

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA

**Faculté des nouvelles technologies de l'information et de la
communication**

Département d'électronique et des télécommunications



MEMOIRE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies.

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications.

Présenté par :

ZAOUI BRAHIM

OUBAH AHMED



THEME

**Etude de la transmission dans une fibre
optique monomode (SMF)**

Soumis au jury

Le : 20/09/2021

Mr. AOUNALLAH Nacer
Mr. Otmani Hamza
Mr. Boulesbaa Mohammed

MCA
MCB
MCA

président
Encadreur
Examineur

UKM Ouargla
UKM Ouargla
UKM Ouargla

Année universitaire : 2020/2021

Remerciement

Avant tout, nous remercions ALLAH pour la faveur de la santé et de l'Islam et pour l'aide qu'il nous a donné pour le réaliser.

Nos premières pensées vont tout particulièrement à nos parents à qui nous devons ce succès et pour qui le sens du sacrifice au cours de ces longues années d'étude ne s'est jamais tari et a été le plus précieux de leurs cadeaux. Grâce à leur soutien et à leurs encouragements sublimement dosés, ils m'ont permis de vivre mes années de scolarité avec sérénité et efficacité. Grand merci.

*Nous exprimons ensuite une profonde gratitude, et ces mots sont pesés, à notre encadreur monsieur **OTMANI Hamza**, Maître de conférences à l'université de Ouargla. Sa grande expérience, sa disponibilité, ses précieux conseils, d'une grande simplicité. Je le remercie infiniment.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à monsieur **OUNALLAH Nacer** et monsieur **BOULESBAA Mohammed**, Maîtres de conférences à l'université de Ouargla. D'avoir acceptés d'examiner et d'évaluer notre travail.*

Nous exprimons également notre gratitude à tous nos enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Sans omettre bien sur de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du présent travail.

Nous voudrions adresser nos sincères remerciements à tous nos amis pour leur soutien et leurs encouragements sans oublier tous les étudiants en systèmes de communication.

A.OUBAH / B.ZAOUI

Dédicaces

Nous remercions Dieu de nous avoir donné courage et volonté. Ainsi que la prise de conscience pour pouvoir terminer notre étude.

⇒ *Je dédie cet humble acte : A mes proches : A celui qui m'a toujours appris à penser avant d'agir, A celui qui m'a soutenu toute ma vie scolaire, A celui qui n'a ménagé aucun effort pour mon bien, A mon cher père, A celui qui est toujours près de mon cœur, A celui qui m'a appris le vrai sens pour la vie, pour ceux qui n'ont pas hésité à m'encourager, ma chère maman. A mes frères et sœurs pour leur soutien moral. A toute ma famille, grande et petite. A ma sœur, qui n'est pas née de ma mère, **Karima LALDJI**. A tous mes amis fidèles qui m'ont beaucoup aidé dans la réalisation de ce travail. Mes collègues et bien sûr à tous les membres de la famille **Zaoui et Oubah** et à tous ceux qui me connaissent*

Ahmed OUBAH

⇒ *A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :*
Surtout pour mon défunt père, pour le goût à l'effort qu'il a suscité en moi, de par sa rigueur.
A toi ma mère, ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour, que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.
A vous mes frères et sœurs qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Brahim ZAOUI

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier la transmission dans une fibre optique monomode (SMF). Dans un premier temps, nous avons présenté une chaîne de transmission optique à l'aide de logiciel « optiwave ». Cette chaîne peut être divisée en trois éléments clés : l'émetteur, le canal optique, et le récepteur. L'émetteur contient une source laser qui est modulée par une séquence porteuse d'informations, le canal se compose des portées potentiellement répétées de fibre monomode optiquement amplifiée, et le détecteur contient un filtrage optique, un photo-détecteur, filtrage électrique et traitement électrique ultérieur pour la récupération des données. Nous avons également montrés des diagrammes d'œil de données, qui illustrent les modèles de symboles transmis et reçus tels qu'ils apparaîtraient sur un oscilloscope à différents stades de la fibre optique.

Les fibres ont des qualités importantes en tant que moyen de transmission d'informations qui leur ont permis de s'établir dans les réseaux de télécommunications.

On peut associer une impulsion de lumière à une longueur d'onde bien précise, mais, en réalité, cette impulsion est composée d'une gamme étroite de longueurs d'onde (couleurs) autour d'une longueur d'onde centrale. Pendant son déplacement dans une fibre optique, l'impulsion s'élargit en raison d'un phénomène qu'on appelle la « dispersion chromatique », causé par le fait que les longueurs d'onde voyagent à des vitesses légèrement différentes. Plus précisément, le bleu (onde courte) se déplace plus vite que le rouge (onde longue). Si la dispersion n'est pas corrigée, la netteté (ou la rapidité) de l'impulsion s'en trouve limitée.

Pour remédier à ces problèmes d'élargissement temporel nous nous focalisons sur les techniques de compensation de la dispersion chromatique. Trois techniques de compensation sont étudiées : la première utilise la fibre compensatrice (DCF), la seconde utilise le réseau de Bragg à fibre (FBG) tandis que l'ultime représente la compensation de dispersion électronique (EDC). Ces composants nous permettent de compenser la dispersion chromatique. On a fait des simulations à l'aide de logiciel « optiwave » et on a réussi de d'appliquer ces différentes techniques de compensation.

Mot clés : chaîne de transmission, fibre optique monomode, SMF, dispersion chromatique, DCF, FBG, EDC, optiwave.

Abstract

The objective of this work is to study transmission in a single-mode optical fiber (SMF). First, we presented an optical transmission chain using "optiwave" software. This chain can be divided into three key elements: the transmitter, the optical channel, and the receiver. The transmitter contains

a laser source that is modulated by an information carrier sequence, the channel consists of potentially repeated scopes of optically amplified single-mode fiber, and the detector contains optical filtering, photo-detector, electrical filtering and electrical processing later for data recovery. We have also shown data eye diagrams, which illustrate the transmitted and received symbol patterns as they would appear on an oscilloscope at different stages of the optical fiber.

Fibers have important qualities as a means of transmitting information which have enabled them to establish themselves in telecommunications networks.

You can associate a pulse of light with a specific wavelength, but in reality that pulse is made up of a narrow range of wavelengths (colors) around a central wavelength. As it travels through an optical fiber, the pulse broadens due to a phenomenon called "chromatic dispersion," caused by wavelengths traveling at slightly different speeds. Specifically, blue (short wave) travels faster than red (long wave). If the dispersion is not corrected, the sharpness (or speed) of the pulse is limited.

To remedy these temporal widening problems we are focusing on chromatic dispersion compensation techniques. Three compensation techniques are studied: the first uses the compensating fiber (DCF), the second uses the fiber Bragg grating (FBG) while the ultimate represents the electronic dispersion compensation (EDC), These components allow us to compensate for chromatic dispersion. We did simulations using "optiwave" software and we managed to apply these different compensation techniques.

Keywords: transmission chain, single-mode optical fiber, SMF, chromatic dispersion, DCF, FBG, EDC, optiwave.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الإرسال في الألياف الضوئية أحادية النمط (SMF). أولاً ، قدمنا سلسلة نقل بصرية باستخدام برنامج "optiwave". يمكن تقسيم هذه السلسلة إلى ثلاثة عناصر أساسية: المرسل والقناة البصرية والمستقبل. يحتوي جهاز الإرسال على مصدر ليزر يتم تعديله بواسطة تسلسل ناقل معلومات ، وتتكون القناة من نطاقات متكررة محتملة من الألياف أحادية الوضع المضخمة بصرياً ، ويحتوي الكاشف على ترشيح ضوئي وكاشف ضوئي وترشيح كهربائي ومعالجة كهربائية. لاحقاً للبيانات التعافي. لقد أظهرنا أيضاً مخططات عين البيانات، والتي توضح أنماط الرموز المرسل والمستلمة كما تظهر على راسم الذبذبات في مراحل مختلفة من الألياف الضوئية. تتمتع الألياف بصفات مهمة كوسيلة لنقل المعلومات التي مكنتها من إثبات وجودها في شبكات الاتصالات السلكية واللاسلكية. يمكنك ربط نبضة ضوء بطول موجي محدد ، ولكن في الواقع تتكون هذه النبضة من نطاق ضيق من الأطوال الموجية (الألوان) حول طول موجي مركزي. أثناء انتقالها عبر الألياف الضوئية ، تتسع النبضة بسبب ظاهرة تسمى "التشتت اللوني" ، والتي تسببها الأطوال الموجية التي تنتقل بسرعات مختلفة قليلاً. على وجه التحديد ، يسافر اللون الأزرق (الموجة القصيرة) أسرع من اللون الأحمر (الموجة الطويلة). إذا لم يتم تصحيح التشتت ، فإن حدة (أو سرعة) النبض تكون محدودة. لعلاج مشاكل التوسيع الزمني هذه، نركز على تقنيات تعويض التشتت اللوني. تمت دراسة ثلاث تقنيات تعويض: الأولى تستخدم الألياف التعويضية (DCF) ، والثانية تستخدم مقضب الألياف الزجاجية (FBG) بينما يمثل الطرف النهائي تعويض التشتت

الإلكتروني (EDC) ، ستسمح لنا هذه المكونات بالتعويض عن التشتت اللوني. قمنا بإجراء عمليات محاكاة باستخدام برنامج "optiwave" وتمكننا من تطبيق تقنيات التعويض المختلفة هذه.

الكلمات المفتاحية: سلسلة النقل ، الألياف الضوئية أحادية الوضع ، SMF ، التشتت اللوني ، DCF ، FBG ، EDC ، optiwave.

Liste des figures

FIGURE	Titre	Page
Figure I.1	Schéma synoptique d'une chaîne de transmission numérique	04
Figure I.2	Chaîne de transmission de l'information	05
Figure I.3	Le signal analogique et le signal numérique	06
Figure I.4	Structure d'une fibre optique	07
Figure I.5	Réflexion totale	07
Figure I.6	Ouverture Numérique	08
Figure I.7	Transmission d'une fibre optique	08
Figure I.8	Réflexion et réfraction d'un rayon incident sur la surface de séparation des deux milieux.	09
Figure I.9	Affaiblissement dans la fibre optique	10
Figure I.10	Les différentes causes de l'affaiblissement	10
Figure I.11	La dispersion d'une fibre optique	11
Figure I.12	La propagation du signal dans une fibre multimode à saut d'indice :a) Section de profil d'indice d'une fibre multimode à saut d'indice ;b) Le chemin optique emprunté par les rayons lumineux.	11
Figure I.13	La propagation du signal dans une fibre multimode à saut d'indice :a) Section de profil d'indice d'une fibre multimode à gradient d'indice ; b) Le chemin optique emprunté par les rayons lumineux.	12
Figure I.14	La propagation du signal dans une fibre monomode: a) Section de profil d'indice d'une fibre monomode ; b) Le chemin optique emprunté par les rayons lumineux est unique.	12
Figure I.15	Dispersion chromatique	14
Figure I.16	typique (a) profil d'indice de réfraction et (b) dispersion et perte en fonction de la longueur d'onde. Δn est défini comme la variation de l'indice de réfraction par rapport à la gaine.	16
Figure I.17	compensation de la dispersion chromatique par DCF dans une chaîne de transmission	16
Figure I.18	compensation de dispersion par DCF.	18

Figure I.19	Réseaux de Bragg	19
Figure I.20	Structure du changement d'indice de réfraction dans un FBG uniforme (1), un FBG chirpé (2), un FBG incliné (3) et une superstructure FBG (4).	19
Figure I.21	: Profil d'indice de réfraction au cœur de, 1) un FBG uniforme positif uniquement, 2) un FBG apodisé gaussien, 3) un FBG apodisé en cosinus surélevé avec un changement de zéro-dc, et 4) un déphasage discret FBG.	20
Figure I.22	Un réseau de Bragg à fibre modulée compense la dispersion en réfléchissant différentes longueurs d'onde à différents emplacements le long de l'axe du réseau.	20
Figure I.23	Principe d'utilisation d'un compensateur basé des réseaux de Bragg à pas variable	21
Figure I.24	Interférence entre symboles dans une fibre sans compensation de dispersion électronique	21
Figure I.25	Chaîne de transmission optique	22
Figure II.1	La bibliothèque de logiciel Optisystem	25
Figure II.2	Les fenêtres d'Optisystem.	26
Figure II.3	Schéma d'un photodétecteur sous Optisystem.	26
Figure II.4	Interface de définition du photodétecteur	27
Figure II.5	Les paramètres de la fibre utilisée.	27
Figure II.6	Le paramétrage d'un composant.	28
Figure II.7	Modification des paramètres globale du layout.	28
Figure II.8	Démarrage de la simulation.	29
Figure II.9	Affichage des résultats de la simulation.	29
Figure II.10	Composants du système de communication optique.	30
Figure II.11	La bibliothèque des émetteurs optiques	30
Figure II.12	La bibliothèque des fibres optique.	31
Figure II.13	La bibliothèque des récepteurs optiques	31
Figure II.14	Diagramme de l'œil d'un signal au format NRZ.	31

Figure II.15	Diagramme de l'œil d'une transmission par fibre optique	33
Figure III.1	Composants du système de communication optique	36
Figure III.2	Composants de l'émetteur	37
Figure III.3	Fibre 60 km, Fibre 90 km et Fibre 120 km.	38
Figure III.4	Composants du récepteur	38
Figure III.5	BER à Fibre 95 km.	39
Figure III.6	Conception du récepteur.	39
Figure III.7	Récepteur EYE Idéal	40
Figure III.8	Récepteur EYE Dégradé.	41
Figure III.9	Seuil EYE du récepteur	42
Figure III.10	Dispersion après compensation	43
Figure III.11	Dispersion avant compensation.	43
Figure III.12	Dispersion symétrique-compensation	44
Figure III.13	Le facteur Q verse le temps du signal à des taux de bits de 2,5 et 10 Gbps pour les compensations de dispersion pré, post-et symétrique.	46
Figure III.14	Performances du système à des taux de bits de 2,5 et 10 Gbps pour les compensations de dispersion pré, post-et symétrique. Les diagrammes oculaires sont affichés pour des puissances de signal de -12 et 10 dBm	47
Figure III.15	layout du projet	48
Figure III.16	Diagramme d'œil pour la modulation RZ avec des paramètres optimaux.	48
Figure III.17	Diagramme oculaire pour la modulation NRZ avec des paramètres optimaux	49
Figure III.18	Dispersion de la durée des liaisons compensées	50
Figure III.19	Évolution du signal dans une durée de liaison compensée par dispersion	52
Figure III.20	Avant smf et signal de sortie compensé	53
Figure III.21	Disposition du projet pour la compensation de dispersion avec une fibre à de réseau de Bragg à pas variable chirpé et apodisé dans OptiSystem	54
Figure III.22	Impulsion gaussienne initiale	55

Figure III.23	Impulsion gaussienne après propagation de 10 km en SMF	55
Figure III.24	Paramètres du réseau de Bragg à fibre optique, apodisé uniformément et chirpé linéairement	56
Figure III.25	Impulsion après compensation de dispersion avec réseau de fibres avec apodisation uniforme et chirp linéaire	56
Figure III.26	Plan du projet pour le filtre avec un composant de réseau Bragg à fibre uniforme dans OptiSystem	57
Figure III.27	Spectre initial de source de lumière blanche	57
Figure III.28	propriétés du réseau de Bragg à fibre uniforme	58
Figure III.29	Spectres réfléchis du réseau de Bragg uniforme pour une réflectivité de 0,19, 0,59 et 0,99	58
Figure III.30	Spectres transmis à partir d'un réseau de Bragg uniforme pour une réflectivité de 0,19 et 0,99.	59
Figure III.31	Disposition du projet pour un filtre avec un réseau de Bragg à fibre uniforme dans OptiSystem utilisant l'impulsion gaussienne	59
Figure III.32	Balayage du cycle de service	60
Figure III.33	Spectres initiaux des impulsions gaussiennes, rapport cyclique 0,5 et 0,05 (12,5 ps et 1,25 ps, respectivement).	60
Figure III.34	Spectres réfléchis des impulsions gaussiennes, rapport cyclique de 0,5 et 0,05, respectivement.	60
Figure III.35	Spectres transmis des impulsions gaussiennes, rapport cyclique de 0,5 et 0,05, respectivement.	61
Figure III.36	Disposition du projet pour la compensation de dispersion avec réseau de fibres avec chirp linéaire	62
Figure III.37	Impulsion initiale	62
Figure III.38	Impulsion après propagation de 10 km en SMF	63
Figure III.39	Données de base	63
Figure III.40	Boîte de dialogue de « définition le réseau »	64
Figure III.41	Impulsion après compensation de dispersion avec FBG linéairement chirpée	64
Figure III.42	Disposition du projet pour la compensation de dispersion	65

	avec FBG avec algorithme de diffusion inverse	
Figure III.43	Impulsion après compensation de dispersion avec réseau de fibres FBG généré dans OptiGrating avec un algorithme de diffusion inverse et de dispersion accumulée égale à -160 ps/nm	65
Figure III.44	Disposition du projet pour la compensation de dispersion avec un composant de dispersion idéal dans OptiSystem	66
Figure III.45	Impulsion gaussienne initiale	67
Figure III.46	Impulsion gaussienne après 10 km de propagation en SMF.	68
Figure III.47	Paramètres de la composante de compensation de la dispersion idéale.	68
Figure III.48	Impulsion après compensation de dispersion avec composant de compensation de dispersion idéale.	69
Figure III.49	Compensation GVD	70
Figure III.50	Diagramme d'œil avant et après l'égaliseur.	71

Liste des abréviations

CAN	convertisseur analogique / numérique
ON	Ouverture Numérique
WDM	Wavelength Division Multiplexing
LAN	Local Area Network
SAN	Storage Area Network
MAN	Metropolitan Area Network
CATV	câble TV
OSA	Optical Spectrum Analyzer
TEB	Taux d'erreur binaire
PAM	Pulse Amplitude Modulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
PSK	Phase Shift Keying
SMF	Single Mode Fiber
LD	longueur de dispersion
EDFA	Erbium Dopped Fiber Amplifier
RZ	Return to Zero
NRZ	Non Return to Zero
CW	Continuous Wave
AMZI	Asymmetric Mach Interféromètre Zehnder
ISI	Interférence Inter-symbole
DCF	Dispersion Compensating Fibre

SOMMAIRE

SOMMAIRE	
Remerciements	II
Dédicaces	III
Résumés	IV
Liste des figures	V
Liste des abréviations	X
Sommaire	XI
INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I : Généralités sur la transmission et les fibres optiques	
I.1. Introduction	04
I.2. La chaine de transmission d`information	04
I.2.1. Analyse de la chaine de transmission	04
I.2.2. Les signaux analogiques et les signaux numériques	05
I.2.2.1. Signal analogique	05
I.2.2.2. Signal numérique	05
I.3. La fibre optique	06
I.3.1. Présentation générale des fibres optiques	06
I.3.2. Définition d`une fibre optique	07
I.3.3. Quelques importantes notions	07
I.3.3.1. Réflexion totale	07
I.3.3.2. Ouverture Numérique ON	08
I.3.3.3. fonctionnement d`une fibre optique	08
I.3.4. Propagation de la lumière dans le fibre	09
I.3.4.1. L`atténuation	09

I.3.4.2. Dispersion	10
I.3.5. Types des fibres optiques	11
I.3.5.1. Fibre multi-mode	11
I.3.5.1.1. Fibre optique multi-mode a saut d`indice	11
I.3.5.1.2. Fibre optique multi-mode a gradient d`indice	11
I.3.5.2. Fibre monomode	12
I.3.6. Application de la fibre optique	13
I.3.7. Avantages et inconvénient des fibres optique	13
I.3.7.1. Avantages des fibres optique	13
I.3.7.2. Inconvénient des fibres optique	13
I.4. La dispersion chromatique	14
I.4.1. Gestion de la dispersion à l'aide de DCF	15
I.4.1.1. Introduction	15
I.4.1.2. Formats de modulation	15
I.4.1.3. Compensation de dispersion à l'aide du DCF	16
I.4.2. Compensation de dispersion par FBG	18
I.4.2.1. Introduction	18
I.4.2.2. Structure de réseau	19
I.4.3. Compensation de dispersion électronique (EDC)	21
I.5. Structure récapitulative d'une chaine de transmission optique	22
I.6. Conclusion	22
CHAPITRE II : description du logiciel optiwave	
II.1. Introduction	25
II.2. Présentation du logiciel	25
II.2.1. Interface de l'OptiSystem	25
II.2.2. Paramètres caractéristiques	26
II.2.3. Application d'OptiSystem	28
II.2.4. Avantages d'OptiSystem	28
II.2.5. Edition et simulation	28
II.3. Conception d'une liaison optique	30
II.3.1. Emetteur optique	30

II.3.2.Le canal de transmission	30
II.3.3.Récepteurs optiques	31
II.4. Critères et méthodes d'évaluer la qualité de transmission	31
II.4.1. Diagramme de l'œil	31
II.4.2. Taux d'erreur binaire (TEB)	32
II.4.3. Facteur de qualité Q	32
II.5. Les performances d'une liaison optique	32
II.6.La technologie WDM	33
II.6.1. Principe de WDM	33
II.7. Catégories de signaux dans la bibliothèque d'optisystème	33
II.7.1. Signaux électriques	33
II.7.2. Signaux binaires	33
II.7.3. Signaux optiques	34
II.7.4. Signaux M-aire	34
II.8. Conclusion	34
CHAPITRE III : Simulation et Interprétation Des Résultats	
III.1. Introduction	36
III.2. chaine de transmission à fibre optique	36
III.2.1. Émetteur optique	36
III.2.2. Canal de transmission	37
III.2.3. Récepteurs optiques	38
III.2.4.Conception du récepteur	39
III.3. compensation de dispersion chromatique par DCF	42
III.3.1. Pré-, post-, et symétrique-compensation en utilisant DCF	43
III.4. Optimisation de la compensation de puissance et de dispersion pour la transmission RZ non Linéaire	47
III.5. Compensation de dispersion à l'aide de sous-systèmes	49
III.6. Compensation de la dispersion avec composant grating de Bragg de fibre	54
III.7. Uniform fiber Bragg grating comme un filtre	56
III.8. Compensation de dispersion avec OptiGrating	61
III.8.1. Réseau de Bragg à fibres à pas variable linéairement	62
III.8.2. Réseau de Bragg à fibre conçu au moyen d'un algorithme de diffusion inverse	65
III.9. Compensation de la dispersion avec composant de dispersion idéal	66
III.10. Compensation de dispersion à l'aide de la péréquation électronique	69
III.11. Conclusion	71
CONCLUSION GÉNÉRALE	72
Références bibliographiques	75

INTRODUCTION GENERALE

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 média 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.

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), les fibres à réseau de Bragg (FBG) et la compensation de dispersion électronique (EDC).

Ce mémoire est organisé comme suit, le premier chapitre est consacré aux généralités sur la transmission et les fibres optiques, Dans ce chapitre, nous allons présenter la transmission du signal dans les fibres optiques, on va mettre un coup d'œil sur les différents types de ces fibres et on va présenter leurs principales caractéristiques, après nous étudierons un problème important qui influence énormément sur la forme du signal dans les fibres optiques ,ce problème est la dispersion chromatique, d'autre part on va présenter les différentes techniques pour compenser cette dispersions.

Dans le deuxième chapitre, une description de logiciel de simulation « optiwave » est évoqué, ce logiciel nous va permettre de simuler et étudier les différentes structures utilisés dans ce mémoire.

Dans le troisième chapitre nous présenterons les résultats de notre travail.

Chapitre I:
**Généralités sur la transmission et
les fibres optiques**

I.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous inclurons un aperçu général de la chaîne de transmission d'information. Ensuite, nous nous concentrerons sur les chaînes de transport modernes. Nous définirons les signaux analogiques et numériques pour le moment.

Les fibres optiques, quant à elles, remplissent une fonction. Nous examinons toujours la façon dont la lumière se propage à travers les fibres.

I.2. chaînes de transmission d'informations

Une chaîne de transmission de données est un ensemble de dispositifs qui permettent de transférer des données d'un emplacement à un autre. Une chaîne de transmission se compose de plusieurs éléments: une source; un canal de transmission qui est un processus physique; et une destination [1]. De nos jours, les satellites et les fibres optiques permettent la transmission de divers types de données à des vitesses extrêmement élevées sur des milliers de kilomètres.

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique est donné à la figure ci-dessous (figure I.1).

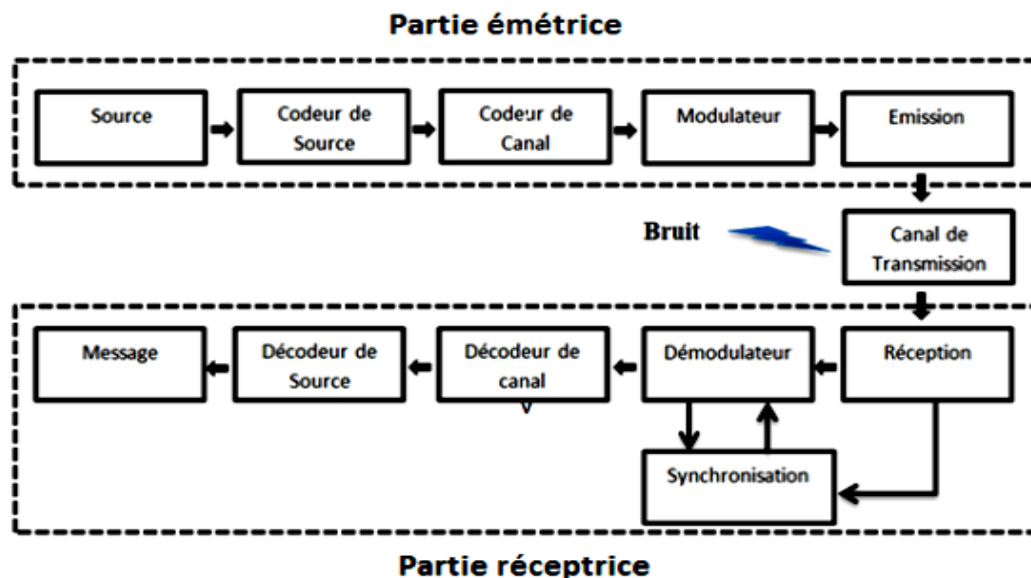


Figure I.1 Schéma synoptique d'une chaîne de transmission numérique

I.2.1. Analyse de la chaîne de transmission

De manière générale, l'analyse d'une chaîne de transmission de données est influencée par les étapes suivantes :

- Transmission de message: la transformation d'une grandeur physique en une autre. Le

microphone, par exemple, convertit un signal sonore en un signal électrique.

