Academic Press, Inc, 1995.
- [13] F. Y, "Contribution à l'ingénierie des systèmes de transmission terrestres sur fibre optique utilisant le multiplexage en longueur d'onde de canaux modules au débit de 40 Gbit/s," 2003.
- [14] N. BOUDRIOUA, "Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique vers une compensation électronique de la PMD," Doctorat, Université Paul Verlaine - Metz, France, 2007.
- [15] A. Martinez, M. Dubov, I. Khrushchev, and I. Bennion, "Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser," Electronics letters, vol. 40, pp. 1170-1172, 2004. [17] R. Kashyap, Fiber bragg gratings: Academic press, 2009.

- [16] H. Ismail, N. Imad, « Etude et simulation de la technique CDMA appliqué aux transmissions optiques utilisant les réseaux de Bragg », Mémoire du Projet de Fin d'Etudes, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana.
- [17] J.Skaar, « Synthesis and characterization of fiber Bragg gratings », these de doctorat, Institut of optical research Sweden, 2001.
- [18] A. W. Snyder et J. D. Love, Optical Waveguide Theory, Chapman and Hall, New York, 1983.
- [19] P. Ivan, L. Thomas, “Optical fiber telecommunications IIIA”, Academic press, 1997.
- [20] J.L.Verneuil, (2003). Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s. Université de Limoges, Limoges, 297.
- [21] H.Boudemagh. (2016). Impact de la Dispersion chromatique sur la Transmission sur fibre optique.
- [22] T.Merabta, & S.Chadouli. Compensation De La Dispersion Chromatique Dans Une Ligne De Transmission Optique.
- [23] H. Belgnaoui. Analyse théorique d'un réseau de capteurs planimétriques à fibres optique biréfringentes multiplexés en cohérence et application à la mesure d'une position angulaire et à la mesure simultanée de pression et de température.
- [24] F. Bruyere, “Impact of first -and second- order PMD in optical digital transmission Systems”, Optical Fiber Technology, 1996, Vol.2, pp. 269-280.
- [25] A. W. Snyder et J. D. Love, Optical Waveguide Theory, Chapman and Hall, New York, 1983.
- [26] A. John, “Fundamentals of Optical Fibers”, 2nd edition, John Wiley and sons, Inc (Buck), 1995.
- [27] www.Optisysteme.com
- [28] J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell, and D. M. Atkin, “All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding”, Opt. Lett., vol. 21, no. 19, pp. 1547–1549, 1996.
- [29] www.optigrating.com