- Codage des messages. Conversion analogique / numérique, par exemple.

Le terme «canal de transmission» fait référence à la méthode par laquelle un signal est transmis: ondes radio, câble en cuivre, câble à fibre optique, etc. On distingue les environnements de propagation de signaux sans support physique (ondes), dans lesquels le signal se déplace librement dans un environnement «ouvert», et les environnements de propagation de signaux avec support physique (câble, fibre optique), dans lesquels le signal est canalisé [2].

- Réception du signal. Un exemple est une station de télévision.
- Décodage des messages. Sa fonction est diamétralement opposée à celle du codeur.
- Conversion d'un signal en une taille physique que le destinataire peut percevoir. Par exemple, un haut-parleur est un appareil qui convertit un signal électrique en un signal sonore.

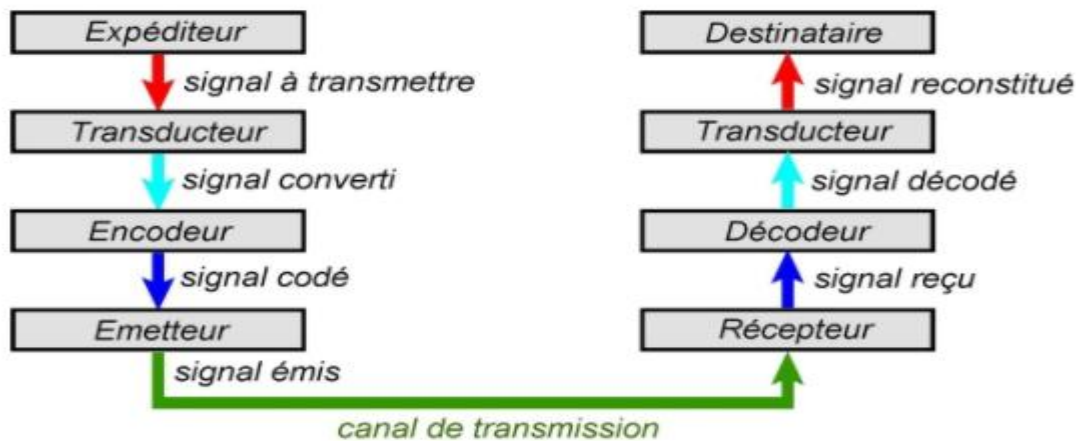


Figure I.2: Chaîne de transmission de l'information

I.2.2. Les signaux analogiques et numériques

Dans les réseaux de communication de données contemporains, il existe deux types de signaux: analogiques et numériques.

I.2.2.1. Signal analogique

Un signal analogique est un signal qui change au fil du temps de manière cohérente. Lors de la réalisation d'une copie analogique d'un signal, le but est de reproduire au plus près le signal en cours d'enregistrement (audio, vidéo, etc.) sur un support (généralement magnétique). De ce fait, lors de la copie d'un signal analogique, l'amplitude électrique du signal analogique sera l'image plus ou moins fidèle du signal à enregistrer (audio, vidéo ...).

I.2.2.2. Signal numérique

Un signal numérique est un signal qui varie de manière prévisible dans le temps. C'est une série de 0

et de 1 appelé série de bits. On dit qu'il est binaire. Le signal analogique à enregistrer est converti en signal numérique à l'aide d'un convertisseur analogique / numérique (CAN). Le CAN convertit le signal en une séquence de nombres binaires. Contrairement aux signaux analogiques, qui peuvent prendre un nombre infini de valeurs, les signaux numériques ne sont qu'une série de 0 et de 1 après la conversion. La partie numérique du signal n'est utilisée que pour le transport, le stockage et le traitement des données. Un signal analogique est beaucoup plus difficile à reproduire qu'un signal numérique: La copie numérique crée une réplique exacte de l'original.

Il est également très facile de gérer l'utilisation d'ordinateurs.

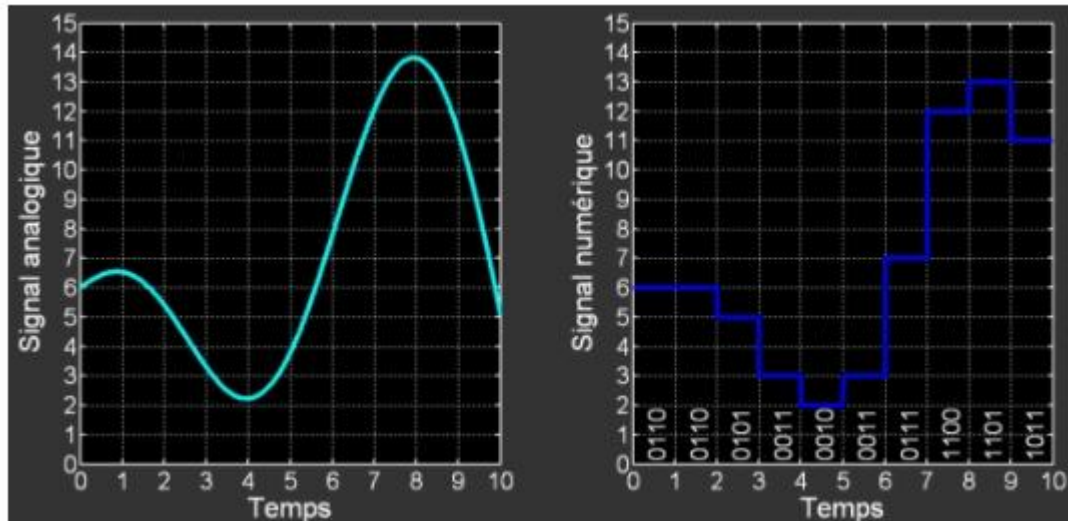


Figure I.3: Le signal analogique et le signal numérique

I.3. La fibre optique [3] [4]

La fibre optique devient rapidement une technologie très intéressante dans le domaine des télécommunications, c'est un support de transmission, et voici quelques-uns des nombreux avantages qui justifient son utilisation dans les systèmes de transmission :

- **Performances de transmission** : très faible atténuation, large bande passante disponible, multiplexage pratique.
- **Avantages de mise en œuvre** petite stature, grande souplesse, poids léger.
- **Sécurité électrique** : isolation complète entre les bornes; utilisation dans des environnements explosifs ou sous de fortes tensions.
- **Sécurité électromagnétique** : Immunisé aux parasites et ne les produit pas, ce qui lui confère une invulnérabilité quasi totale.
- **Avantage économique** : Réduisez le coût par rapport aux autres options.

I.3.1. Présentation générale des fibres

La plupart du temps, les fibres optiques sont en silice, un matériau similaire au verre. Ce composé peut être trouvé dans la nature dans une variété de minéraux, y compris le quartz. La fabrication des fibres optiques est basée sur la conception du profil de verre. Nous pouvons allonger un tube de verre de 1 mètre de long et 10 cm de diamètre pour créer une fibre optique de 150 kilomètres de long grâce à une technologie sophistiquée. Une fibre optique est un guide optique formé au centre d'un noyau à indice de réfraction élevé (figure I.4). Autour de lui, on trouve la gaine dite optique, qui a un indice de réfraction inférieur et un diamètre extérieur d'environ 125µm pour les fibres traditionnelles.

La gaine mécanique est ajoutée pour protéger les fibres optiques tout en améliorant également la résistance mécanique.

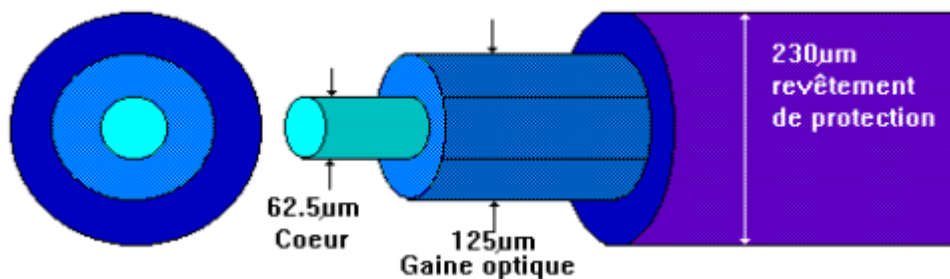


Figure I.4: Structure d'une fibre optique.

Enfin, les fibres optiques ne nécessitent pas d'entretien particulier et ont une excellente durabilité chimique, tandis que le fil de cuivre se dégrade rapidement en raison de la corrosion. Actuellement, 80 pour cent des appels longue distance sont effectués sur un réseau de fibre optique [5].

I.3.2. Définition d'une fibre optique

Un câble à fibre optique est un câble en verre fin et transparent qui a la capacité de conduire la lumière et est utilisé dans la communication de données sur terre et en mer.

Elle a un taux de transmission de données significativement plus élevé que les câbles coaxiaux et supporte un réseau «large bande» sur lequel la télévision, le téléphone, la visioconférence et les données informatiques peuvent tous être transmis [6].

I.3.3. Quelques importantes notions :

I.3.3.1. Réflexion totale

Le phénomène de réflexion absolue, comme le montrent les lois de Descartes, provoque la propagation de la lumière au centre de la fibre (voir la figure I.5).

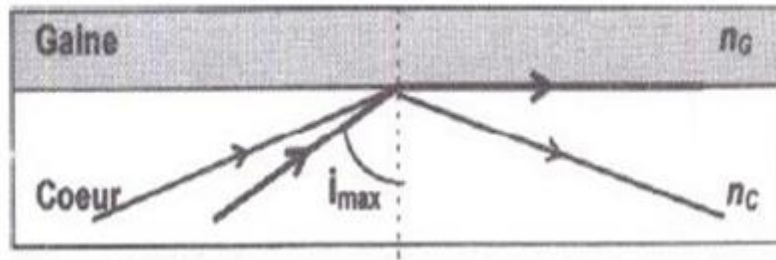


Figure I.5 : Réflexion totale.

Lorsque l'angle d'incidence I est supérieur à la valeur maximale I_{max} , un rayon est réfléchi à la frontière entre deux indices de réfraction différents.

$$\sin(I_{max}) = \frac{n_G}{n_C}$$

Où n_G et n_C sont les indices de réfraction qui caractérisent respectivement les environnements gaine et cœur.

Les mesures des fibres sont exprimées en micromètres $n_C > n_G$.

Sur la base de cette loi optique, on peut déjà définir l'une des caractéristiques fondamentales de la fibre: l'ouverture numérique [25].

I.3.3.2. Ouverture Numérique (ON)

Ce nombre, compris entre 0 et 1, représente la capacité de la fibre à collecter et à propager la lumière (angle d'acceptation).

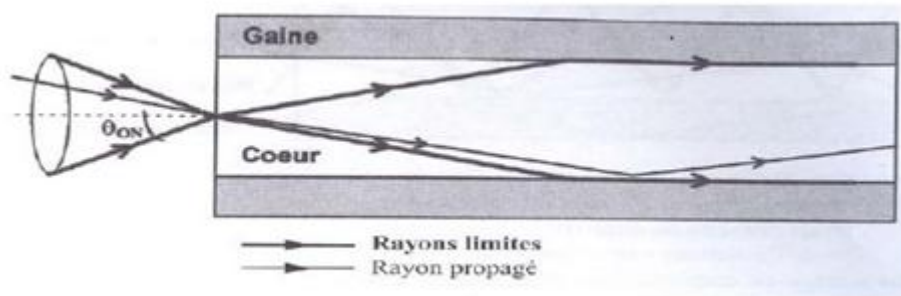


Figure I.6. Ouverture Numérique.

$$ON = \sin \theta_{ON} = \sqrt{(n_C^2 - n_G^2)}$$

Il est possible de définir un cône d'approbation dans lequel toute la lumière entrante est guidée à travers la fibre par réflexion absolue.

Si ON est faible, la bande passante sera améliorée, mais l'injection de lumière sera plus délicate

(voir figure I.6)[25].

I.3.3.3. Fonctionnement d'une fibre optique

Un monomode (fibre monomode) ou plusieurs modes (fibre multimode) peuvent être transmis par une seule fibre optique (fibre optique multimode). Par angle d'injection de la rayonne dans la fibre optique est appelé un mode (voir figure I.7). La forme de la fibre, ainsi que la longueur de la longueur d'onde de transmission, déterminent si elle est monomode ou multimode. Chaque mode de transmission est autonome et suit un chemin différent (et, par conséquent, des temps de transmission différents) [7].

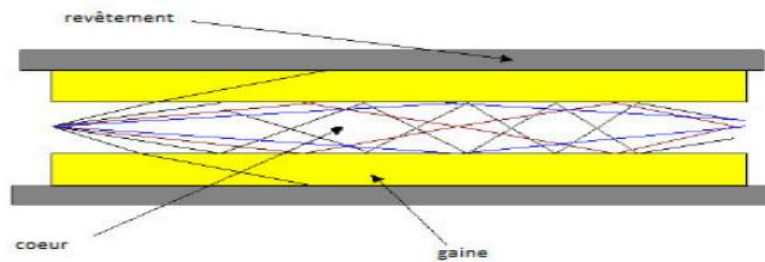


Figure I.7: Transmission d'une fibre optique.

I.3.4. Propagation de la lumière dans la fibre

La vitesse de la lumière dans le vide est de $3 \cdot 10^8$ m / s, bien qu'elle varie considérablement en fonction des densités des matériaux qu'elle traverse. Pour décrire la densité des matériaux, on utilise le terme «indice de réfraction absolu», qui est défini comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de la lumière dans le cadre considéré (v). L'indice de réfraction absolu est calculé comme suit:

$$n = \frac{c}{v}$$

Lorsqu'une onde lumineuse frappe la surface de séparation de deux environnements différents, elle se divise en deux rayons:

- Un rayon réfléchissant: qui continue de se répandre dans le premier réglage.
- Un rayon réfractant: qui se propage dans le second environnement.

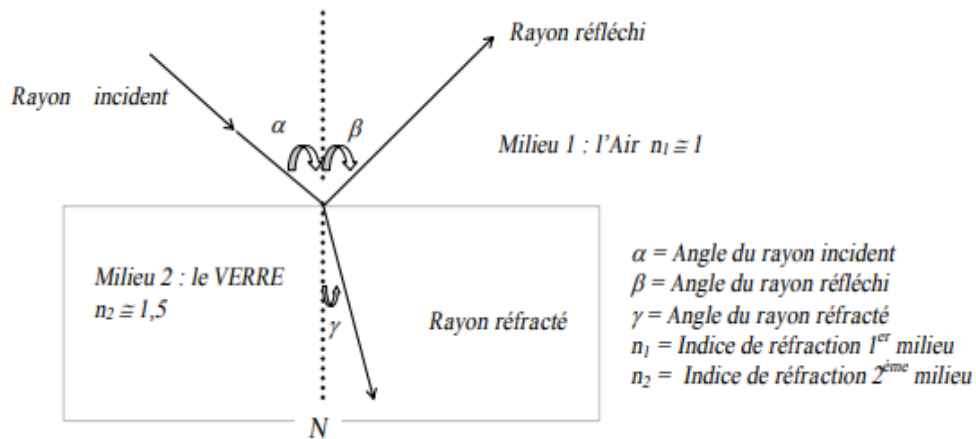


Figure I.8: Réflexion et réfraction d'un rayon incident sur la surface de séparation des deux milieux.

En conséquence, l'écart de la longueur d'onde réfractée par rapport à la longueur d'onde incidente peut être calculé en utilisant la relation de Snell [14]:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\gamma)} = \frac{n_2}{n_1}$$

n_1 est l'indice de l'environnement de la rayonne incidente et n_2 est l'indice de l'environnement de la rayonne réfractée.

I.3.4.1. L'atténuation

L'un des problèmes les plus graves des systèmes de transmission d'informations est la perte de puissance de la lumière émise; cette atténuation n'est pas proportionnelle à la fréquence du signal optique lors de la transmission. La mesure absolue est en décibels (atténuation relative) et en décibels par milliwatt (dB par milliwatt) [25].

Les périodes de longueur d'onde où l'atténuation varie légèrement et il existe une limite locale (Figure I.9) [7] sont souvent décrites comme des fenêtres de transmission.

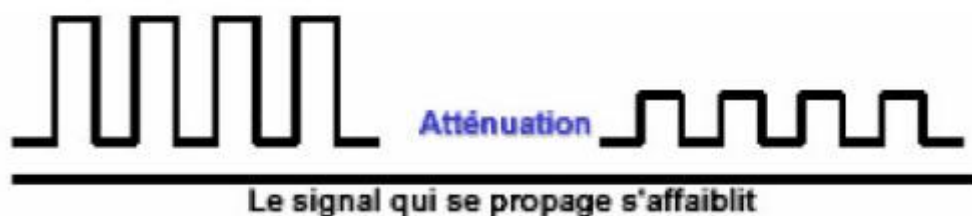


Figure I.9: affaiblissement dans la fibre optique.

Voici les différentes sources d'affaiblissement (figure 1.10) :

- Une bordure prononcée qui augmente les pertes dues à la réfraction.
- Affaiblissement par absorption atomique ou électronique.

- Par voie d'absorption moléculaire.
- La dispersion de Rayleigh est une sorte de dispersion de Rayleigh. Cela est dû à des changements d'indice au niveau microscopique [7].

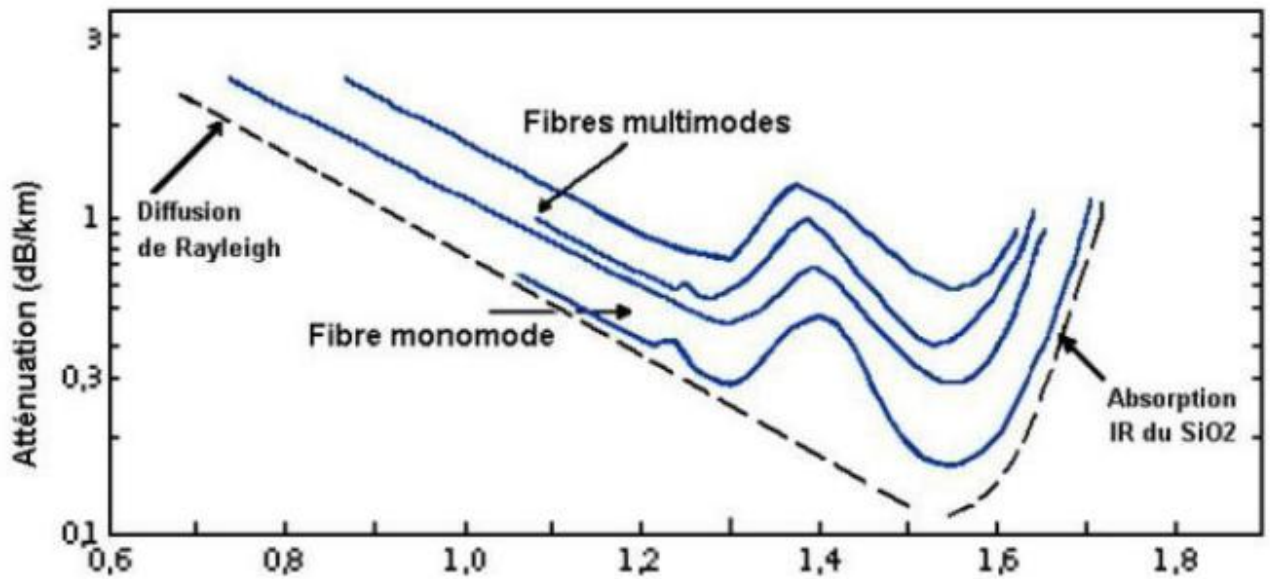


Figure I.10: Les différentes causes de l'affaiblissement.

I.3.4.2. Dispersion

Lorsque nous devons envoyer un signal sur un câble à fibre optique, nous utilisons un émetteur laser pour le faire. Cette impulsion n'est pas idéale car elle se détériore avec le temps. Dans une transmission idéale, la sortie aurait la même impulsion que l'entrée, mais cette impulsion aurait une durée plus longue (voir Figure. I.11) [7].

Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène:

- Dispersion multimodale.
- Dispersion chromatique.



Figure I.11: La dispersion d'une fibre optique.

I.3.5. Type de fibre optique

Il existe deux types de fibres optiques: monomode et multimode. Les fibres multimodes sont divisées en deux parties: les fibres à saut d'indice et les fibres à gradient d'indice.

I.3.5.1. Fibre multi-mode

La fibre multimode a été la première à être utilisée. Il est simple à utiliser (grand curseur), mais il a une contrainte de bande passante ... De ce fait, elle est limitée aux courtes distances: les réseaux informatiques. La fibre optique est divisée en deux moitiés.

I.3.5.1.1. Fibre multi-mode à saut d'indice

Les indices de réfraction du brassard et de la gaine sont fixes.

Un saut d'indice marque le passage d'un support à un autre (**Figure I.12 -a**).

Le Faisceau est un personnage fictif qui apparaît dans le film fais lorsque la fibre entre en sortie en empruntant les différents chemins optiques (**Figure I.12 -b**), l'injection optique se produit, entraînant des temps de propagation différents. En conséquence, le phénomène connu sous le nom de dispersion modale [4] est la distribution d'un signal émis (**Figure I.12**).

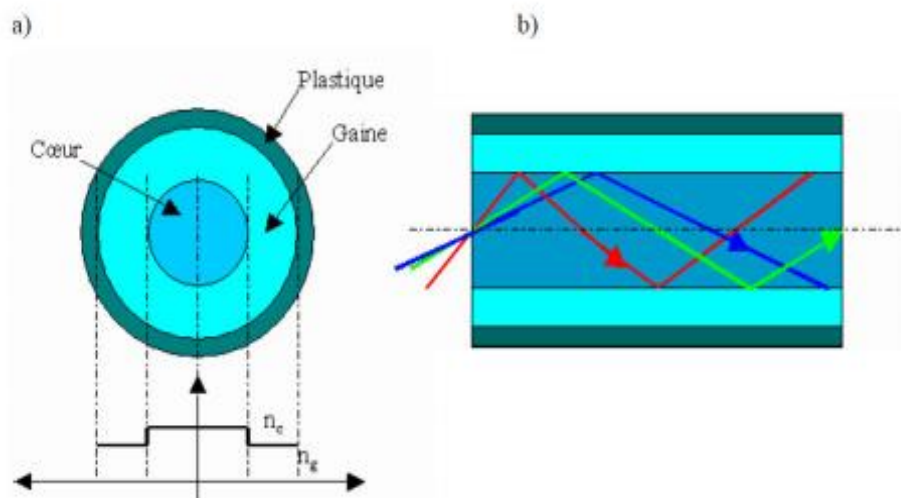


Figure I.12 : La propagation du signal dans une fibre multimode à saut d'indice :

- a) Section de profil d'indice d'une fibre multimode à saut d'indice ;
- b) Le chemin optique emprunté par les rayons lumineux.

I.3.5.1.2. Fibre multi-mode à gradient d'indice

Le cœur est caractérisé par un indice variable qui augmente progressivement à partir d'une interface entre la gaine et le cœur de la fibre (Figure I.13). De même que les rayons lumineux, il peut emprunter des chemins différents, mais une utilisation judicieuse du profil de courbure lui permettra de combler l'écart entre les temps de chemin adjacents et ainsi de réduire la propagation du signal [4].

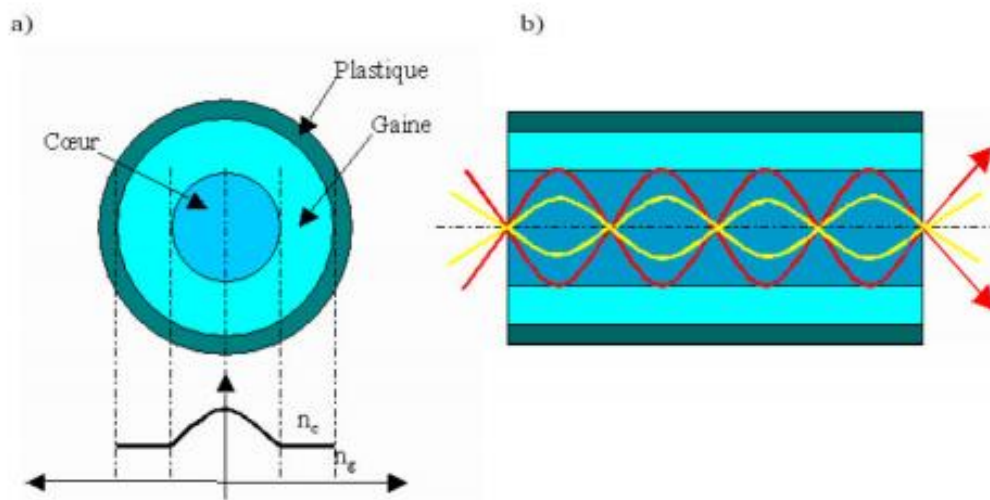


Figure I.13: La propagation du signal dans une fibre multimode à gradient d'indice : a) Section de profil d'indice d'une fibre multimode à gradient d'indice ; b) Le chemin optique emprunté par les rayons lumineux

I.3.5.2. Fibre monomode

Le cœur a un diamètre d'environ $9 \mu\text{m}$. Elle est fabriquée à base de silice. Elle est aussi nommée fibre SM. La fibre monomode dont le cœur est si fin que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement direct. En termes de fonctionnement, un seul mode se propage, ce qui signifie qu'il y a moins de dispersion modale, mais l'injection de lumière est plus délicate.

La dispersion modale est quasi inexistante, et il n'y en a qu'une. Puisque les longueurs du cœur sont les mêmes que la longueur de l'onde du signal et la très petite ouverture numérique, c'est le seul mode de distribution. (Voir Figure I.14) [4].

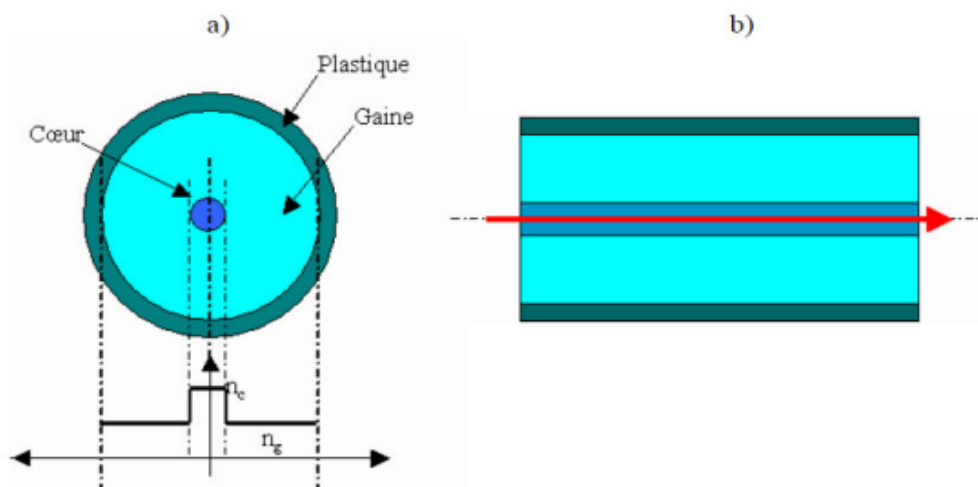


Figure I.14: La propagation du signal dans une fibre monomode : a) Section de profil d'indice d'une fibre monomode ; b) Le chemin optique emprunté par les rayons lumineux est unique.

I.3.6. Applications de la fibre optique

Dans les télécommunications, la fibre optique est utilisée pour transmettre des données, qu'il s'agisse d'appels téléphoniques, de photographies ou de données, et en médecine, elle sert à transmettre des informations. Pour un traitement, la fibre optique sert à transporter la forte lumière d'un laser vers l'intérieur du corps humain, où elle interagit thermiquement avec les tissus : En chirurgie, un faisceau laser est utilisé pour pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétineetc [8].

I.3.7. Les Avantages et les inconvénients d'une fibre optique

I.3.7.1. Avantages

- Atténuation des pertes inférieures: perte monomode aussi faible que 0,2 dB / km et perte multimode d'environ 1 dB / km
- Insensibilité au bruit: les interférences électromagnétiques et la propagation des radiofréquences ont peu d'effet sur la transmission.
- Bande passante élevée: taux de transfert jusqu'à 40 Gb / s (OC-768) dans sa forme la plus simple, une fibre a la même taille qu'un cheveu humain (1,25 mm), et un câble contenant 12 paires de fibres optiques, chacune avec un diamètre de 1,4 cm, équivaut à un câble contenant 900 paires de fils de cuivre, chacun d'un diamètre de 8 cm.
- Légèreté: un câble en cuivre de 900 paires pèse (8000 kg / km) contre un câble en fibre optique de 900 paires pèse (660 kg / km).
- Sécurité de la transmission
- Sécurité électrique: la fibre n'est pas sensible aux parasites électriques et ne les génère pas.
- Température ambiante: une fibre peut fonctionner dans une large gamme de températures (-40°C à 100°C).

I.3.7.2. Inconvénients

- Propagation: La transmission du signal dans les câbles à fibres optiques doit être répétée sur une certaine distance à l'aide d'amplificateurs, mais elle nécessite beaucoup moins de répétitions que les câbles en fil de cuivre.
- Excitations micromécaniques importantes (connexions, alignement).
- Fragilité: lorsque le câble est rayé ou fissuré, les fibres peuvent être cassées ou la transmission perdue. Cependant, en enveloppant les fibres dans une gaine en plastique, il est difficile de pincer le câble sans casser la fibre.
- Sécurité: par rapport au cuivre, les fibres optiques ont besoin de plus de protection autour de la bobine.
- Le principal inconvénient de la fibre est le phénomène d'atténuation.

Lors du déplacement du signal, on peut assister à une perte d'énergie lumineuse pour plusieurs raisons :

- La fibre n'est pas pure à 100 %, d'où l'absorption des photons.
- La dispersion dans la fibre entraîne des erreurs au niveau des récepteurs.
- La lumière qui compose la source n'est pas monochromatique et les différentes longueurs d'onde ne se propagent pas à la même vitesse dans le cœur de la fibre. Plus ce délai différentiel est long, plus le nombre d'erreurs sera important.
- Les courbures de la fibre qui modifient l'inclinaison à laquelle le rayon lumineux frappe la paroi de la gaine peuvent interférer sur le principe de la réflexion totale. Il y aura donc une réflexion simple qui créera des pertes du rayon lumineux.
- Lorsque deux fibres doivent être connectées l'une à l'autre, on assiste parfois à des problèmes de connectivité.

Ces problèmes sont la principale source d'atténuation. Il faut en effet un alignement parfait entre les deux fibres dont le cœur est parfois extrêmement petit (10 μm pour la fibre monomode).

L'atténuation dépend du type de fibres employées (voir « Les différents types de fibres »), ainsi que de la longueur d'onde choisie [9]:

- ▲ Fibre à saut d'indice: 2 à 5 dB/km
- ▲ Fibre à gradient d'indice: 0,9 à 3 dB/km
- ▲ Fibre monomode: de 0,2 à 1 dB/km

I.4. La dispersion chromatique

On peut associer une impulsion de lumière à une longueur d'onde bien précise, mais, en réalité, cette impulsion est composée d'une gamme étroite de longueurs d'onde (couleurs) autour d'une longueur d'onde centrale. Pendant son déplacement dans une fibre optique, l'impulsion s'élargit en raison d'un phénomène qu'on appelle la « dispersion chromatique », causé par le fait que les longueurs d'onde voyagent à des vitesses légèrement différentes. Plus précisément, le bleu (onde courte) se déplace plus vite que le rouge (onde longue). Si la dispersion n'est pas corrigée, la netteté (ou la rapidité) de l'impulsion s'en trouve limitée. En télécommunications, la dispersion limite également la longueur qu'une fibre peut avoir sans que les impulsions (et l'information qu'elles contiennent) commencent à se chevaucher.

La dispersion chromatique est un phénomène d'étalement du signal dans le temps résultant des différentes vitesses des rayons lumineux. La dispersion chromatique est la combinaison des effets de dispersion du matériau et du guide d'ondes.

La dispersion du matériau est causée par la dépendance de la longueur d'onde et de l'indice de réfraction sur le matériau de l'âme de la fibre. La dispersion du guide d'ondes se produit en raison de la dépendance de la constante de mode de propagation sur les paramètres de la fibre (rayon du cœur et différence entre les indices de réfraction dans le cœur de la fibre et la gaine de la fibre) et la longueur

d'onde du signal. À une fréquence particulière, ces deux effets peuvent s'annuler en donnant une longueur d'onde avec une dispersion chromatique d'environ 0.

De plus, la dispersion chromatique n'est pas toujours une mauvaise chose. La lumière voyage à des vitesses différentes selon des longueurs d'onde ou des matériaux différents. Ces vitesses variables provoquent l'étalement ou la compression des impulsions lorsqu'elles se déplacent le long de la fibre, ce qui permet de personnaliser l'indice de profil de réfraction pour produire des fibres pour différentes applications. Par exemple, les fibres G.652 sont conçues de cette manière.

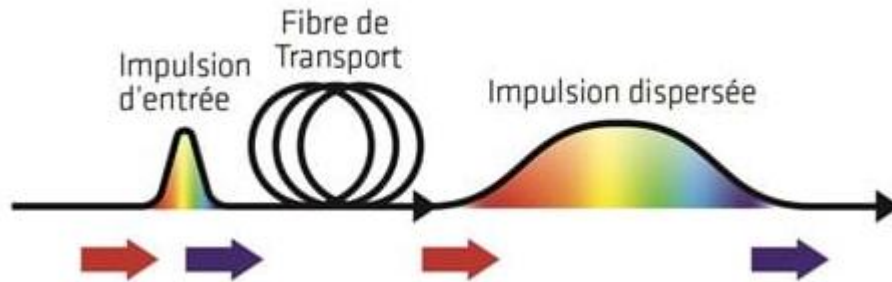


Figure I.15: Dispersion chromatique

Heureusement, même lorsque les impulsions sont si fortement élargies que le flux d'impulsions ne peut pas être reconnu, les informations ne sont pas perdues. C'est un peu comme l'image qui entre dans les yeux d'une personne myope : bien que l'image soit floue de telle sorte que la personne ne puisse pas lire les lettres sur un panneau, une correction appropriée, comme des lunettes, clarifie complètement l'image. De la même manière, un dispositif de compensation de dispersion est utilisé pour récupérer l'information en supprimant l'effet d'élargissement d'impulsion.

Pour remédier à ces problèmes d'élargissement temporel nous allons nous focaliser sur les techniques de compensation de la dispersion chromatique. Trois techniques de compensation seront envisagées : la première utilise la fibre compensatrice (DCF), la seconde utilise le réseau de Bragg à fibre (FBG) tandis que l'ultime représente la compensation de dispersion électronique (EDC). Ces composants vont nous permettre de compenser la dispersion chromatique.

I.4.1 Gestion de la dispersion à l'aide de DCF

I.4.1.1 Introduction

Au fur et à mesure que les systèmes de transmission par fibre optique ont évolué vers des distances plus longues et des débits binaires plus élevés, l'effet linéaire des fibres, qui est l'atténuation et la dispersion, devient le facteur limitant important. Quant aux systèmes WDM (Wavelength Division Multiplexed) qui transmettent plusieurs longueurs d'onde simultanément à même des débits binaires et des distances plus élevés, les effets non linéaires dans la fibre commencent à présenter une sérieuse limitation. Le succès des réseaux de transmission optique point à point longue distance à haut

débit binaire dépend de la meilleure façon de gérer les effets linéaires et non linéaires. Plusieurs méthodes sont décrites pour la gestion de la dispersion et de la non-linéarité.

La méthode traditionnellement acceptée de gestion de la dispersion consistait à installer des modules de compensation de dispersion passifs fixes (DCM) en ligne qui étaient construits à l'aide de fibres optiques spécifiquement dopées qui inversaient la dispersion chromatique subie. Cette solution est efficace pour la majorité des réseaux optiques 10Gbps. La plupart des compensations de dispersion chromatique déployées aujourd'hui sont de nature grossière dans la mesure où toutes les longueurs d'onde sont compensées simultanément, ce qui entraîne une approche moyenne où les longueurs d'onde à l'extrémité du spectre reçoivent trop peu ou trop de compensation. Des modules de compensation en pente récemment déployés ont amélioré cette situation. Cependant, pour une transmission à 40 Gbit/s, une compensation encore plus fine est requise, principalement en raison de l'extrême susceptibilité des réseaux à 40 Gbit/s à la dispersion.

Différentes approches existent pour obtenir une compensation plus fine depuis le regroupement de bandes de longueurs d'onde jusqu'à la compensation par longueur d'onde. L'utilisation de modules de compensation fixe pour effectuer une compensation très fine nécessite de nombreux modules aboutissant à une solution qui est de nature relativement à pertes et n'est pas une solution optimale. Les techniques de compensation de dispersion active permettront d'obtenir des solutions plus élégantes. La combinaison de la compensation de dispersion inclinée active et passive offre une solution encore plus optimale. L'utilisation d'une fibre de compensation de dispersion est l'une de ces solutions optimales. Les fibres de compensation de dispersion ont une dispersion négative et importante et peuvent donc contrecarrer la distorsion positive introduite dans la fibre en raison des diverses dégradations.

I.4.1.2. Formats de modulation

Afin d'obtenir des systèmes multiplexés par répartition en longueur d'onde avec une efficacité spectrale élevée, il est intéressant de fonctionner à des débits binaires de 40 Gbps par canal. Dans les lignes de transmission classiques, les formats retour à zéro (RZ) et non retour à zéro (NRZ) sont les deux formats de modulation les plus souvent utilisés. Alors que le format RZ est efficace pour lutter contre les SPM, le schéma NRZ permet une efficacité spectrale plus élevée par rapport au format RZ. En tant qu'alternatives aux schémas RZ et NRZ, plusieurs autres formats de modulation tels que le retour à zéro à suppression de porteuse (CSRZ), le retour à zéro à bande latérale unique (SSBRZ) et les modulations binaires en duo ont été proposés. CSRZ a une plus grande tolérance à la dégradation de la qualité du signal par rapport à SPM (self-phase modulation) et GVD (group-velocity dispersion) par rapport à RZ. Il réduit également les dégradations non linéaires dans les lignes de transmission.

I.4.1.3 Compensation de dispersion à l'aide du DCF

L'une des premières techniques de compensation de dispersion consistait à déployer des sections de fibre spécialement conçues avec une dispersion chromatique négative. La technologie pour DCF est apparue dans les années 1980 et s'est considérablement développée depuis l'avènement des amplificateurs optiques en 1990. DCF est le compensateur de dispersion le plus largement déployé, offrant un fonctionnement à large bande et des caractéristiques de dispersion stables, et l'absence d'une solution DCF dynamique et réglable n'a pas réduit sa popularité.

Comme on peut le voir sur la figure I.16, le cœur de la fibre de compensation de dispersion moyenne est beaucoup plus petit que celui du SMF standard, et les faisceaux avec des longueurs d'onde plus longues subissent des changements de taille de mode relativement importants (en raison de la structure du guide d'ondes) conduisant à une plus grande propagation à travers la gaine de la fibre, où la vitesse de la lumière est supérieure à celle du cœur. Cela conduit à une grande valeur de dispersion négative. Des couches de la gaine supplémentaires peuvent conduire à des conceptions DCF améliorées qui peuvent inclure une pente de dispersion négative pour contrecarrer la pente de dispersion positive du SMF standard.

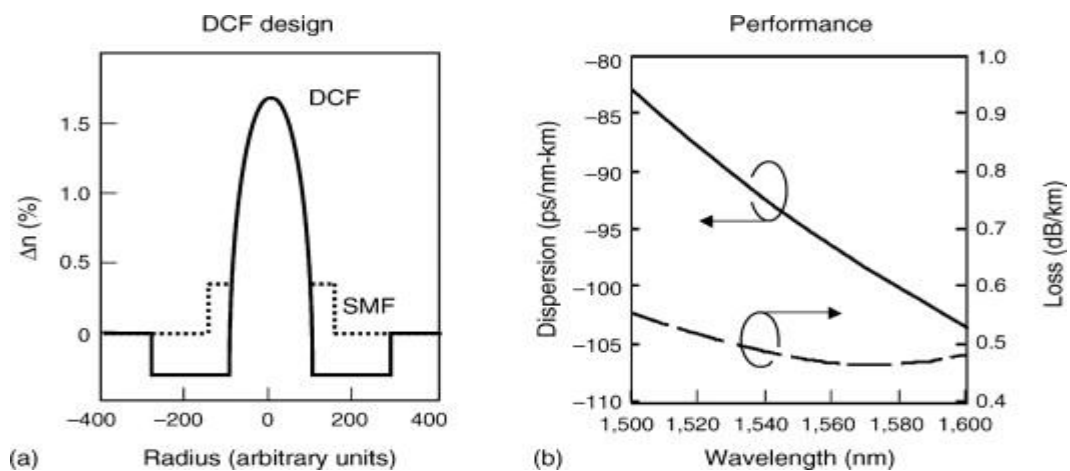


Figure I.16: DCF typique (a) profil d'indice de réfraction et (b) dispersion et perte en fonction de la longueur d'onde. Δn est défini comme la variation de l'indice de réfraction par rapport à la gaine.

La fibre de compensation de dispersion (DCF) est une bobine de fibre de plusieurs mètres de long qui a des valeurs fixes de dispersion, qui annulent les valeurs fixes de dispersion sur la fibre porteuse (Positive Dispersion Fiber). La fibre de compensation de dispersion (fibre à dispersion négative) est placée à l'intérieur d'un amplificateur où elle annule les effets de dispersion chromatique lorsqu'une impulsion lumineuse sur plusieurs canaux la traverse.

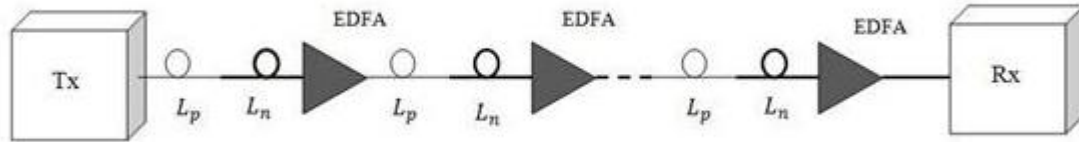


Figure I.17: compensation de la dispersion chromatique par DCF dans une chaîne de transmission optique.

L'agencement de dispersion, qui prend en compte à la fois les caractéristiques de dispersion, est illustré dans la figure ci-dessus. Chaque travée de répéteur se compose essentiellement de deux types de fibres ; l'un a des valeurs de dispersion positives [Positive Dispersion Fiber (PDF)] et l'autre a des valeurs négatives [Negative Dispersion Fiber (NDF)]. Pour le contrôle de la dispersion, nous organisons le PDF (la valeur de dispersion est D_{2n} , longueur L_n) et le NDF (la valeur de dispersion est D_{2p} , longueur L_p) de telle sorte que la distorsion globale soit une très petite valeur. Typiquement, la longueur du PDF est d'environ 100 km, pour un NDF de 20 km. La valeur de D_{2p} pour un NDF est de $-80 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, les amplificateurs EDFA présents dans l'agencement compensent l'atténuation du signal sur le canal de transmission. Le DCF est placé entre les deux étages de gain de l'EDFA. Les valeurs de D_{2p} , L_p , D_{2n} et L_n sont choisies pour minimiser la dispersion globale dans le système [10]. Pour cela, il suffit de choisir une fibre dont D_{DCF} et L_{DCF} compensent D_{SMF} et L_{SMF} du tronçon de fibre de la ligne de transmission telle que [11]. $D_{SMF} \cdot L_{SMF} = -D_{DCF} \cdot L_{DCF}$ (II.11)

Où D_{SMF} ; D_{DCF} ; L_{SMF} ; L_{DCF} sont respectivement les paramètres de dispersion et les longueurs de fibre monomode et la fibre compensatrice de la dispersion.

Dans la technique des fibres à compensation de dispersion, nous utilisons une fibre ayant une dispersion négative élevée ainsi qu'une fibre standard. La quantité de lumière dispersée par une fibre normale est réduite ou même annulée en utilisant une fibre à compensation de dispersion ayant une très grande valeur de dispersion de signe opposé par rapport à celle d'une fibre standard.

Il existe principalement 3 sortes de compensation de dispersion (pré-DCF, post-DCF et symétrique (pré post-DCF)), qui sont utilisés en fonction de la position DCF [12].

*Pré-compensation : dans ce type de technique de compensation, la fibre de compensation de dispersion à dispersion négative est placée avant la fibre monomode standard (SMF) à dispersion positive.

*Poste-compensation : C'est l'inverse dans ce type de technique de compensation, la fibre de compensation de dispersion à dispersion négative est placée après la fibre monomode standard (SMF) à dispersion positive.

*Pré Post-Compensation : Dans cette technique de compensation, la fibre de dispersion compensant la

dispersion négative est placée avant ainsi qu'après la fibre monomode standard (SMF) pour compenser la dispersion positive de la fibre standard.

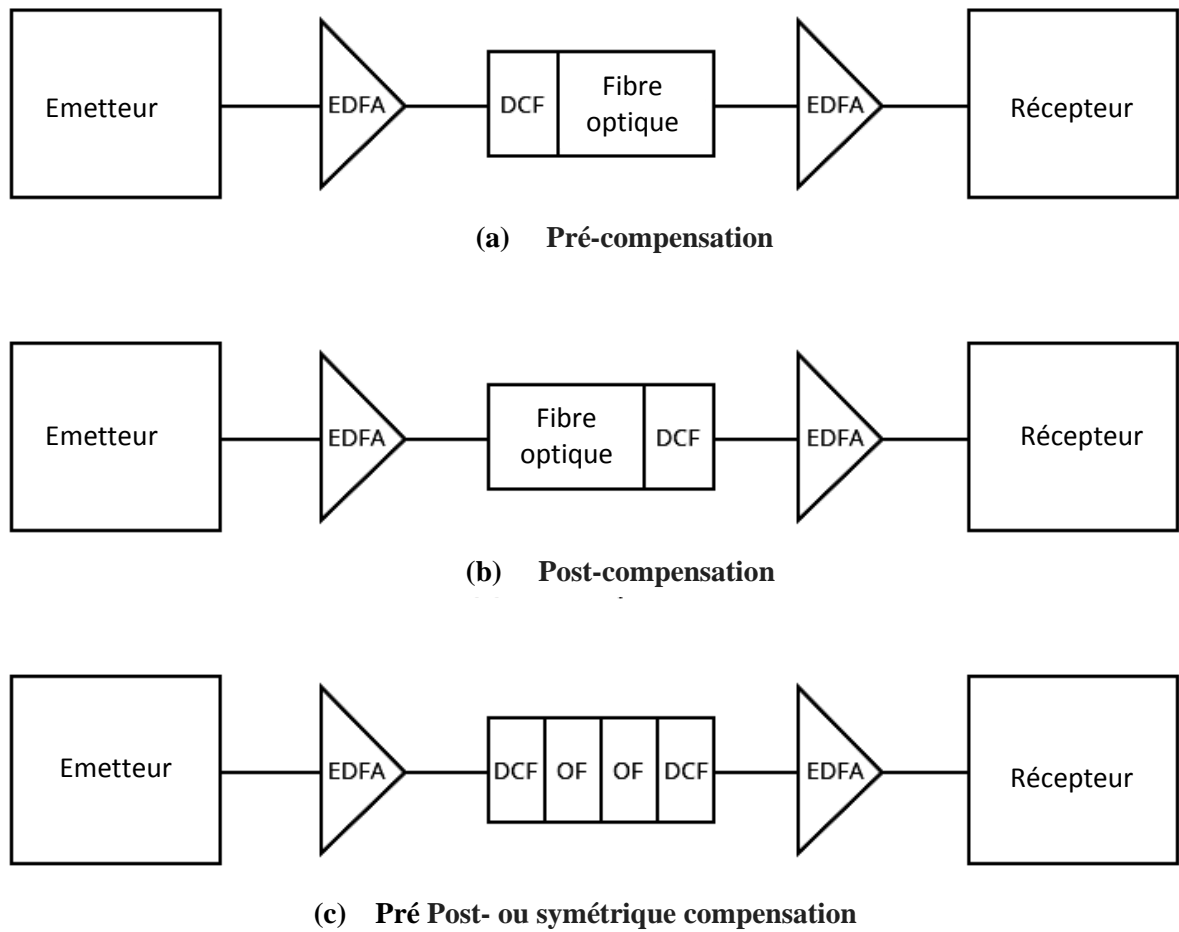


Figure. I.18: compensation de dispersion par DCF.

I.4.2 Compensation de dispersion par FBG

I.4.2.1 Introduction

La fibre optique est un moyen efficace de faire voyager des impulsions de lumière tout en limitant grandement la perte de leur intensité. La fibre se compose de deux couches : au centre, le « cœur » à indice de réfraction élevé et très petit diamètre transporte la lumière et, autour, la « gaine » à indice de réfraction inférieur empêche la lumière de sortir du cœur.

Un réseau de Bragg sur fibre est une fibre optique dont le cœur possède un indice de réfraction qui varie (alternance entre élevé et faible) sur la longueur. Cette variation transforme la fibre en une sorte de miroir qui réfléchit certaines longueurs d'onde et en laisse passer d'autres. La longueur d'onde réfléchie dépend de la distance entre une section à indice de réfraction élevé et les sections à indice de réfraction faible. On appelle la distance entre deux sections à indice de réfraction élevé la « période du réseau de Bragg », notée « Λ ».

Les réseaux de Bragg sur fibre reflètent la lumière à la longueur d'onde de Bragg, « λ_B », définie comme suit : $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, où n_{eff} est l'indice moyen effectif de réfraction de la fibre.

Le degré de réflexion dépend de l'ampleur de la modulation de l'indice qui, dans le réseau de Bragg, peut être un changement périodique constant ou un changement quasi périodique variable. Avec un réseau de Bragg ayant des sections de périodes différentes, une seule fibre optique peut contenir plusieurs « miroirs », permettant à diverses longueurs d'onde d'être réfléchies à différents points le long de la fibre. Le changement entre deux périodes n'est pas nécessairement abrupt. On dit des réseaux de Bragg dont la période change progressivement le long de la fibre qu'ils sont « à pas variable »; et le profil de cette période peut être plutôt complexe.

Le réseau de Bragg à fibre (FBG) est un dispositif réfléchissant composé d'une fibre optique qui contient une modulation de son indice de réfraction central sur une longueur définie (Figure I.19). En appliquant des FBG, les effets de dispersion peuvent être considérablement réduits dans les systèmes de transmission longs comme 100 km. Le réseau de fibre réfléchit la lumière se propageant à travers la fibre une fois que sa longueur d'onde correspond à la régularité de modulation. L'utilisation de FBG pour la compensation de dispersion peut être une approche prometteuse puisque les FBG sont compatibles avec les fibres optiques passives, ayant de faibles pertes d'insertion et de faibles prix.

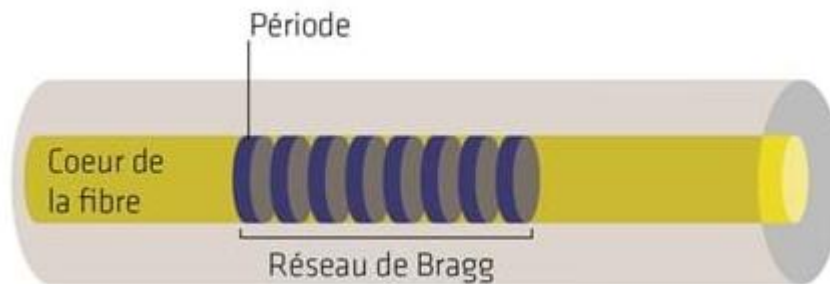


Figure I.19: Réseaux de Bragg

I.4.2.2. Structure de réseau

La structure du FBG peut varier via l'indice de réfraction, ou la période de réseau. La période de réseau peut être uniforme ou graduée, et soit localisée soit répartie dans une superstructure. L'indice de réfraction a deux caractéristiques principales, le profil d'indice de réfraction et le décalage. Typiquement, le profil d'indice de réfraction peut être uniforme ou apodisé, et le décalage d'indice de réfraction est positif ou nul.

Il existe six structures communes pour les FBG (figure I.20) ;

- Changement d'indice uniforme uniquement positif,
- Gaussien apodisé ,
- Cosinus surélevé apodisé,
- Chirpé ,

- Déphasage discret, et
- Superstructure.

Le premier réseau complexe a été réalisé par J. Canning en 1994. Cela a soutenu le développement des premiers lasers à fibre à rétroaction distribuée (DFB) et a également jeté les bases de la plupart des réseaux complexes qui ont suivi, y compris le caillebotis fabriqués pour la première fois par Peter Hill et ses collègues en Australie [13].

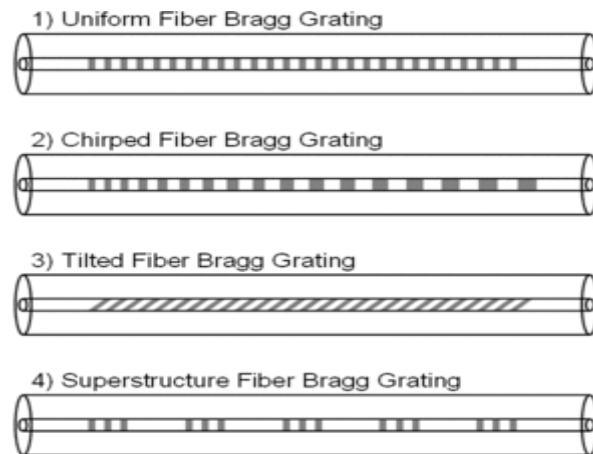


Figure. I.20: Structure du changement d'indice de réfraction dans un FBG uniforme (1), un FBG chirpé (2), un FBG incliné (3) et une superstructure FBG (4).

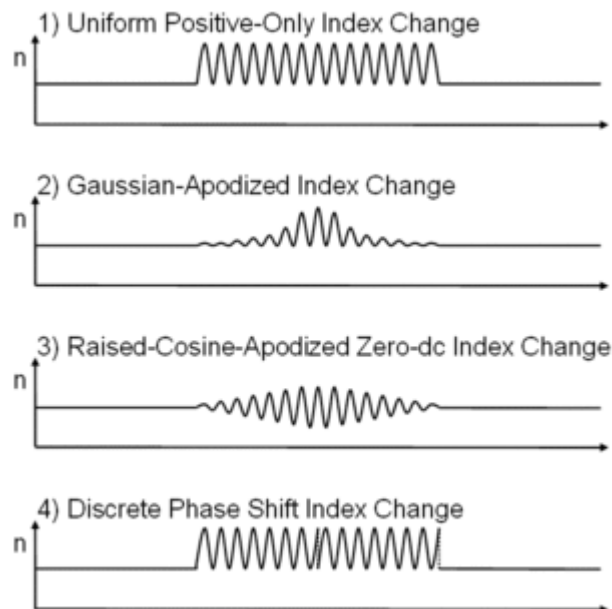


Figure I.21: Profil d'indice de réfraction au cœur de, 1) un FBG uniforme positif uniquement, 2) un FBG apodisé gaussien, 3) un FBG apodisé en cosinus surélevé avec un changement de zéro-dc, et 4) un déphasage discret FBG.

FBG chirpés (à pas variable) sont des candidats appropriés pour compenser la dispersion chromatique qui se produit le long d'une liaison de fibre optique de transport. Un FBG est un dispositif réfléchissant composé d'une fibre optique qui contient une modulation de son indice de réfraction de cœur sur une certaine longueur. Le réseau réfléchit la lumière se propageant à travers la fibre lorsque sa longueur d'onde correspond à la périodicité de modulation. Dans un FBG chirpé, la périodicité de la modulation d'indice induite varie le long de la longueur du réseau (Figure I.22). Lorsque la période de réseau varie le long de l'axe, les différentes longueurs d'onde sont réfléchies par différentes parties du réseau et sont par conséquent retardées de différentes quantités de temps. L'effet net est une compression (ou un élargissement) de l'impulsion d'entrée qui peut être adaptée pour compenser la dispersion chromatique accumulée le long de la liaison fibre. Bien qu'elles pénètrent dans le réseau à des moments différents, les composantes de longueur d'onde des impulsions élargies reviennent toutes à l'entrée en même temps [14].

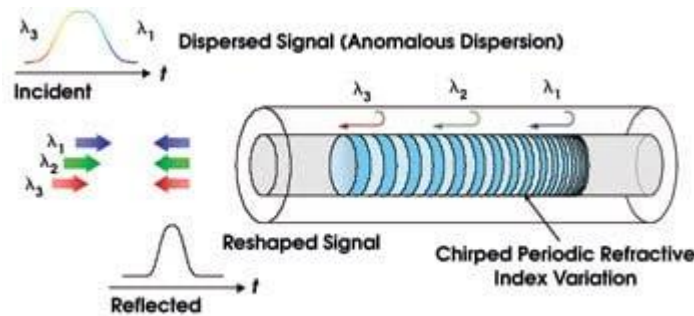


Figure I.22: Un réseau de Bragg à fibre modulée compense la dispersion en réfléchissant différentes longueurs d'onde à différents emplacements le long de l'axe du réseau.

Les réseaux de Bragg, à pas variable ou non, sont très utiles : ils compensent ou intensifient la dispersion chromatique en reflétant diverses longueurs d'onde à différents points de la fibre. Ceux à pas variable peuvent réfléchir le rouge avant ou après le bleu selon le résultat souhaité : s'il est réfléchi avant, le rouge peut rattraper le bleu, et l'impulsion se recomprime; s'il est réfléchi après, l'impulsion s'étire davantage (Figure I.23).

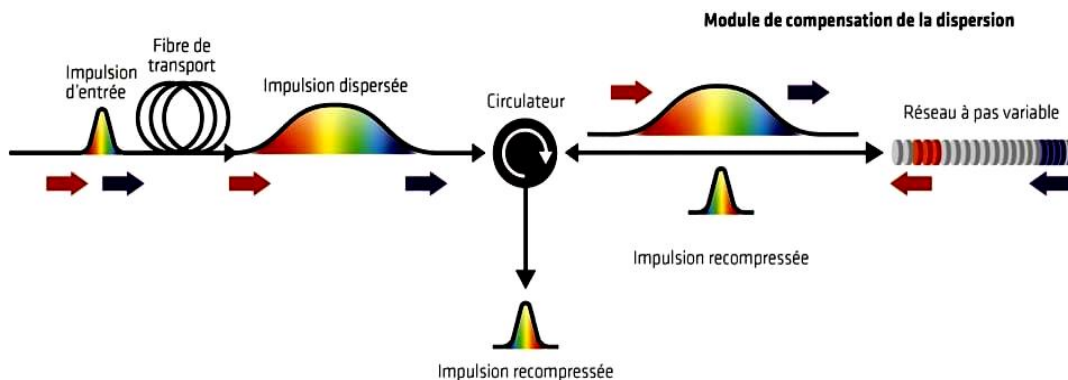


Figure I.23: Principe d'utilisation d'un compensateur basé des réseaux de Bragg à pas variable [15]

I.4.3. Compensation de dispersion électronique (EDC)

Étant donné que différents modes de propagation des ondes électromagnétiques le long de la fibre subissent des retards et des atténuations différents, une impulsion étroite au niveau de l'émetteur sera étalée au niveau du récepteur. Même dans la "fibre monomode" (SMF), différentes polarisations de la lumière se propagent différemment, ce qui entraîne deux impulsions au niveau du récepteur pour chaque impulsion transmise.

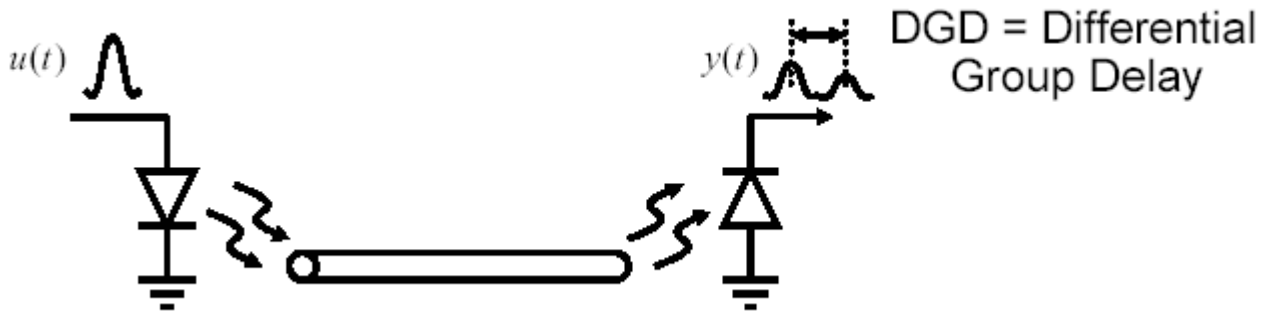


Figure I.24: interférence entre symboles dans une fibre sans compensation de dispersion électronique [16]

Le résultat est une interférence entre symboles, qui peut être compensée électriquement à l'aide d'égaliseurs à grande vitesse. Cependant, effectuer une compensation de dispersion électronique à des débits de données aussi élevés est difficile. De plus, la dispersion peut évoluer dans le temps nécessitant une approche adaptative, ou au moins programmable.

L'objectif est d'augmenter les vitesses et/ou la portée des liaisons en fibre optique en utilisant le traitement du signal électronique avec une puissance et un coût raisonnables.

L'égalisation est une méthode simple pour contrôler l'ISI dans les canaux à bande limitée. Cependant, les filtres analogiques traditionnels ne fonctionneront pas aux vitesses requises. Des architectures alternatives telles que des filtres à ondes progressives sont nécessaires. Aussi, l'adaptation des paramètres de l'égaliseur est difficile tout en maintenant le lien et en fonctionnant à grande vitesse.

La compensation de dispersion électronique (EDC) est une méthode utilisant le filtrage électronique (également appelé égalisation) pour compenser la dispersion dans une liaison de communication optique. Le filtrage peut être inclus dans un canal de communication pour compenser la dégradation du signal causée par le support. L'EDC est typiquement implémenté avec un filtre transversal, dont la sortie est la somme pondérée d'un certain nombre d'entrées temporisées. La solution EDC a la capacité d'ajuster automatiquement les poids des filtres en fonction des caractéristiques du signal reçu, ce que l'on appelle l'adaptation. L'EDC peut être utilisé aussi bien dans les systèmes à fibre monomode que dans les systèmes à fibre multimode. De plus, il peut être combiné avec d'autres fonctions sur des circuits intégrés récepteurs 10 Gbit / s [12].

I.5. Structure récapitulative d'une chaîne de transmission optique

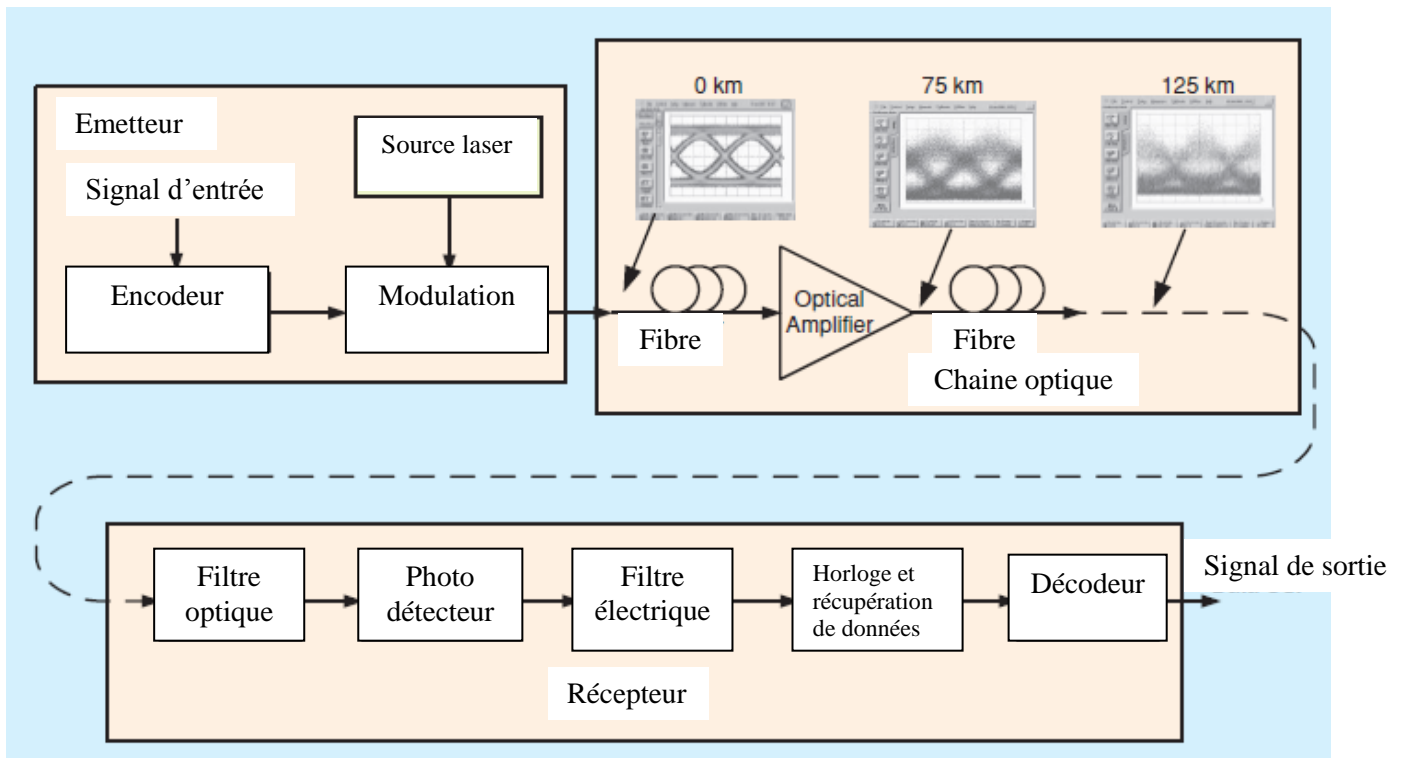


Figure I.25: chaîne de transmission optique [17]

Dans la figure précédente un exemple de chaîne de transmission optique est présenté. Cette chaîne peut être divisée en trois éléments clés : l'émetteur, le canal optique, et le récepteur.

L'émetteur contient une source laser qui est modulée par une séquence porteuse d'informations, le canal se compose des portées potentiellement répétées de fibre monomode optiquement amplifiée, et le détecteur contient un filtrage optique, un photo-détecteur, filtrage électrique et traitement électrique ultérieur pour la récupération des données. Pour les liaisons à plus courte portée, la fibre peut être non amplifiée et pour des applications à très courte portée, une fibre multimode peut être utilisée. Elle est également montrée des diagrammes d'œil de données, qui illustrent les modèles de symboles transmis et reçus tels qu'ils apparaîtraient sur un oscilloscope à différents stades de la fibre optique.

Les fibres ont des qualités importantes en tant que moyen de transmission d'informations qui leur ont permis de s'établir dans les réseaux de télécommunications. Beaucoup de ses défauts semblent corrigibles (dispersion, Atténuation, ...).

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons également présenté la transmission du signal dans les fibres optiques, on a met un coup d'œil sur les différents types de ces fibres et on a présenté leurs principales caractéristiques. La compensation de dispersion chromatique est reconnue comme l'un des principaux défis des systèmes de communication optique à haut débit. La dispersion affecte directement la qualité de la transmission des données et provoque un flou du flux binaire. Les fibres à compensation de dispersion sont largement utilisées pour compenser cet effet.

Pour remédier à ces problèmes d'élargissement temporel nous allons nous focaliser sur les techniques de compensation de la dispersion chromatique. Trois techniques de compensation seront envisagées : la première utilise la fibre compensatrice (DCF), la seconde utilise le réseau de Bragg à fibre (FBG) tandis que l'ultime représente la compensation de dispersion électronique (EDC), Ces composants vont nous permettre de compenser la dispersion chromatique.

Nous aborderons dans le prochain chapitre une description sur le logiciel de simulation qu'on a utilisé dans ce mémoire « Optiwave ».

Chapitre II:

Description de logiciel de
simulation « optiwave »

II.1. Introduction

L'évolution des réseaux à fibre optique a doublé l'infrastructure du réseau, la technologie de codage et la disponibilité des composants. Lorsque le nombre de paramètres augmente, la conception du système associé devient plus complexe et il devient de plus en plus nécessaire d'influencer la sortie du lien. En outre, l'outil de simulation est de plus en plus utilisé comme un outil d'assistance pour aider à la découverte rapide de solutions au niveau des composants et du système [18]. Cependant, contrairement aux équipements électroniques et aux fours à micro-ondes, il n'existe pas d'outils communs largement acceptés dans le domaine de la transmission optique. De nombreux logiciels qui simulent la connectivité optique sont récemment devenus disponibles sur le marché.

II.2. Présentation du logiciel

Le développement des systèmes de mise en réseau à fibre optique a été extrêmement rapide ces dernières années, impliquant des exigences très élevées. Complication pour la simulation, l'analyse et la conception des fibres, divers progiciels sont utilisés. Système de communication basé sur la fibre optique. Cette étude intègre l'utilisation d'OptiSystem pour construire WDM. Utilisez WDM. OptiSystem est un outil de développement logiciel de pointe qui permet aux utilisateurs de concevoir, tester et simuler presque toutes les formes de connexions optiques dans une couche de transmission à large bande. Réseau LAN, SAN et MAN longue distance. Ce qui comprend la conception et la planification du système de composants pour le système de connectivité de la couche de transmission optique, ainsi qu'une représentation visuelle de l'analyse et de la solution [19].

II.2.1. Interface de l'OptiSystem

L'interface graphique OptiSystem a une fenêtre principale divisée en plusieurs parties (Figure II.1)

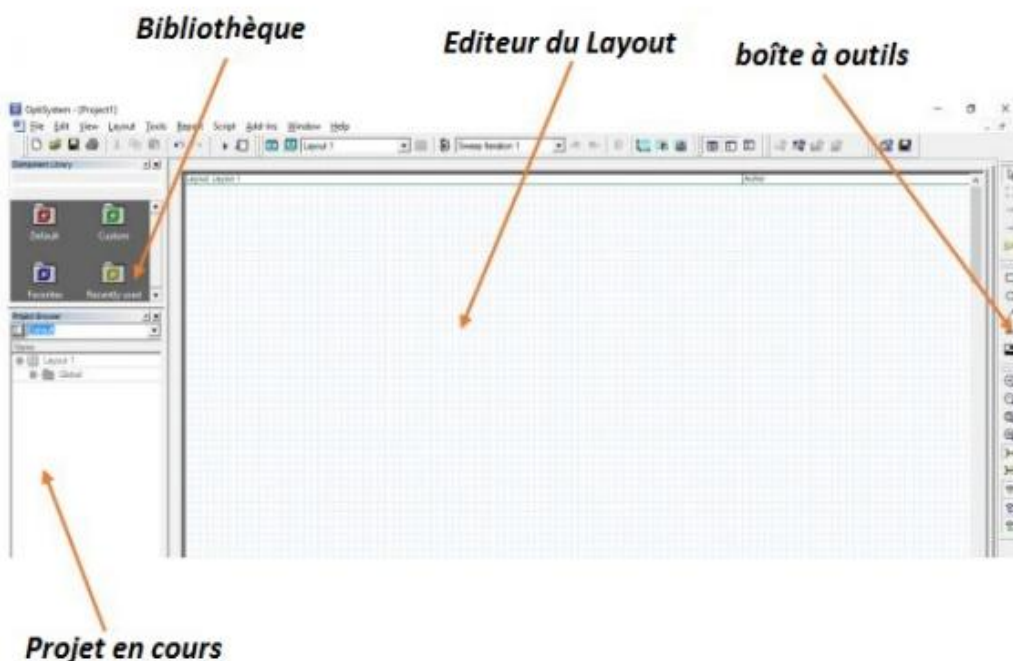


Figure II.1 : Les fenêtres d'Optisystem.

- ❖ Bibliothèque: une base de données contenant des données provenant de divers composants.

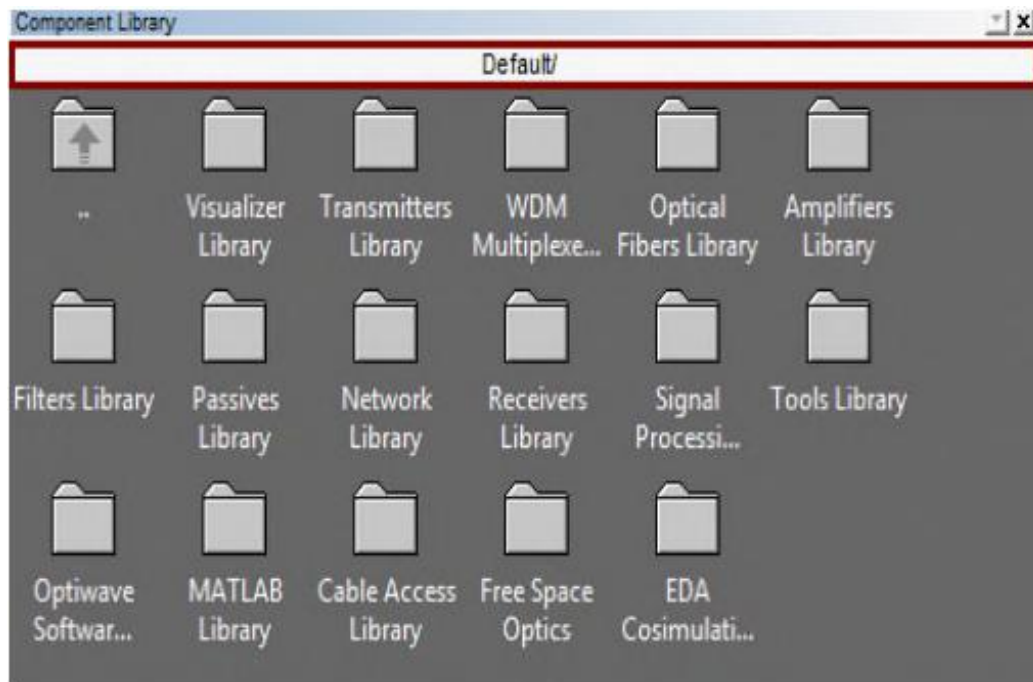


Figure II.2: La bibliothèque de logiciel Optisystem

- ❖ Editeur de la mise en page actuelle (layout): permet de modifier et de personnaliser la mise en page actuelle.
- ❖ Projet en cours: affichez divers fichiers et composants liés au projet en cours.
- ❖ Une boîte à outils vous permet d'ajouter des instructions (texte, rectangles, etc.) à votre espace de travail pour une meilleure compréhension.

OptiSystem est un logiciel puissant qui peut également être conçu et fabriqué. Modèle de composant optique.

II.2.2.Paramètres caractéristiques

Pour installer un composant (photodétecteur) de la bibliothèque OptiSystem, il suffit d'aller dans la bibliothèque du récepteur et de choisir le module photodétecteur par défaut (Figure II.3).

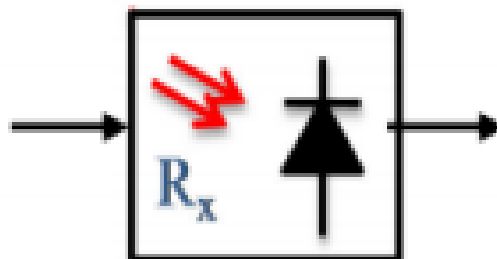


Figure II.3 : Schéma d'un photodétecteur sous Optisystem.

En cliquant sur le composant, vous pouvez obtenir des informations sur le photodétecteur qui a été utilisé (Figure II.4).

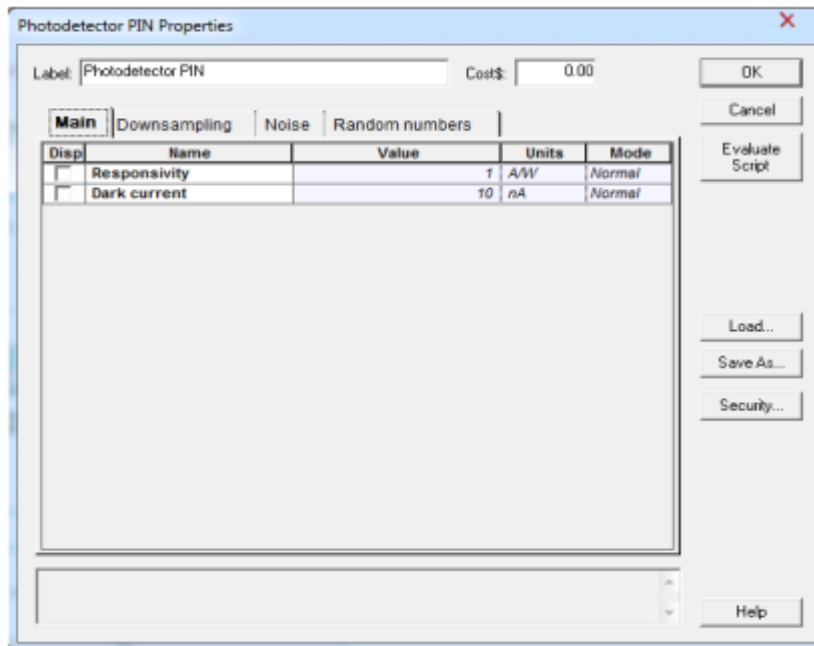


Figure II.4 : Interface de définition du photodétecteur.

La figure II.5 montre un exemple de paramètres de composants optiques (fibre optique dans notre cas).

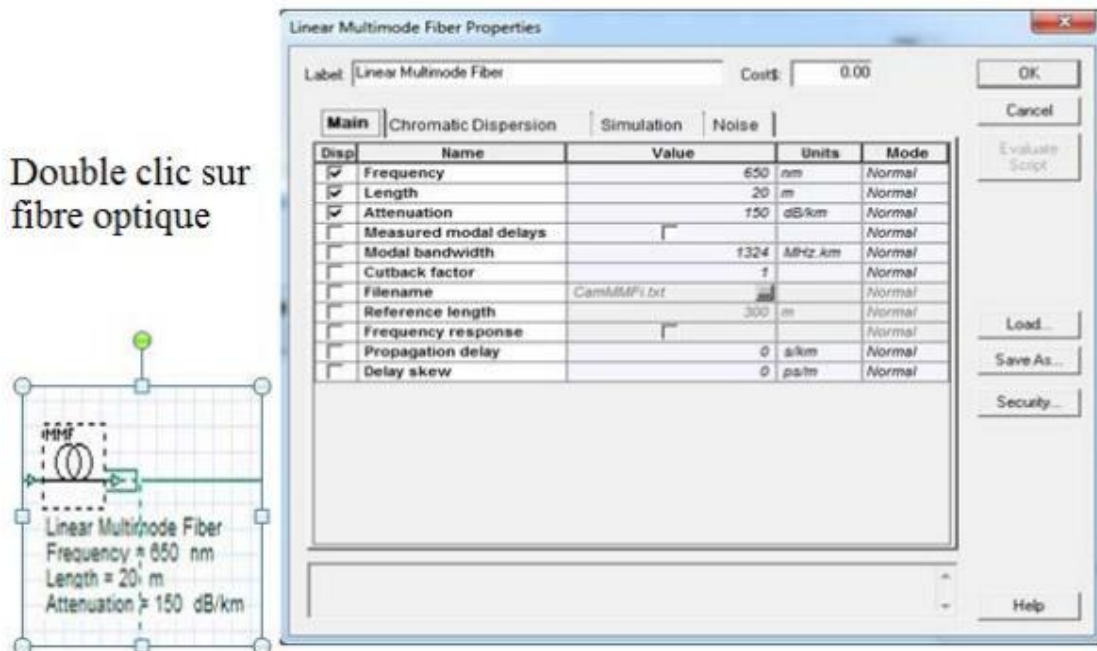


Figure II.5 : Les paramètres de la fibre utilisée.

Vous pouvez ajuster les paramètres de fibre tels que la longueur de l'onde, la longueur de la fibre, l'atténuation et de nombreux autres paramètres de fibre à l'aide de cette fenêtre.

II.2.3. Application d'OptiSystem

Parmi les différentes applications d'OptiSystem, nous citerons les plus couramment utilisées [20]:

- ❖ Concevez le système de communication optique sur les composants de la couche physique.
- ❖ Calculez le taux d'erreur sur les bits (BER) et calculez le bilan de liaison.
- ❖ Conception de réseau TDM / WDM Conception de réseau CATV (câble TV)
- ❖ Conception de l'émetteur et de l'amplificateur de canal.
- ❖ L'espace libre pour les systèmes optique (OSA).

II.2.4. Avantages d'OptiSystem

- ❖ La bibliothèque de composants vous permet d'importer des mesures à partir d'appareils en temps réel fournis par divers fournisseurs de test et de mesure.
- ❖ Résumez les performances globales du système à fibre optique.
- ❖ Avoir un accès direct à l'ensemble des données des éléments de profondeur du système.
- ❖ Affichez la stratégie conceptuelle aux clients potentiels de manière intuitive.

II.2.5. Edition et simulation

Lors de la conception de la mise en page (layout), faites simplement glisser le composant de la bibliothèque vers la mise en page où il est placé. OptiSystem autorise également les composants définis dans chaque mise en page de configuration. En fait, double-cliquez sur le composant pour afficher ses paramètres.



Figure II.6: Le paramétrage d'un composant.

Cependant, avant de démarrer la simulation, la mise en page (layout) affiche également les paramètres qui peuvent être contrôlés en double-cliquant sur layout.

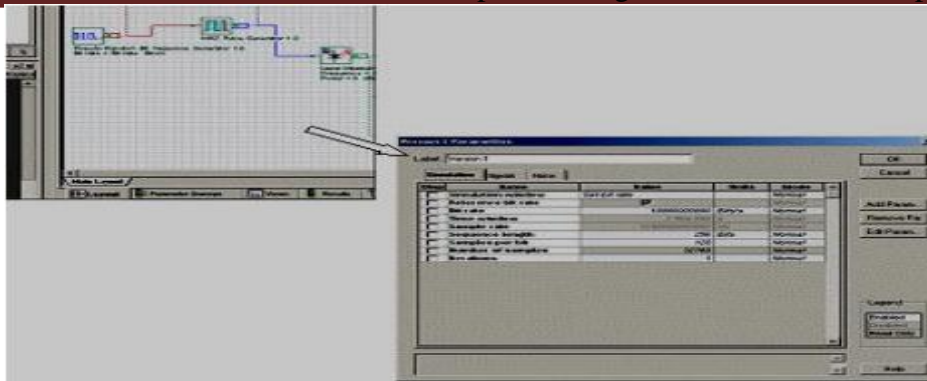


Figure II.7 : Modification des paramètres globale du layout.

Pour démarrer la simulation, entrez simplement soit en tapant simultanément Ctrl + F5 ou bien accédez-y directement via le menu Fichier puis Calculer...

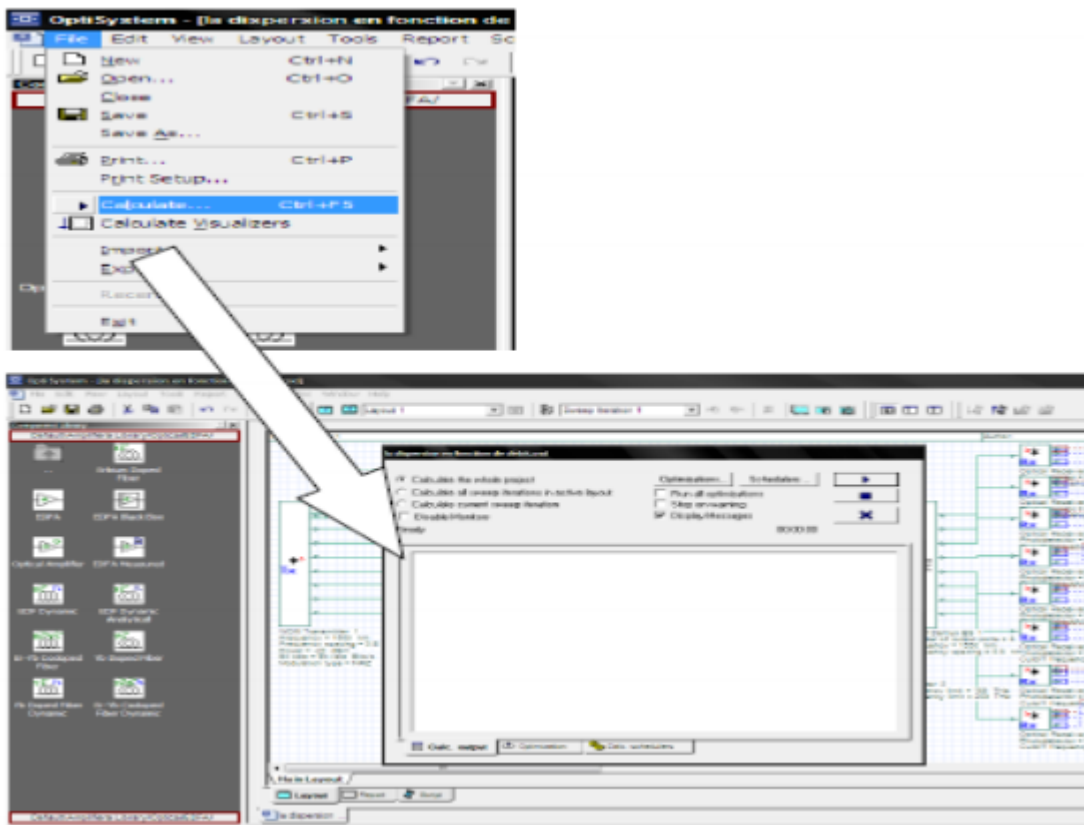


Figure II.8 : Démarrage de la simulation.

Enfin, pour visualiser les différentes analyses, double-cliquez sur l'appareil de mesure pour afficher la simulation en 2D ou 3D.

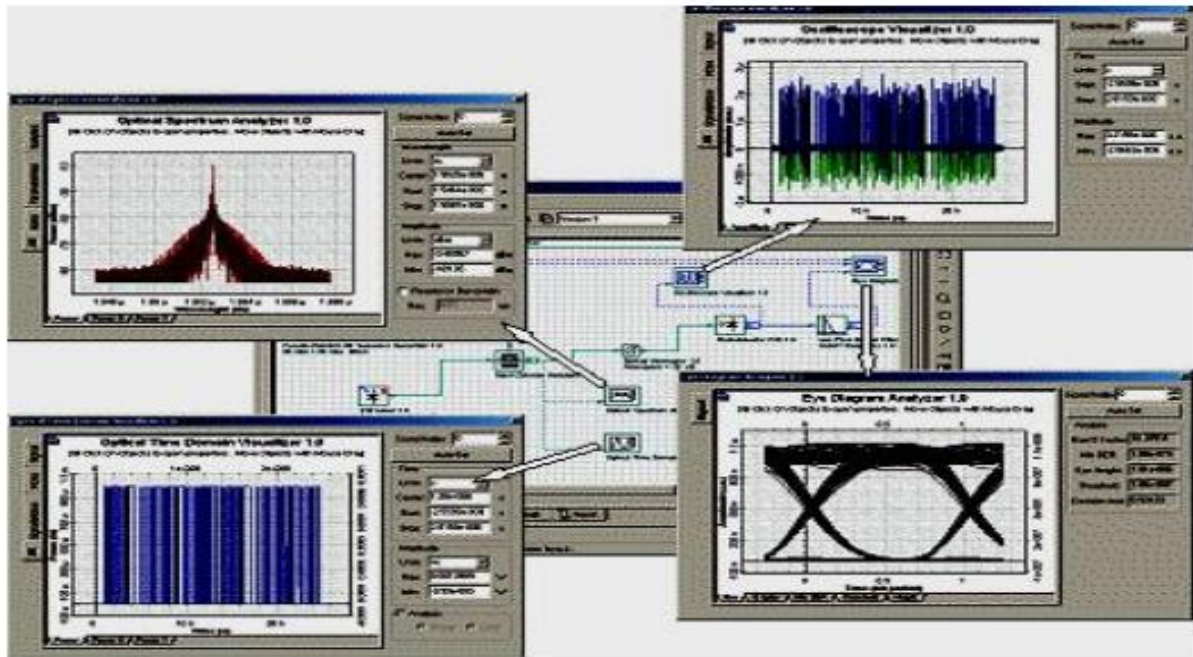


Figure II.9 : Affichage des résultats de la simulation.

II.3. Conception d'une liaison optique

Un système de communication optique est composé :

- Emetteur
- Canal de communication
- Récepteur

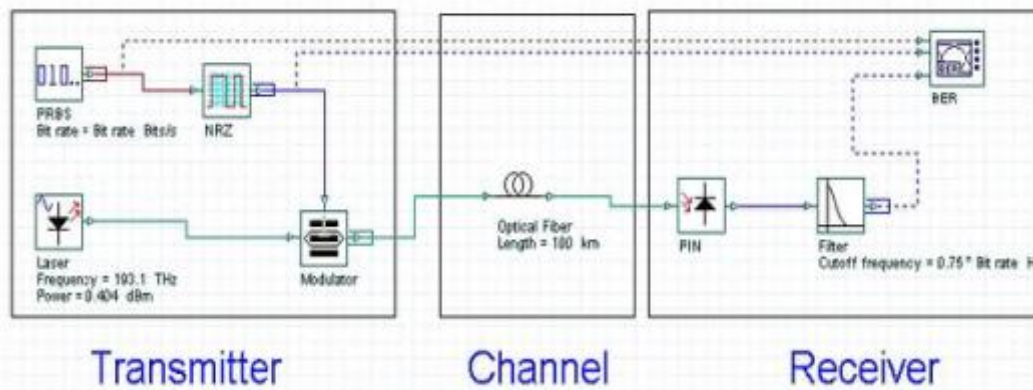


Figure II.10 : Composants du système de communication optique.

II.3.1. Emetteur optique

Les tâches de l'émetteur optique sont [21] :

- Convertissez les signaux électriques en signaux optiques
- Injectez le signal optique généré dans la fibre optique.
- Modélisez l'émetteur optique de la manière suivante:

- 1) source optique
- 2) générateur d'impulsions électriques
- 3) modulateur optique

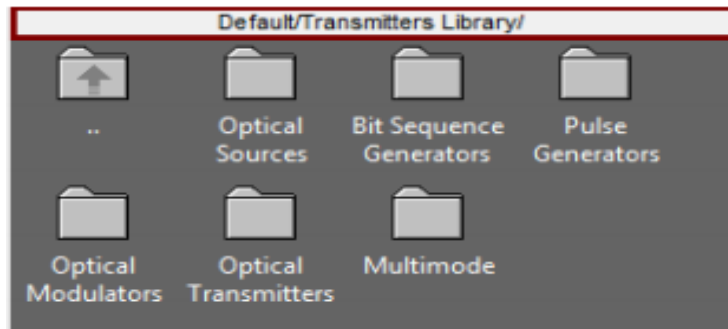


Figure II.11: La bibliothèque des émetteurs optiques.

La puissance d'émission est un paramètre important dans la conception Dans la chaîne de transmission, ce paramètre est généralement exprimé en dBm.

II.3.2. Le canal de transmission

Le canal de transmission optique utilisé est en fibre optique, et sa fonction est de transmettre le signal optique de l'émetteur au récepteur. Certaines pertes, telles que l'atténuation et la dispersion, peuvent se produire pendant la transmission. En se concentrant sur la longueur de la fibre, cela peut être vu. Atténuation du signal du récepteur et éjection des impulsions à l'intérieur de la fibre [21].

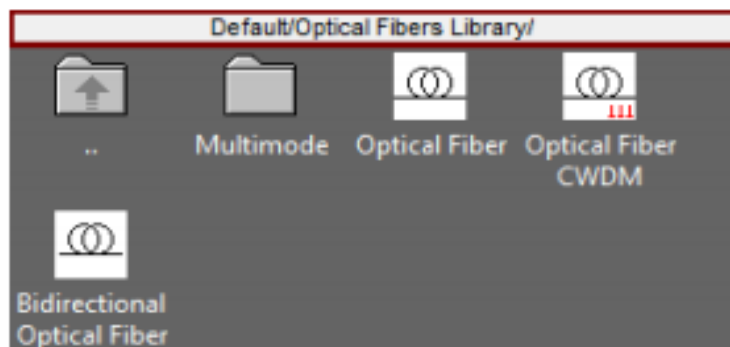


Figure II.12: La bibliothèque des fibres optiques.

II.3.3. Récepteurs optiques

Le récepteur optique convertit le signal optique reçu à la sortie de la fibre optique en un signal électrique.

Les composants suivants constituent le récepteur:

- photo-détecteur
- filtre

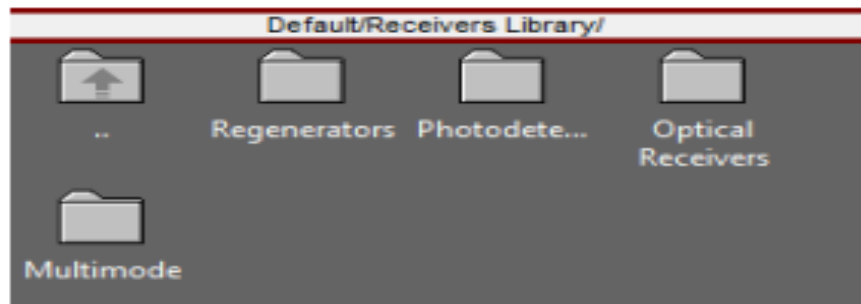


Figure II.13: La bibliothèque des récepteurs optiques.

II.4. Critères et méthodes d'évaluer la qualité de transmission

Il existe une variété de normes qui peuvent être utilisées pour évaluer la qualité de la transmission optique. Le diagramme du signal, le taux d'erreur binaire BER et le facteur Q sont les trois principaux critères de qualité du signal.

II.4.1. Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est une manière "visuelle" de déterminer la qualité du signal. Il est généré en superposant tous les symboles binaires du signal d'émission. Plus la qualité du signal est élevée, plus le diagramme est ouvert et plus le facteur de qualité est élevé, plus il est facile de détecter les signaux sans faire d'erreur. Par conséquent, le diagramme de l'œil est une bonne méthode visuelle pour juger de la qualité du signal dans la plage de réponse de la photodiode. Oscilloscope utilisé [20].

La figure II.14 montre le diagramme de l'œil du signal NRZ.

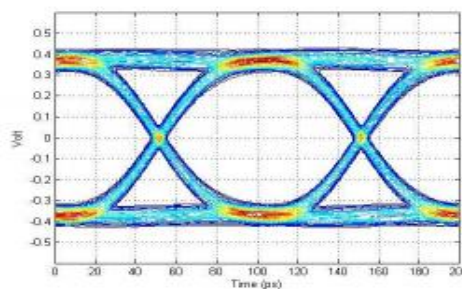


Figure II.14 : Diagramme de l'œil d'un signal au format NRZ.

II.4.2. Taux d'erreur binaire (TEB)

Les données sont transmises sous forme numérique (c'est-à-dire la séquence de données binaires). L'évaluation de la qualité de la transmission numérique binaire nécessite de comparer la séquence de symboles émise avec la séquence de symboles reçue pour calculer le nombre de bits d'erreur, qui est le nombre d'erreurs détectées «0» pour envoyer le symbole «1», et vice versa. Ensuite, nous passons le nombre de bits erronés au lieu du nombre de bits transmis [22].

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$

Si le système est considéré comme un système de communication optique de haute qualité, le taux d'erreur BER est inférieur à 10^{-9} ou 10^{-12} , selon le système [22]

II.4.3. Facteur de qualité Q

Le signal mesuré à l'entrée de la voie de l'oscilloscope contient les facteurs suivants: Le signal utile et le bruit sont causés par tous les éléments qui propagent le bruit. Dans le diagramme de l'œil du signal de mesure de suivi, est le signal utile. Il est représenté par les niveaux moyens μ_1 et μ_0 . Le bruit représente la déviation de puissance. Les erreurs optiques autour de ces niveaux moyens peuvent être quantifiées en combinant les écarts types μ_1 et μ_0 . Par conséquent, nous définissons le facteur Q à travers le diagramme de l'œil suivant [20]:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\delta_1 - \delta_0}$$

II.5. Les performances d'une liaison optique

Le TEB, ou taux d'erreur binaire, est utilisé pour évaluer la qualité des transmissions numériques (BER). Un équipement spécialisé génère des séquences aléatoires et compare le signal sortant de la liaison optique avec le signal entrant. Le TEB (BER) est calculé en divisant le nombre d'erreurs par le nombre total de bits. En raison de la haute qualité des transmissions optiques, des TEB jusqu'à 10^{-9} sont spécifiés, ce qui correspond à un bit erroné par million de bits transmis; ainsi, les mesures doivent être effectuées sur une période de temps suffisamment longue pour obtenir une mesure fiable. Par exemple, lors de la mesure d'un débit de 10 Gbit / s, cela prend près de deux minutes. Dans le domaine des télécommunications, la méthode connue sous le nom de diagramme il est souvent utilisée pour décrire la dégradation d'un signal numérique due au bruit et à la dispersion. Sur un oscilloscope en mode agrégation par rapport au temps, une séquence aléatoire de bits est visualisée, et la somme de tous ces signaux aboutit à un signal appelé l'œil.

Sans aucun bruit, les traces se superposent parfaitement. Au fur et à mesure que le bruit augmente, les signaux variantes et la trace deviennent moins définis, et les transitions dans le temps deviennent moins définies en raison de l'augmentation de la gigue, comme le montre la figure II.15 [23].

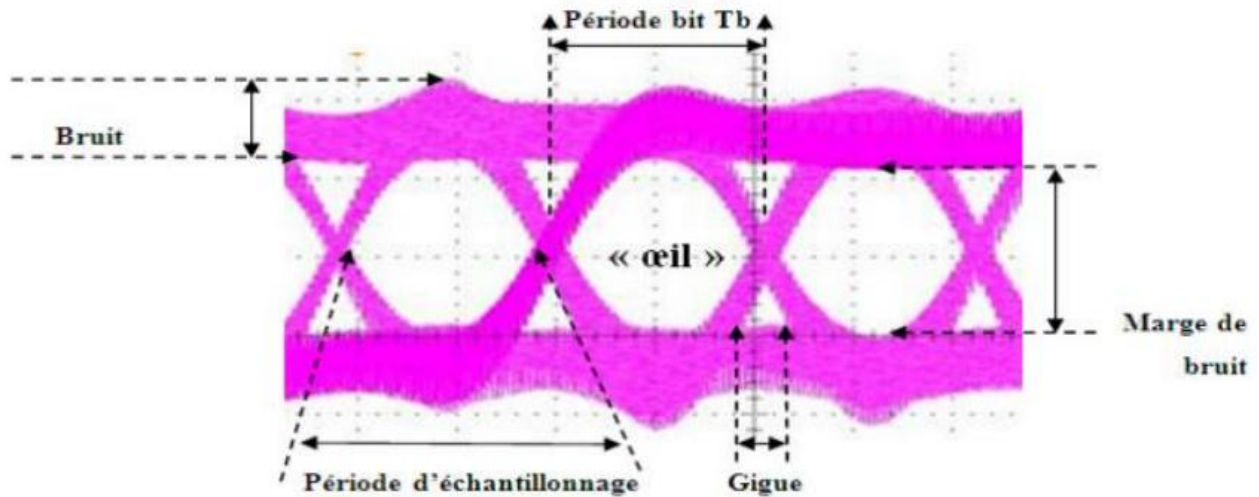


Figure II.15: Diagramme de l'œil d'une transmission par fibre optique [19].

II.6. La technologie WDM

La croissance spectaculaire du trafic Internet oblige les opérateurs de réseau à augmenter constamment la capacité de livraison de leur réseau terrestre en fibre optique. Il suffit de fournir plusieurs gigabits de capacité sur une seule fibre en utilisant un multiplexeur de longueur d'onde WDM.[24]

II.6.1. Principe de WDM

WDM (Wavelength Division Multiplexing) est le processus d'envoi de N ports optiques de différentes longueurs d'onde dans une seule fibre et de transmettre chacun un bit. Ce n'est pas l'axe du temps qui est divisé en périodes pour chaque consommateur, mais la bande passante. Et chaque sous-bande est affectée par une voie. En conséquence, plusieurs transmissions auront lieu en même temps, chacune sur une plage de fréquences différente [24].

II.7. Catégories de signaux dans la bibliothèque d'optisystème

Pour permettre une simulation efficace, la représentation du signal doit être aussi complète que possible. Il existe quatre catégories de signaux le plus important dans la bibliothèque du logiciel :

II.7.1. Signaux électriques

Les signaux électriques sont produits par des composants tels que des générateurs d'impulsions dans la bibliothèque d'émetteurs et des photodétecteurs dans la bibliothèque de réceptacles. Les signaux électriques sont constitués de la forme d'un signal gravé dans le domaine temporel.

Les principales propriétés d'un signal électrique sont les variations du bruit du signal dans le domaine temporel et les densités spectrales de puissance de bruit dans le domaine fréquentiel.

II.7.2. Signaux binaires

Les signaux binaires sont produits par des composants tels que des générateurs de séquence de bits. Ce signal est utilisé comme donnée d'entrée par les générateurs d'impulsions de la bibliothèque

d'émetteurs et les commutateurs numériques du réseau de la bibliothèque. Un signal binaire est composé d'une série de uns et de zéros, ou de marques et d'espaces.

La propriété principale du signal binaire est le débit binaire.

II.7.3. Signaux optiques

Les signaux optiques sont produits par des composants tels que des lasers dans la bibliothèque d'émetteur.

Les signaux optiques permettent différentes représentations de signaux :

- signaux échantillonnés
- signaux paramétrés
- bacs à bruit

II.7.4. Signaux M-aire

Les signaux M-aire sont des signaux multi-niveaux qui sont utilisés pour des modes de codage spécifiques tels que PAM, QAM, PSK et DPSK. Les signaux M-aire sont similaires aux signaux binaires. Cependant, les signes M-aire peuvent avoir n'importe quel niveau au lieu des niveaux supérieur (1) et inférieur (0), ou des marques et des espaces.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le célèbre programme de simulation, Optisysteme, qui vous permet de visualiser les résultats de la simulation de différentes manières. Nous avons également vu l'interface du programme avec les fonctionnalités et avantages les plus importants, et nous connaissons également les règles et méthodes d'évaluation de la qualité du transport par Diagramme de l'œil, Taux d'erreur binaire et Facteur de qualité Q. Nous avons également expliqué les types de signaux dans la bibliothèque de programmes.

Enfin l'OptiSystem dispose d'une définition hiérarchique de composants et systèmes, nous permettant d'utiliser des outils spécifiques pour l'optique intégrée et permettant à la simulation d'aller aussi profond que la précision désirée, C'est ce dont nous parlerons dans le troisième chapitre pour trouver les résultats de notre étude sur la transmission à fibre SMF.

Chapitre III :
Simulation et interprétation des
résultats

III.1. Introduction

L'évolution du réseau de fibres optiques a entraîné une prolifération d'architectures réseau. La conception des systèmes liés devient de plus en plus complexe à mesure que le nombre de paramètres influençant l'efficacité du lien augmente. En outre, on s'attend à ce que ces derniers transportent des quantités de plus en plus importantes d'informations tout en se renouvelant rapidement. La méthode expérimentale, qui consiste en une série de mesures illustratives sur un banc d'essai, prend du temps et de l'argent. En outre, les outils de simulation fournissent une aide utile pour localiser les solutions, tant au niveau des composants que du système.

Dans ce chapitre, nous ferons quelques opérations et études sur le programme de simulation « optiwave » pour étudier la transmission à fibre SMF.

III.2. Chaîne de transmission à fibre optique

Contrairement à la transmission par fil, dans laquelle un courant électrique circule à travers un conducteur en cuivre, dans la transmission par fibre optique, un champ électromagnétique (optique) se propage à travers une fibre constituée d'un diélectrique non conducteur. En raison de sa bande passante élevée, de sa faible atténuation, de son immunité aux interférences, de son faible coût et de sa légèreté, la fibre optique devient le support de choix pour les liaisons de télécommunications numériques fixes à haut débit. Les câbles à fibres optiques supplantent les câbles en cuivre dans les applications longue distance, telles que les parties d'alimentation et de jonction des boucles téléphoniques et de télévision par câble, et les applications à courte distance, telles que les réseaux locaux (LAN) pour les ordinateurs et la distribution à domicile de téléphones, télévision et services de données.

Un système de communication optique se compose d'un :

- émetteur
- canal de communication
- récepteur (voir figure III.1)

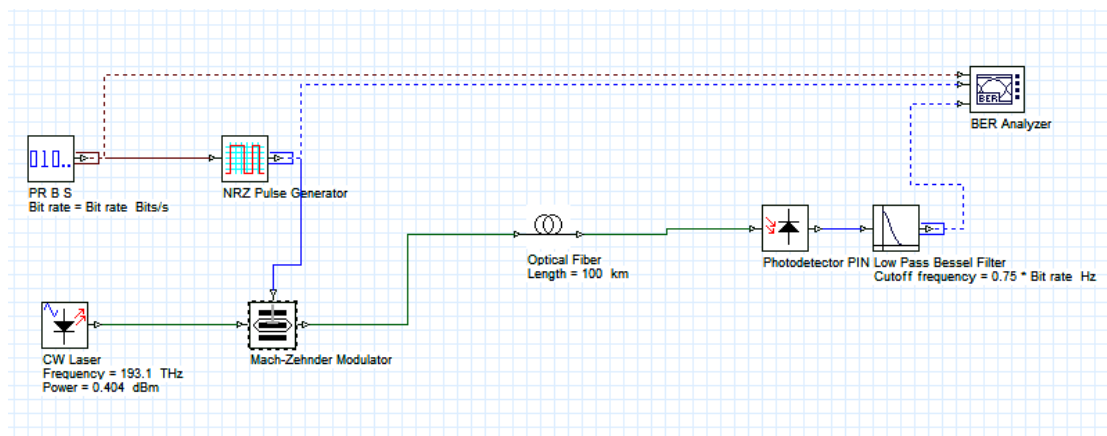


Figure III.1: Composants du système de communication optique

III.2.1. Émetteur optique

Le rôle de l'émetteur optique est de :

- convertir le signal électrique en forme optique.
- lancer le signal optique qui en résulte dans la fibre optique.

L'émetteur optique se compose des composants suivants :

- source optique
- générateur d'impulsions électriques
- modulateur optique (voir figure III.2).

La séquence de bits pseudo-aléatoires (Pseudo Random Bit Sequence en Anglais) peut être utilisée pour générer une séquence binaire de bits pseudo-aléatoires. La séquence de bits peut être connectée à un visualiseur de séquence binaire afin que la séquence de bits de sortie puisse être vue.

La source lumineuse utilisée dans le système de simulation est la diode laser à onde continue (CW) avec une longueur d'onde de 193,1THz. Le générateur de séquence est utilisé pour générer le signal numérique requis séquence, qui est convertie en signal d'impulsion électrique par le générateur d'impulsion de non-retour à zéro (NRZ). Après avoir traversé le modulateur M-Z (Mach-Zehnder Modulator), l'effet électro-optique est chargé sur l'onde optique pour devenir le signal optique entrant dans la fibre [26].

La puissance lancée est un paramètre de conception important, car indique combien de perte de fibre peut être tolérée. Il est souvent exprimé en unités de dBm avec 1 mW comme niveau de référence.

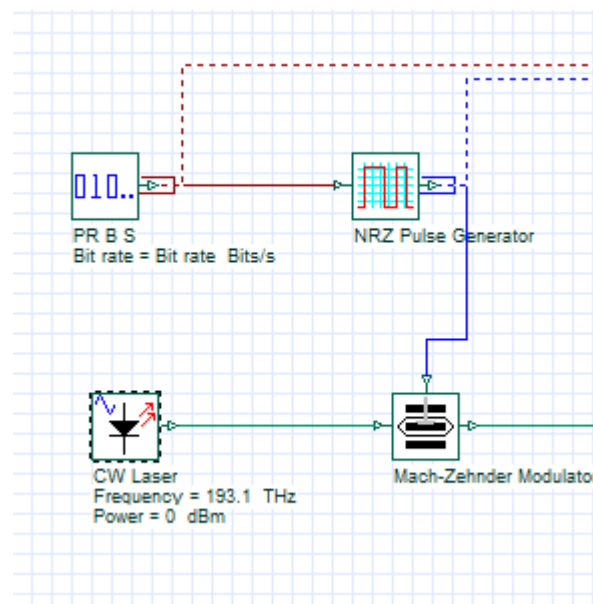


Figure III.2 : Composants de l'émetteur.

III.2.2. Canal de transmission

Le rôle du canal de transmission est de transporter le signal optique de l'émetteur au récepteur

sans le déformer. La plupart des systèmes de communication à ondes lumineuses utilisent les fibres optiques comme canal de communication parce que les fibres peuvent transmettre la lumière avec une quantité relativement faible de perte de puissance. La perte de fibre est, bien sûr, un problème de conception important, car elle dicte l'espacement répéteur d'un système d'ondes lumineuses long-courrier. Un autre problème de conception important est la dispersion des fibres, ce qui conduit à l'élargissement des impulsions individuelles à l'intérieur de la fibre. Afin d'observer les effets de la perte et de la dispersion dans le signal optique, vous pouvez modifier les valeurs de longueur de la fibre et visualiser la dégradation du signal au niveau du récepteur [27].

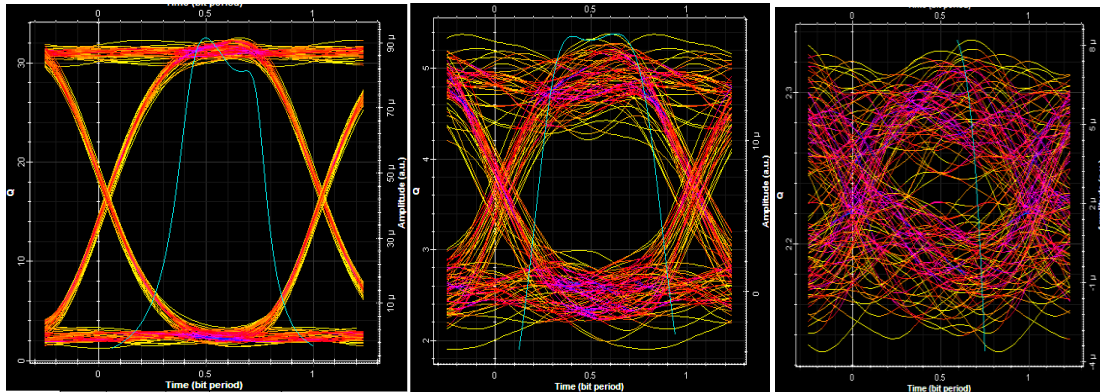


Figure III.3: Fibre 60 km, Fibre 90 km et Fibre 120 km.

III.2.3. Récepteurs optiques

Un récepteur optique convertit le signal optique reçu à l'extrémité de sortie de la fibre optique en signal électrique d'origine.

Le récepteur se compose des composants suivants :

- photodétecteur
- filtre
- démodulateur (voir figure III.4)

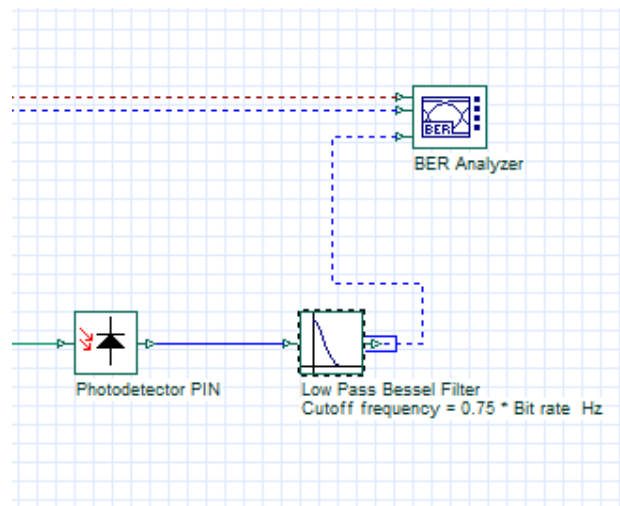


Figure III.4 : Composants du récepteur.

Souvent, le signal reçu est sous forme d'impulsions optiques représentant 1 et 0 bits, et est converti directement en courant électrique. Un tel schéma est appelé modulation de l'intensité avec détection directe (IM/DD). La démodulation est réalisée par un circuit de décision qui identifie les bits comme 1 ou 0, selon l'amplitude du courant électrique.

Les filtres passe-bas éliminent complètement les signaux au-dessus de la coupure fréquence et passent parfaitement au-dessus de la fréquence de coupure. Les filtres Bessel ont une excellente réponse transitoire et linéaire réponse de phase à une entrée d'impulsion. Ils sont optimisés pour temporisation maximale plate (ou temporisation de groupe constant) [28].

Les performances d'un système d'ondes lumineuses numériques se caractérisent par le taux d'erreur de bits (BER). Il est d'usage de définir le BER comme la probabilité moyenne d'identification incorrecte des bits. La plupart des systèmes à ondes lumineuses spécifient un BER de 10^{-9} comme exigence d'exploitation.

Dans l'échantillon BER Analyzer diagramme montré dans la figure 46, une puissance de sortie laser de 0 dBm et 10^5 km de longueur de fibre aura un BER proche de 10^{-9} .

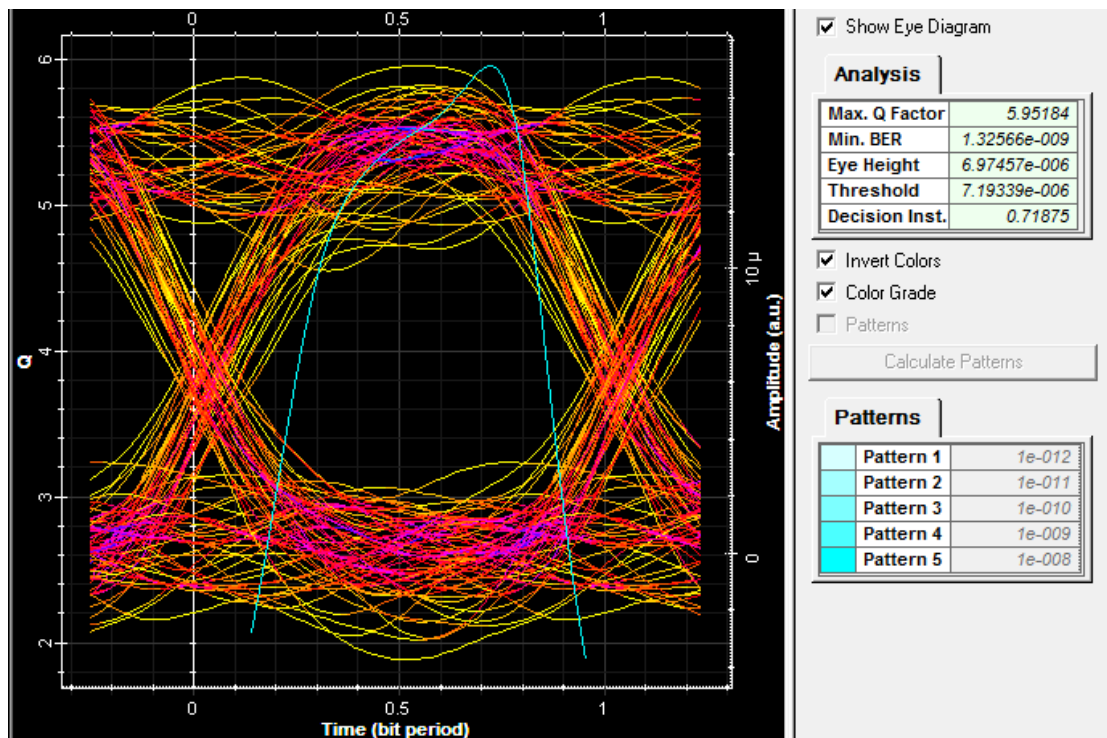


Figure III.5: BER à Fibre 95 km.

III.2.4. Conception du récepteur

La conception d'un récepteur optique dépend en grande partie du format de modulation utilisé par l'émetteur. Receiver Design.osd détaille un récepteur numérique dont les composants peuvent être disposés en trois groupes :

- extrémité avant
- canal linéaire

- récupération de données

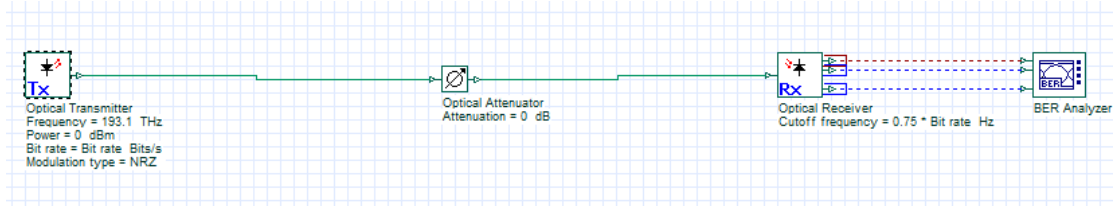


Figure III.6 : Conception du récepteur.

L'extrémité avant d'un récepteur se compose d'une photodiode avec un préamplificateur intégré. Le canal linéaire se compose d'un amplificateur à gain élevé et d'un filtre passe bas. La récupération des données est effectuée par l'analyseur BER avec un circuit intégré de récupération et de décision de l'horloge.

Le canal linéaire a un filtre passe bas qui façonne l'impulsion. Le bruit du récepteur est proportionnel à la bande passante du récepteur et peut être réduit à l'aide d'un filtre passe bas dont la bande passante est inférieure à la vitesse du bit.

Un atténuateur optique, ou atténuateur à fibre optique, est un dispositif utilisé pour réduire le niveau de puissance d'un signal optique, soit dans l'espace libre, soit dans une fibre optique. Les types de base d'atténuateurs optiques sont fixes, variables pas à pas et variables en continu [29].

L'impulsion se propage au-delà de la plage horaire la propagation peut interférer avec la détection des bits voisins, qui est le phénomène appelé interférence intersymbol (ISI).

Lorsque vous réglez l'atténuation à 0 dB, le diagramme l'œil idéal vu dans la figure 7 est généré.

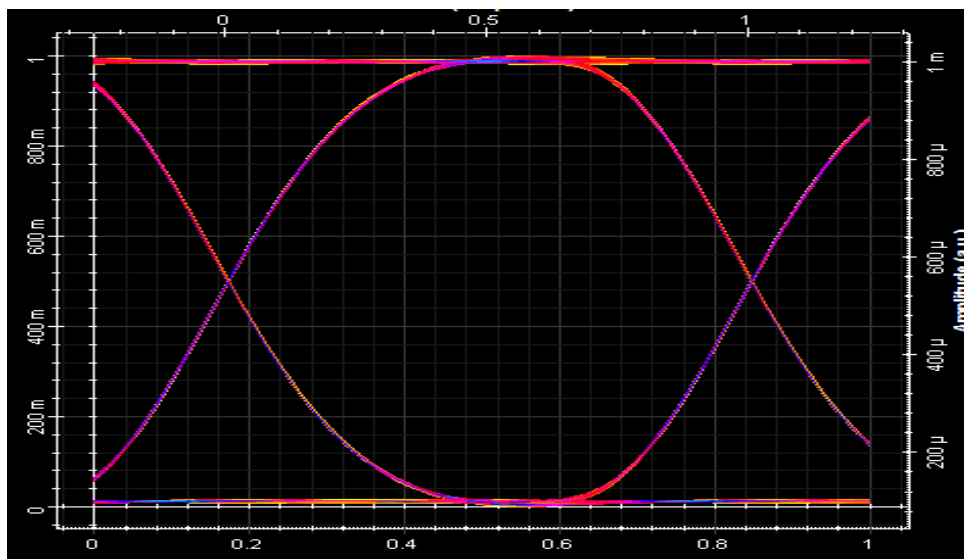


Figure III.7 : Récepteur EYE Idéal

Si vous réglez l'atténuation à 21 dB, le diagramme d'œil dégradé vu dans la figure 8 est généré.

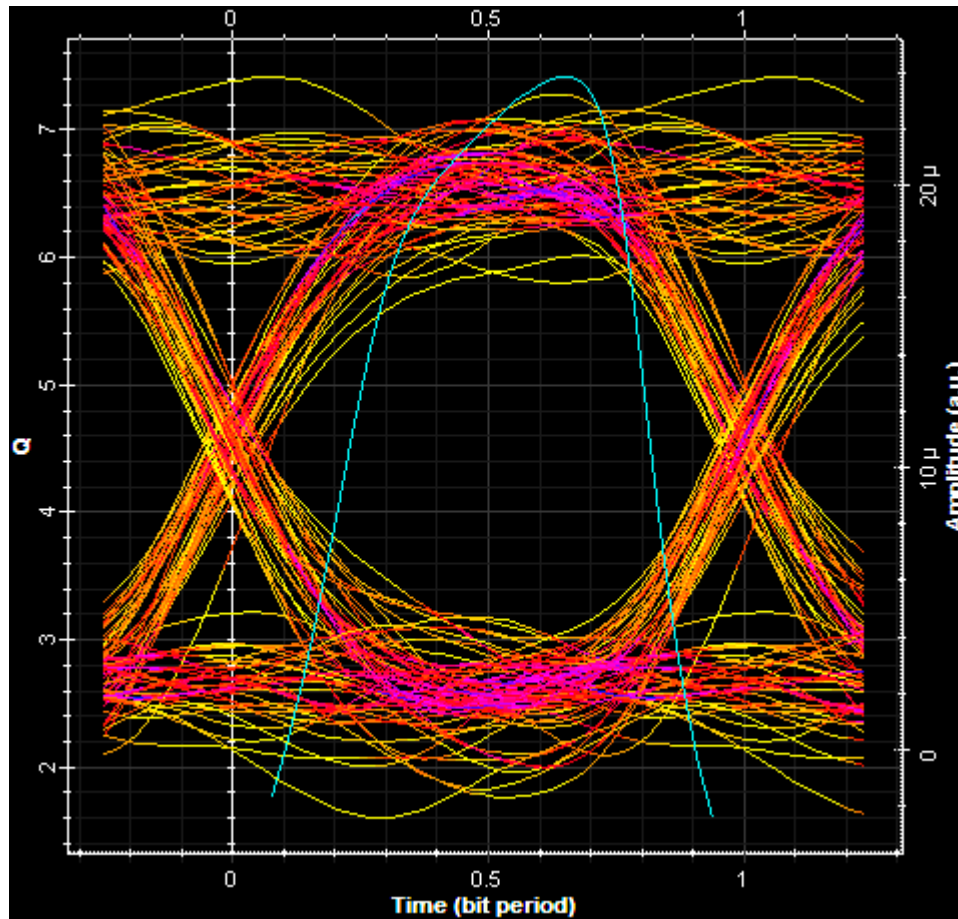


Figure III.8 : Récepteur EYE Dégradé.

Le circuit de décision compare la sortie du canal linéaire à un seuil, à un moment de décision déterminé par le circuit de récupération de l'horloge, et décide si le signal correspond au bit 1 ou au bit 0. Le seuil optimal est calculé pour chaque instant de décision afin de minimiser le BER (voir la figure III.9).

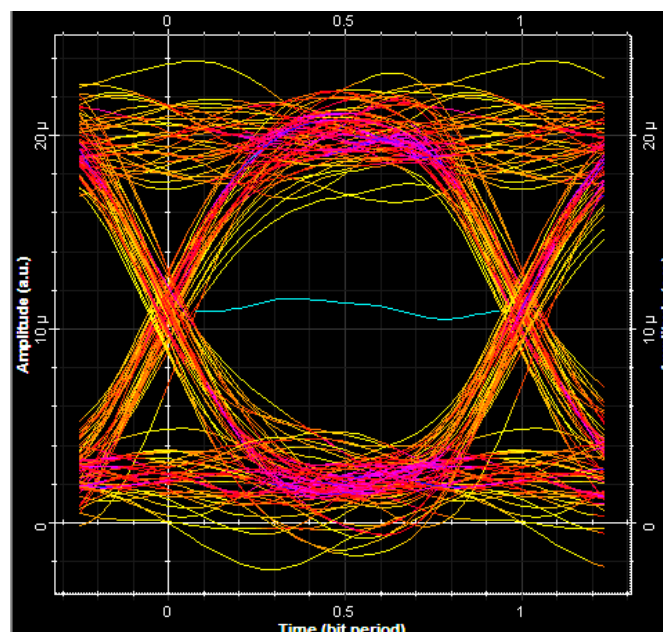


Figure III.9 : Seuil EYE du récepteur.

III.3. compensation de dispersion chromatique par DCF

Dans cette section, nous montrerons comment les régimes de compensation de dispersion affectent sur les performances du système. L'effet d'élargissement des impulsions de la dispersion chromatique provoque le chevauchement des signaux dans les périodes de bits adjacentes. C'est ce qu'on appelle l'interférence intersymbol (ISI). L'élargissement est fonction de la distance ainsi que du paramètre de dispersion D . Le paramètre de dispersion est donné en ps/nm/km et change de fibre en fibre.

C'est aussi une fonction de longueur d'onde. D est généralement d'environ 17 ps/nm/km dans la plage de longueur d'onde de 1,55 μm pour une fibre monomode (SMF).

Pour les sources modulées à l'extérieur, la distance de transmission limitée par la dispersion chromatique est :

$$L < \frac{2\pi c}{16|D|\lambda^2 B^2}$$

Quand $D=16$ ps/(km-nm) et à 2,5 Gbps, $L \approx 500\text{km}$, alors qu'il tombe à 30 km à 10 Gbps de vitesse [30].

Plusieurs techniques, y compris la dispersion compensant la fibre, peuvent être employées pour compenser la dispersion accumulée dans la fibre. Dans l'exemple suivant, nous montrerons trois schémas différents, la compensation pré, post-et symétrique, pour compenser la dispersion des fibres. Nous utiliserons d'abord des fibres compensatoires de dispersion (DCF). Nous montrerons ensuite comment la quantité de dispersion accumulée par le compensateur de dispersion affecte les performances. Dans ce cas, nous utiliserons un module de compensation de dispersion idéal (DCM) comme compensateur de dispersion pour montrer l'idée.

III.3.1. Pré-, post-, et symétrique-compensation en utilisant DCF

Les configurations de compensation pré, post-et symétrique sont indiquées dans la figure 10, la figure 11 et la figure 12. Dans nos simulations, nous avons utilisé des amplificateurs optiques après chaque fibre pour compenser la perte de travée. Le paramètre de dispersion de SMF est de 120 km de long et 16 ps/nm-km. Par conséquent, la dispersion totale accumulée est de $16 \times 120 = 1920$ ps/nm. Cette grande dispersion peut être compensée par l'utilisation d'un DCF de 24 km de long avec une dispersion de -80 ps/km-nm. La distance totale de transmission est de $120 \times 2 = 240$ km pour chaque cas.

Dans le cas post-indemnisation, DCF est placé après SMF. Dans le cas de compensation symétrique le placement de fibre suit la séquence de SMF, DCF, DCF, SMF

Le Loop Control vous permet de définir le nombre de fois que le signal se propage dans les composants connectés entre les ports d'entrée et de sortie du Loop Control. Utilisez le contrôle de

boucle pour calculer les performances du système en fonction du nombre de fibres et de portées EDFA.

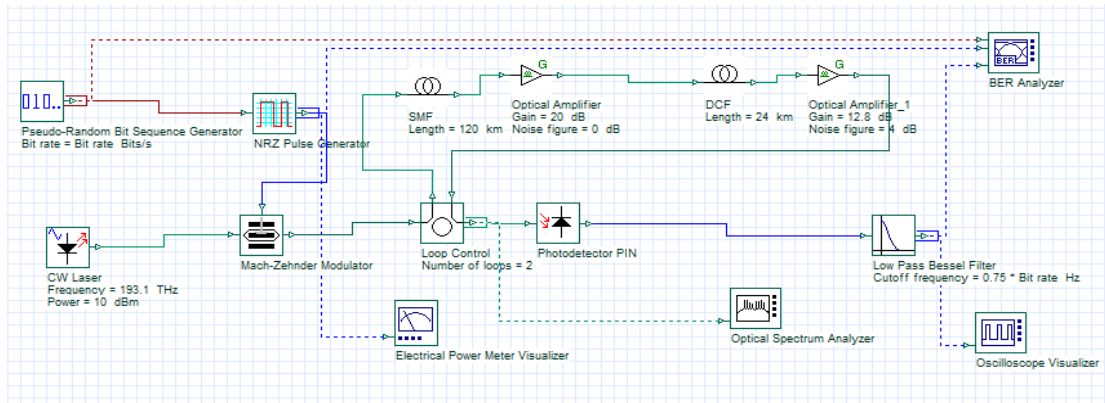


Figure III.10: Dispersion après compensation.

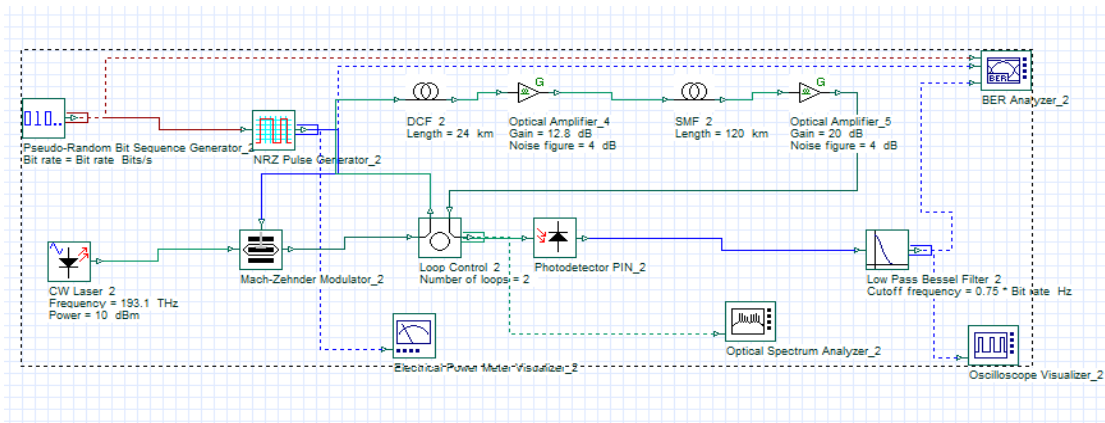


Figure III.11 : Dispersion avant compensation.

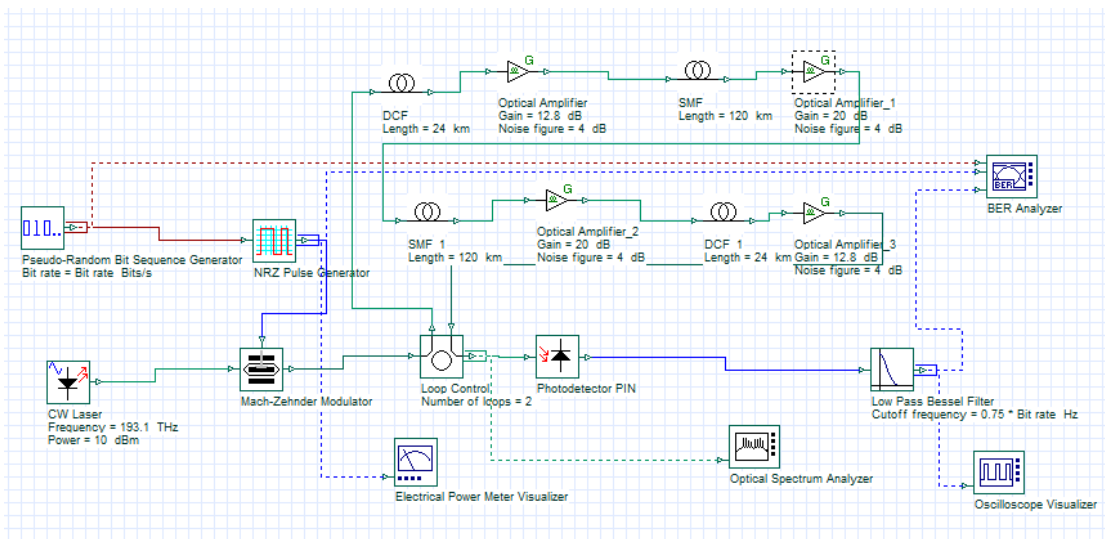


Figure III.12 : Dispersion symétrique-compensation.

Pour ces trois cas, le projet se trouve dans le dossier suivant : Dispersion compensation pre post symétrique.osd. Dans ces simulations, nous avons utilisé des formats de modulation NRZ. La

sensibilité du récepteur est de -28 dBm pour 2,5 Gbps et -25 dBm pour 10 Gbps. (Le bruit thermique du PIN est de $2,048e^{-23}$ W/Hz.) Les résultats de la simulation sont indiqués à la figure III.13 et à la figure III.14. La figure 13 montre le facteur Q du signal reçu par rapport à la puissance du signal transmis pour ces trois régimes à un taux de bits de 2,5 Gbps. La figure III.14 montre le même graphique pour le taux de bits de 10 Gbps. Pour simuler les conceptions en 10 Gbps, vous devez définir le taux global de bits de paramètre à 10 Gbps. À partir de ces chiffres, nous pouvons conclure que la meilleure performance est obtenue en utilisant une compensation de dispersion symétrique. Le pire des cas est la dispersion avant compensation. Cela peut également être vu à partir des diagrammes œil donnés à la figure III.14. Ces résultats sont tout à fait d'accord avec les résultats trouvés dans la littérature [31] [32].

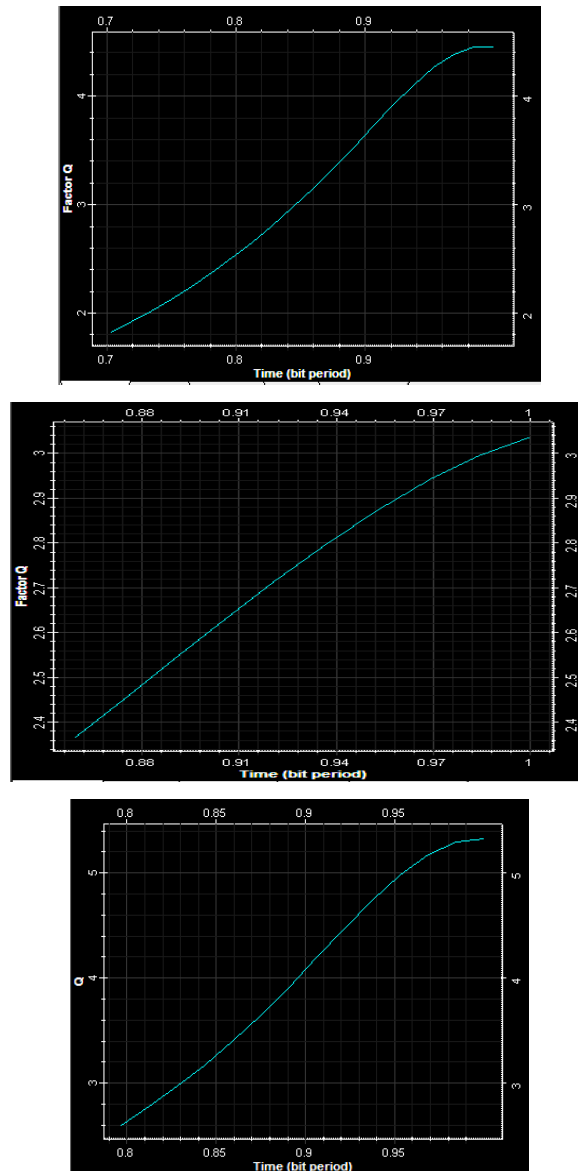


Figure III.13 : Le facteur Q verse le temps du signal à des taux de bits de 2,5 et 10 Gbps pour les compensations de dispersion pré, post-et symétrique.

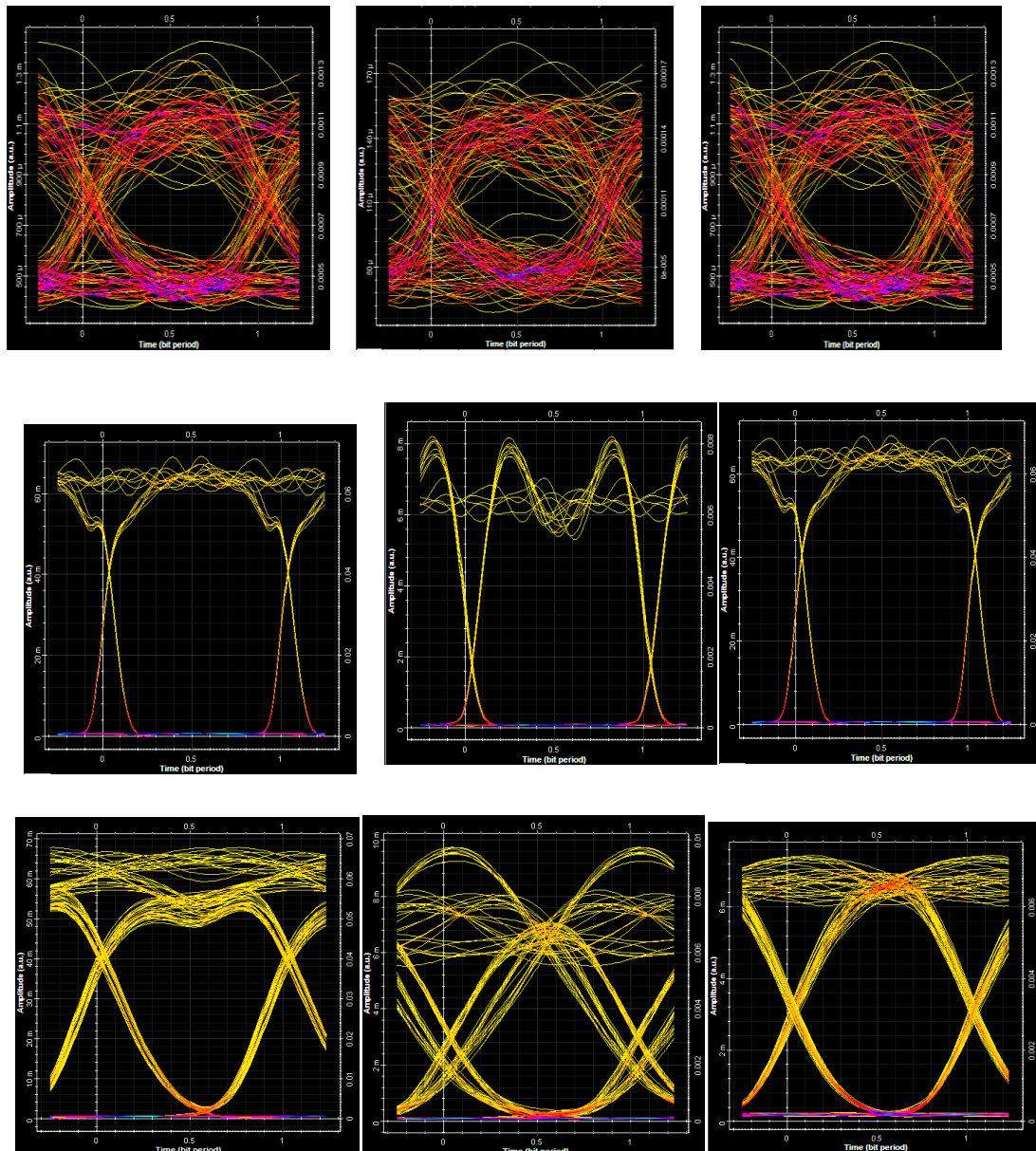


Figure III.14 : Performances du système à des taux de bits de 2,5 et 10 Gbps pour les compensations de dispersion pré, post-et symétrique. Les diagrammes oculaires sont affichés pour des puissances de signal de -12 et 10 dBm.

III.4. Optimisation de la compensation de puissance et de dispersion pour la transmission RZ non Linéaire

Dans cette partie, nous montrons un exemple d'une procédure de maximisation. Nous optimiserons la puissance de lancement et la longueur DCF afin de maximiser le facteur Q au récepteur.

Il a été démontré que le codage du retour non linéaire à zéro (RZ) offre des avantages significatifs pour les systèmes de transmission à taux de bits élevés [28] [29]. Puisque la dispersion de fibre s'équilibre dans ce cas, la puissance lancée n'est pas limitée par la modulation d'auto phase (SPM). Mais cette configuration nécessite une sélection minutieuse de la puissance de lancement et de la dispersion

compensant la longueur de la fibre (DCF).

La figure III.15 montre la disposition du projet. Les paramètres de la fibre SMF sont les suivants : l'atténuation est de 0,171 dB/km, la dispersion est de 17,7 ps/nm/km, la surface effective est de 80 microns carrés, $n_2 = 2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, la longueur est de 100 km.

Les paramètres de la fibre DCF sont les suivants : l'atténuation est de 0,6 dB/km, la dispersion est de -80 ps/nm/km, la surface effective est de 30 microns carrés, $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, la longueur est de 100 km [30]. Le taux de bits est de 10 Gbps, la séquence de bits PRBS de 7ème ordre et le profil de faisceau gaussien est utilisé. La sensibilité du récepteur est de -17 dBm.

La sensibilité du récepteur est de -17 dBm. Un atténuateur est utilisé pour trouver la pénalité de puissance. L'atténuation de l'atténuateur est initialement réglée à 0 lorsque l'optimisation est effectuée. Plus tard, une autre optimisation est effectuée pour trouver la pénalité de puissance en comparant la transmission de performance dos à dos et les performances de liaison. Ceci est fait en variant l'atténuation de l'atténuateur pour obtenir le même facteur Q (6) que nous avons obtenu de la transmission dos à dos. La puissance reçue est alors comparée à la sensibilité du récepteur pour trouver la pénalité de puissance.

La pénalité de puissance est donnée comme $P_{\text{penalty}} (\text{dB}) = -17 \text{ dBm} - P_{\text{received}} (\text{dBm})$.

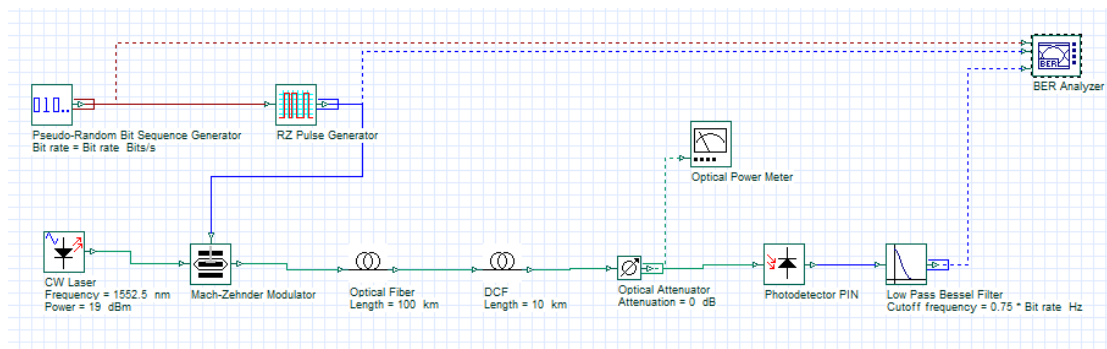


Figure III.15 : layout du projet.

Les paramètres de l'outil d'optimisation sont les suivants : la puissance laser initiale et la longueur du DCF sont réglées respectivement à 20 dBm et 20 km. Les limites inférieures et supérieures de puissance sont définies comme 15 dBm et 25 dBm, 0 et 30 km pour la longueur de DCF. La tolérance de terminaison du paramètre est de 1, celle du résultat est de 0,1.

Le facteur Q maximum est obtenu après 15 calculs, lorsque la puissance laser est d'environ 19 dBm et la longueur DCF est d'environ 10 km. Au point optimal, le facteur Q maximum est ~20.

La puissance moyenne reçue est de -8,25 dBm

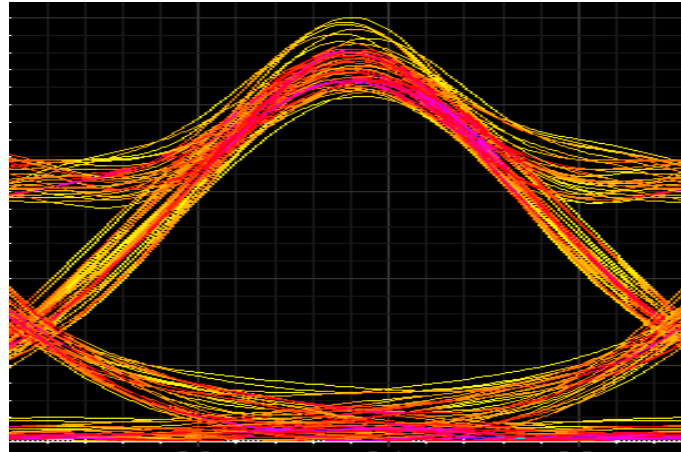


Figure III.16 : Diagramme d'œil pour la modulation RZ avec des paramètres optimaux.

Le facteur Q maximum pour la propagation dos à dos était d'environ 68. Cela montre que la compensation optimale de dispersion correspond à environ 45 km de SMF compensé (~963 ps/nm dispersion résiduelle) avec ~20 dBm de lancement (~16 dBm moyenne) puissance. Nous avons également constaté que la pénalité de puissance à 10^{-9} BER est de 0 dB pour les valeurs optimales (Puissance reçue requise pour obtenir 10^{-9} BER est d'environ -17 dBm, ce qui est la même que la sensibilité du récepteur). La figure III.17 montre le diagramme oculaire après 100 km de propagation avec des paramètres optimaux.

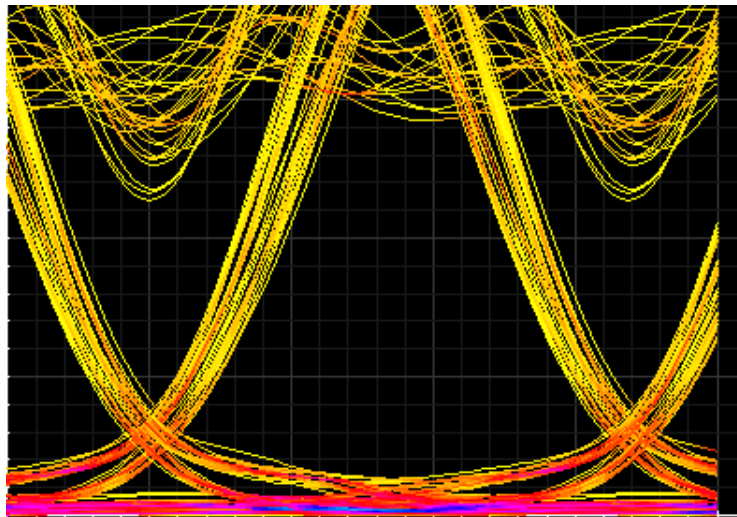


Figure III.17 : Diagramme oculaire pour la modulation NRZ avec des paramètres optimaux.

Dans [33], il a été démontré que des résultats similaires peuvent être obtenus à partir d'un format de modulation NRZ pour un système à travée unique, en laissant la quantité correcte de dispersion résiduelle dans le système. Dans ce cas, la dispersion résiduelle optimale est inférieure à celle du cas RZ.

Nous avons effectué des optimisations similaires pour les modulations NRZ. La sensibilité du récepteur est de -15,6 dBm. Q maximum est obtenu après 4 calculs lorsque la puissance laser est ~ 19

dBm (~ 16 dBm puissance moyenne), et la longueur DCF est ~ 18 km. Au point optimal, le facteur Q maximum est ~ 10 et la puissance moyenne reçue est de -12.3 dBm.

Nous avons constaté que la pénalité de puissance à 10^{-9} BER est ~ 1 dB pour les valeurs optimales lorsque NRZ est utilisé. La compensation optimale de dispersion correspond à environ 80 km de SMF compensé (~ 355 ps/nm dispersion résiduelle).

La figure 3 montre le diagramme oculaire après 100 km de propagation avec des paramètres optimaux lorsque le format de modulation NRZ est utilisé. Les résultats obtenus sont bien d'accord avec les résultats expérimentaux de [33] et [34]. En outre, la comparaison des facteurs Q à des points optimaux montre que, en fait, la modulation RZ peut tolérer plus de distorsion et atteindre une plus longue distance de transmission.

III.5. Compensation de dispersion à l'aide de sous-systèmes

Cette étude illustre comment simuler un simple lien compensé par dispersion qui élabore davantage les concepts de définition du sous-système.

Mettons en place layout suivante, qui comprend:

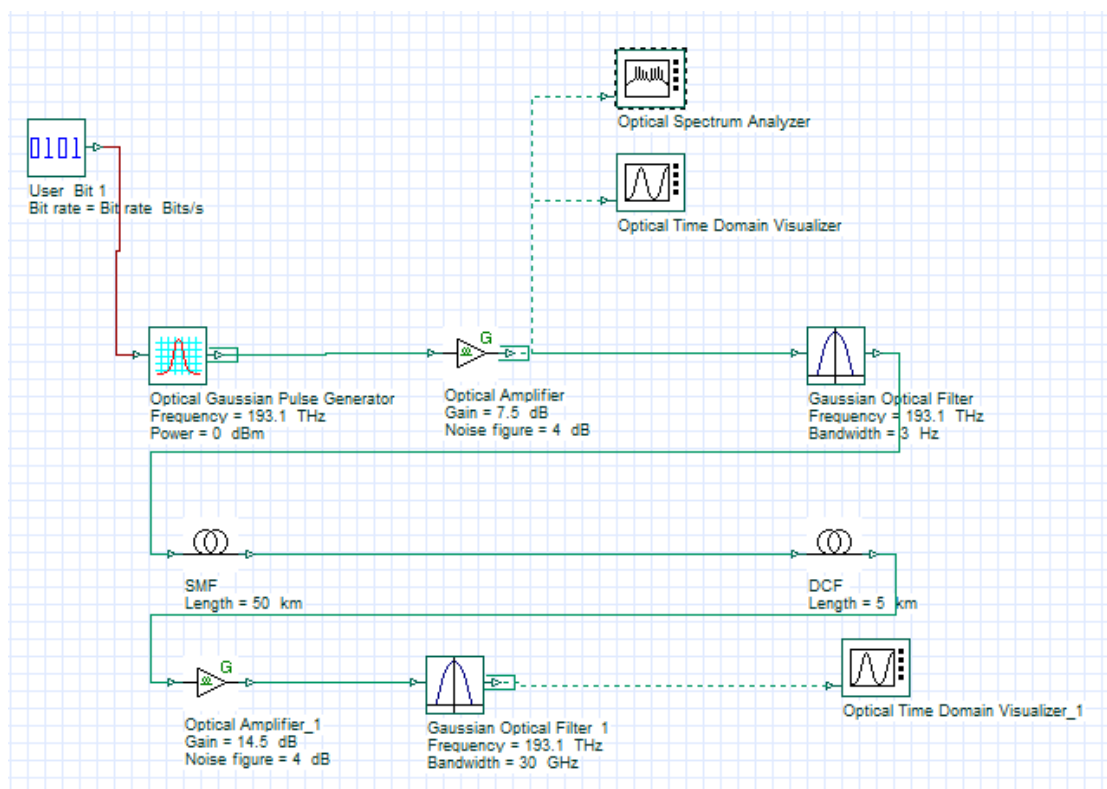


Figure III.18: Dispersion de la durée des liaisons compensées

Un sous-système est comme un composant : il a une icône, des paramètres et des ports d'entrée et de sortie. Vous construisez un sous-système à l'aide d'un groupe de composants ou d'autres sous-systèmes. Vous pouvez facilement créer un sous-système en regroupant les composants sélectionnés.

Le générateur d'impulsions gaussien crée une séquence d'impulsions optiques modulées par un signal numérique d'entrée.

Un amplificateur optique est un appareil qui amplifie directement un signal optique, sans qu'il soit nécessaire de le convertir au préalable en un signal électrique.

Le composant de filtre optique gaussien agit comme un filtre optique avec une fonction de transfert de fréquence gaussienne.

Les analyseurs de spectre optique (OSA) sont des outils de précision utilisés pour mesurer les spectres optiques, sur la base desquels une analyse plus approfondie est souvent possible.

Visualiseur optique de domaine temporel : Affiche le signal optique modulé dans le domaine temporel.

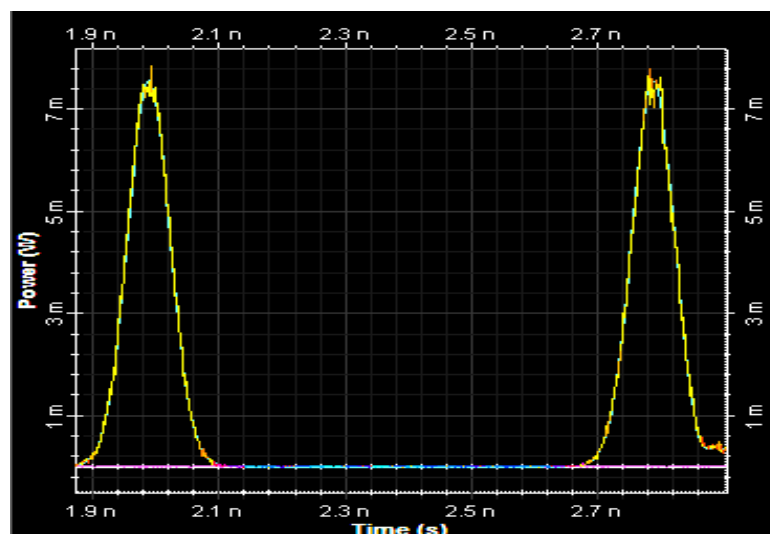
Analyseur BER : mesure les performances du système en fonction du signal avant et après la propagation.

Plusieurs visualiseurs peuvent être attachés à une sortie de composant.

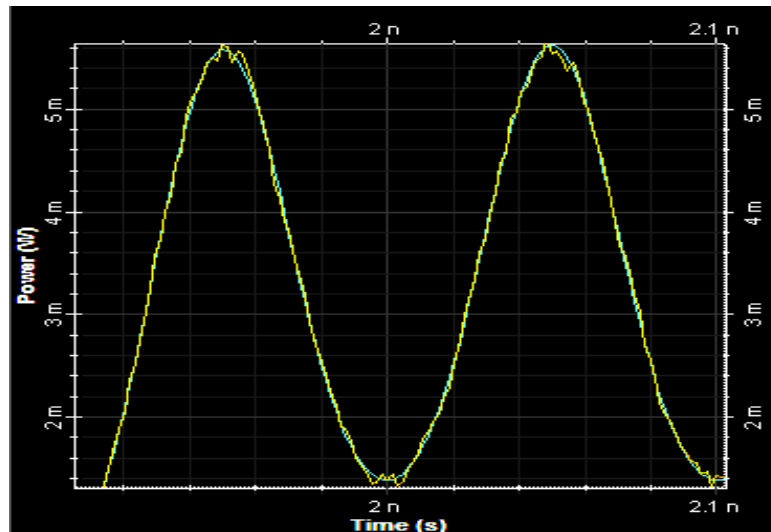
Une source abstraite d'impulsions Gaussien RZ selon une séquence de bits définie par l'utilisateur

- Amplificateur et filtre de rappel
- SMF et DCF
- Amplificateur et filtre en ligne
- Visualiseurs

Examinons les formes d'onde du signal à l'entrée, après le SMF et à la fin de la travée. On peut observer qu'après le SMF, les impulsions du signal sont atténuées, élargies par un facteur d'environ 2 et qu'il y a une interférence inter-symbole considérable.



Signal d'entrée



Signal avant SMF



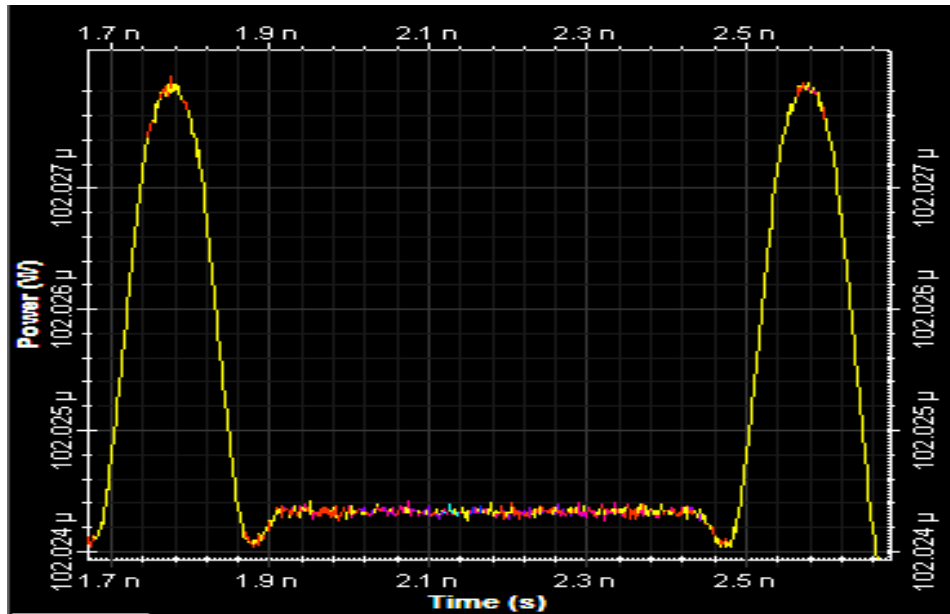
Signal de sortie compensé

Figure III.19 : Évolution du signal dans une durée de liaison compensée par dispersion

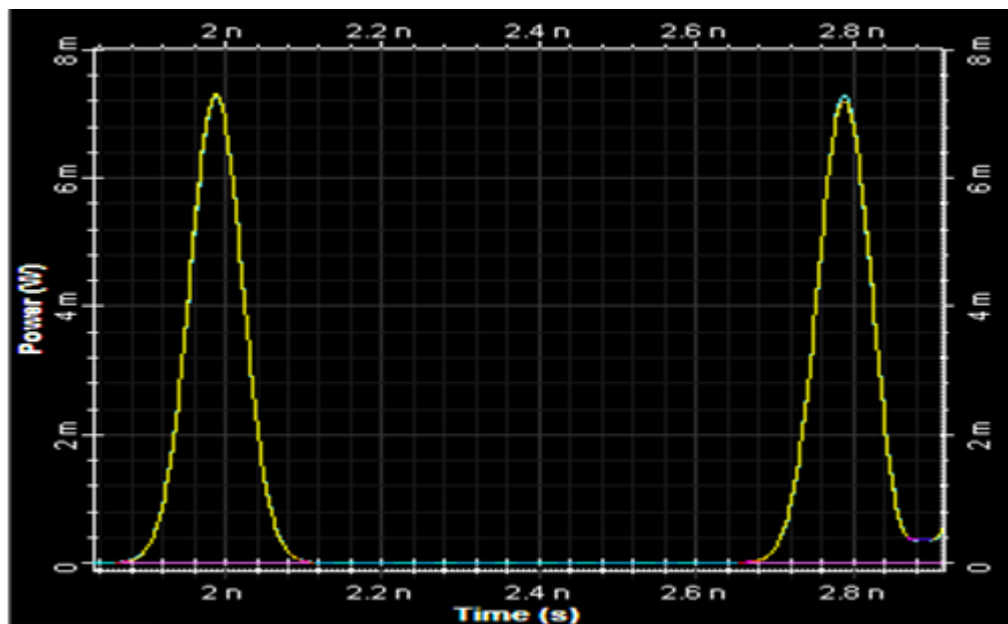
Nous pouvons maintenant utiliser la puissante fonction de script d'OptiSystem afin d'éviter la nécessité de redéfinir ceux des paramètres de mise en page qui dépendent du signal au cas où les signaux d'entrée changeraient. L'un de ces paramètres est la bande passante des deux filtres en ligne. Nous ouvrons la boîte de dialogue des paramètres de filtre et passons le mode de bande passante au script. On clique droit dans le champ de valeur et sélectionne le taux de Bit. Puis ajoute $3 \times$ de sorte que l'ensemble du champ lit $3 \times$ Taux de bits.

Nous cliquons sur l'espace de travail de layout et montrons la boîte de dialogue paramètres global, puis augmentons le taux de bits deux fois et recalculons.

La figure suivante montre que, indépendamment de l'élargissement dispersif sévère dans le SMF, le signal est à nouveau conservé après toute la durée, à la fois en termes de puissance et de forme d'impulsion.



Avant SMF



Signal de sortie compensé

Figure III.20 : Avant smf et signal de sortie compensé

Il y a de fortes chances que ce lien unique soit utile pour la construction de systèmes multi-travées plus longs.

Dans ce cas, il est recommandé de l'encapsuler dans un sous-système, ce qui permettrait plus tard de reproduire la même combinaison de composants rapidement et efficacement.

III.6. Compensation de la dispersion avec composant grating de bragg de fibre

Cette étude illustre la possibilité de compensation de dispersion à l'aide d'une fibre à réseau de Bragg créé avec le composant Réseau à fibre. Ce composant permet la conception de réseaux de fibres apodisés et chirpés capables de fournir une compensation de dispersion dans le système optique.

L'idée physique derrière cette compensation est la suivante : la création d'un réseau chirpé linéairement et apodisé nous permet de créer un délai Δt entre les différentes composantes spectrales du signal.

Par exemple, dans SMF à $1,55\mu\text{m}$, la dispersion de la vitesse de groupe crée un chirp négatif des impulsions, ce qui signifie que les fréquences les plus élevées (qui se propagent plus rapidement) se trouvent dans la partie avant de l'impulsion et les plus basses (se propageant plus lentement) dans la partie arrière. .

En raison de cette vitesse de propagation différente des différentes composantes spectrales, l'impulsion s'étale. Si nous créons un réseau de fibres avec une période réduisant linéairement le long du réseau, car 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 le SMF. Par conséquent, propager et refléter notre pouls dans cet appareil permettra de compenser l'élargissement de la dispersion de notre pouls.

La figure III.21 montre la disposition du projet.

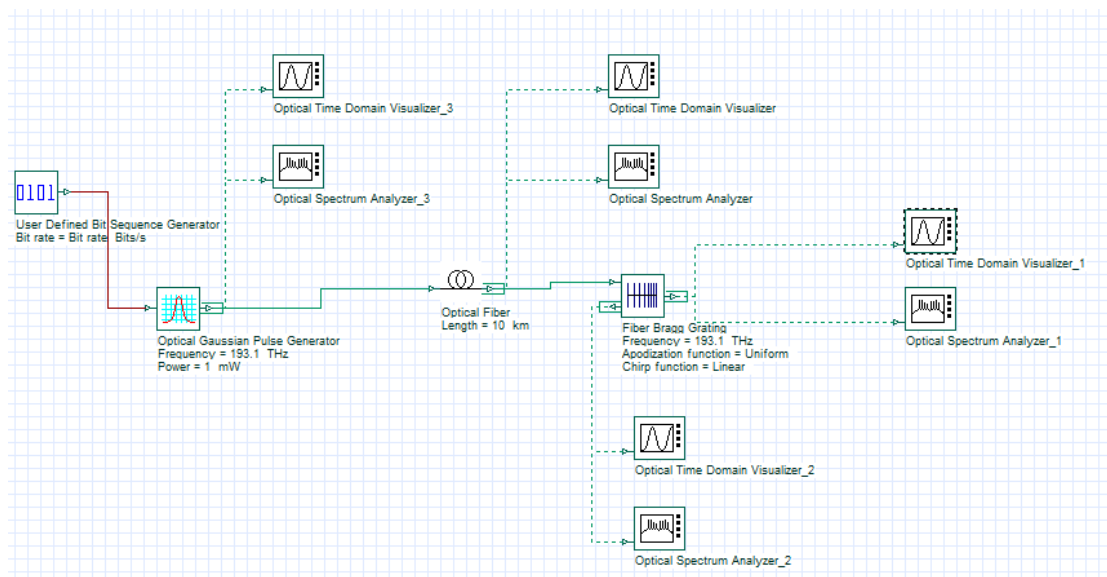


Figure III.21 : Disposition du projet pour la compensation de dispersion avec une fibre à de réseau de Bragg à pas variable chirpé et apodisé dans OptiSystem .

La forme suivante a été générée dans le générateur d'impulsions optiques gaussiennes avec une

impulsion initiale de 12,5 ps et des paramètres globaux d'un débit binaire de 40 Gb/s et d'un intervalle binaire de 0,5 fois bit.

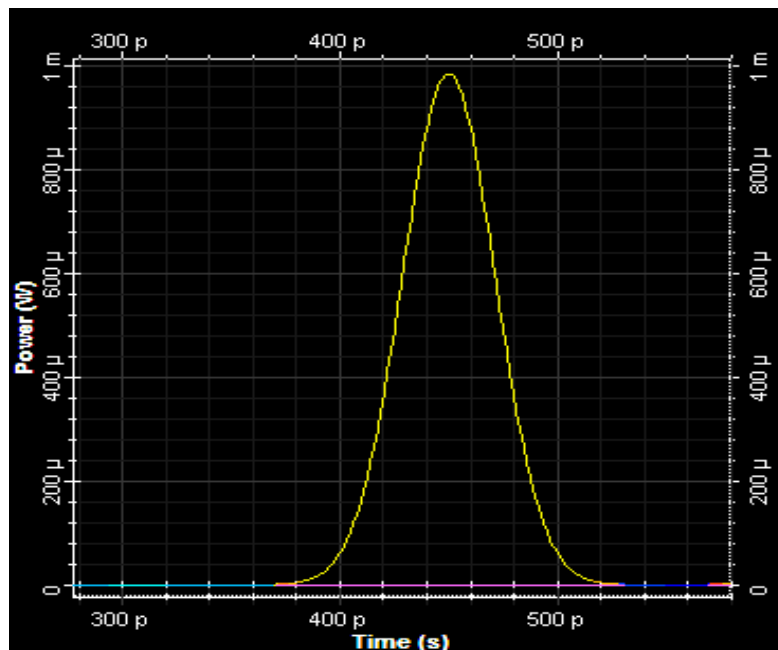


Figure III.22 : Impulsion gaussienne initiale.

L'impulsion a été lancée à 10 km SMF. En raison de cette propagation, la largeur de l'impulsion augmente d'environ quatre fois.

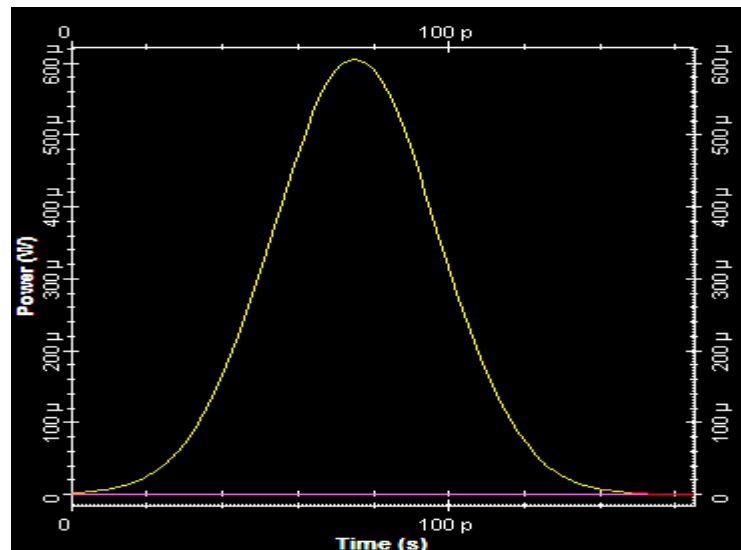


Figure III.23 : Impulsion gaussienne après propagation de 10 km en SMF.

Un réseau de Bragg à fibre avec les propriétés suivantes a été utilisé : fréquence 193,1 THz, indice effectif = 1,45, longueur = 6 mm, apodisation uniforme, indice de modulation 0,0001, chirp linéaire avec un paramètre linéaire de 0,0001, nombre de segments 101 et nombre maximum de points

spectraux 1000.

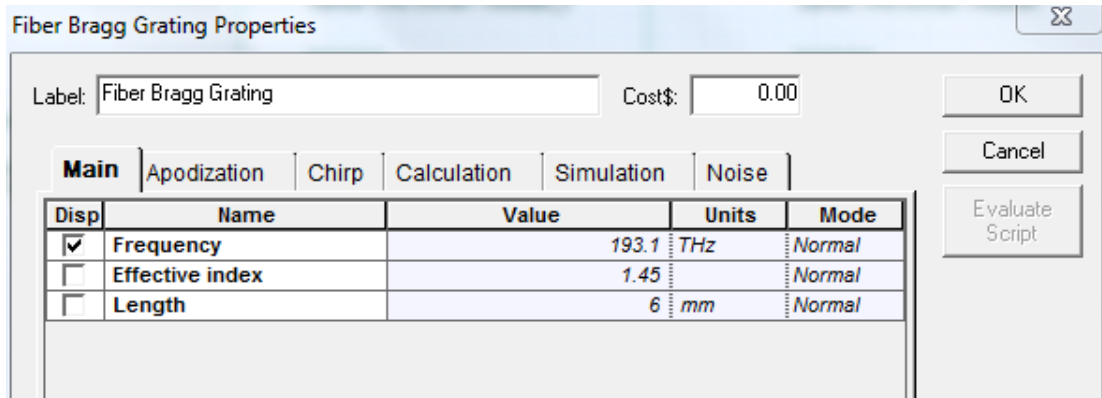


Figure III.24 : Paramètres du réseau de Bragg à fibre optique, apodisé uniformément et chirpé linéairement

Le résultat de la compensation de dispersion effectuée à partir de ce composant de réseau de fibre est l'obtention d'une impulsion d'environ 20 ps de largeur.

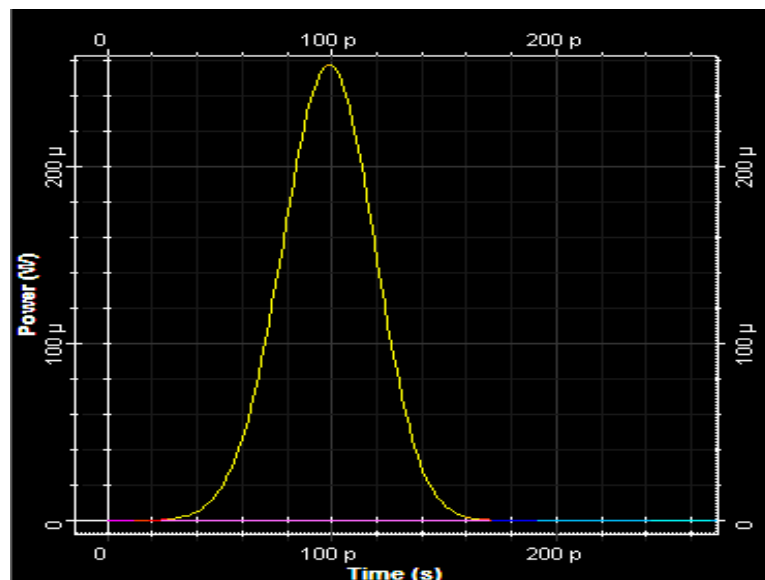


Figure III.25 : Impulsion après compensation de dispersion avec réseau de fibres avec apodisation uniforme et chirp linéaire

III.7. Uniform fiber bragg grating comme filter

Cette étude montre l'application du composant de réseau de Bragg à fibre uniforme dans OptiSystem en tant que filtre.

Cette partie a deux mises en page de projet. Dans le premier, une source de lumière blanche est utilisée. Dans le second, une impulsion gaussienne est utilisée.

La première disposition du projet est indiquée dans la figure III.26

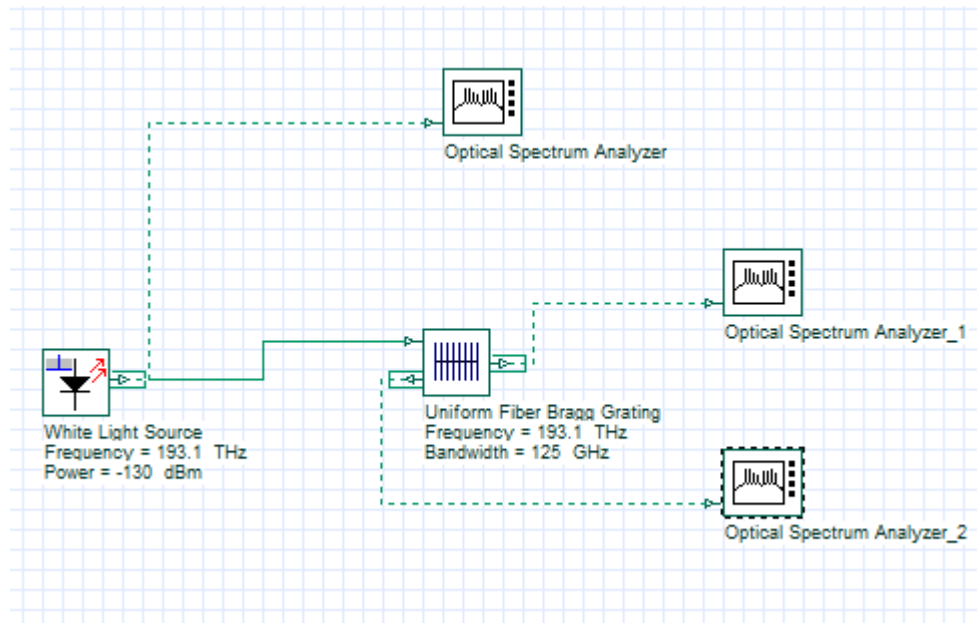


Figure III.26 : Plan du projet pour le filtre avec un composant de réseau Bragg à fibre uniforme dans OptiSystem

Le spectre initial a la forme indiquée dans la figure III.27.

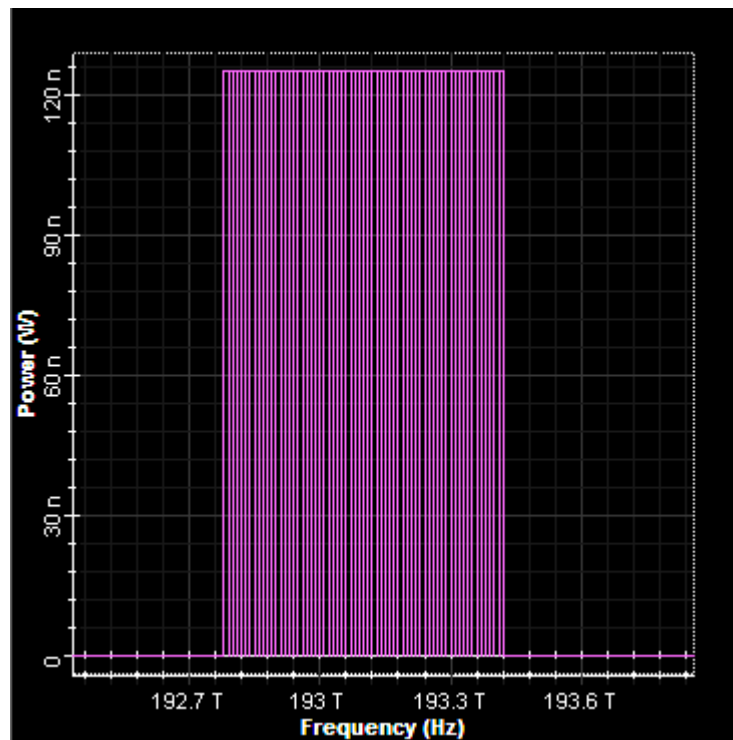


Figure III.27 : Spectre initial de source de lumière blanche

Cette disposition comprend des balayages sur la réflectivité dans l'onglet principal du composant de réseau de Bragg à fibre.

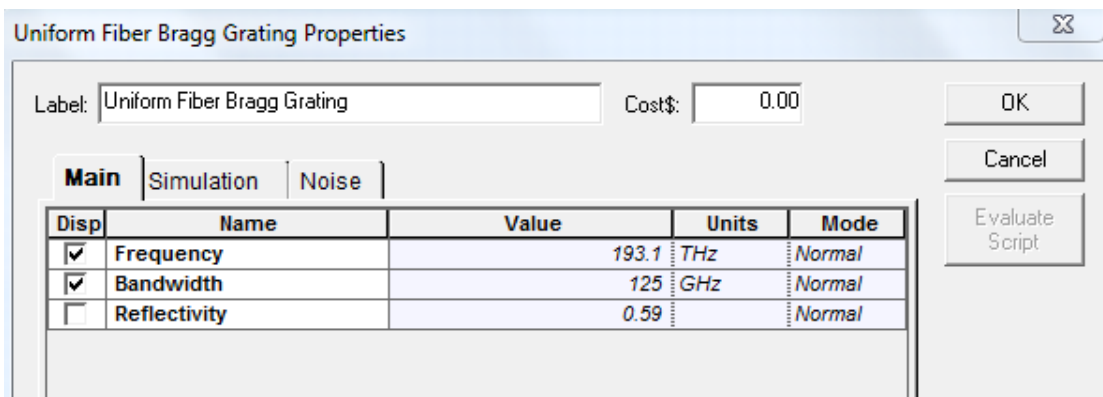


Figure III.28: propriétés du réseau de Bragg à fibre uniforme

La réflectivité étant liée au produit de la longueur de couplage et de la longueur des réseaux (selon la solution exacte existante [35]), ce balayage correspond au changement de la longueur de couplage et/ou de la longueur du réseau. La comparaison du spectre de réflexion correspondant est illustrée à la figure III.29.

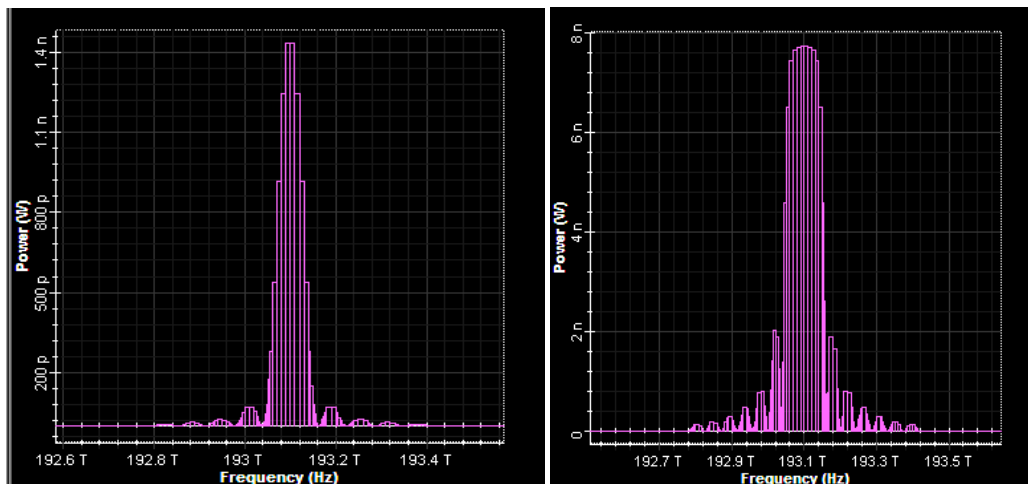


Figure III.29 : Spectres réfléchis du réseau de Bragg uniforme pour une réflectivité de 0,19, 0,59 et 0,99

Les résultats obtenus sont en bon accord avec ce qui pourrait être déduit de la solution exacte pour le coefficient de réflexion d'amplitude du réseau uniforme [35]. Les spectres de transmission correspondants sont illustrés à la figure III.30.

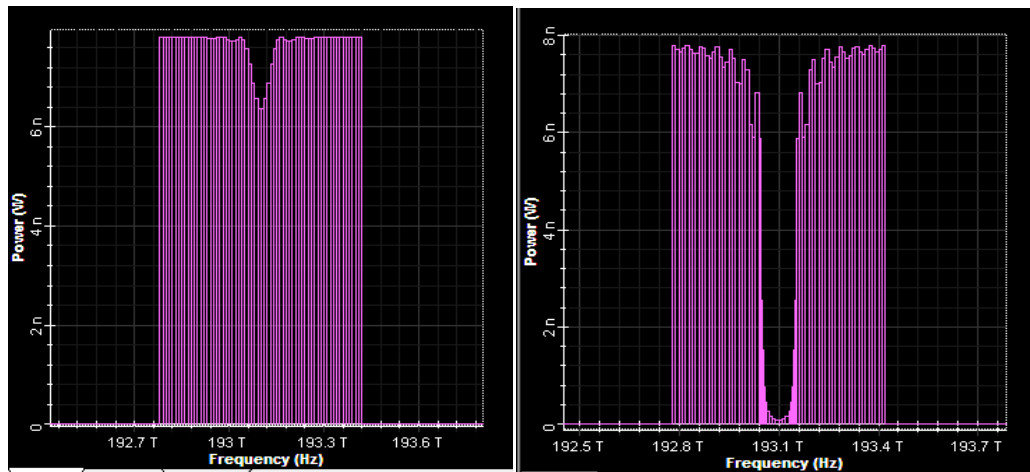


Figure III.30 : Spectres transmis à partir d'un réseau de Bragg uniforme pour une réflectivité de 0,19 et 0,99.

Dans la deuxième disposition, une action de filtrage est démontrée sur le spectre d'impulsions gaussiennes.

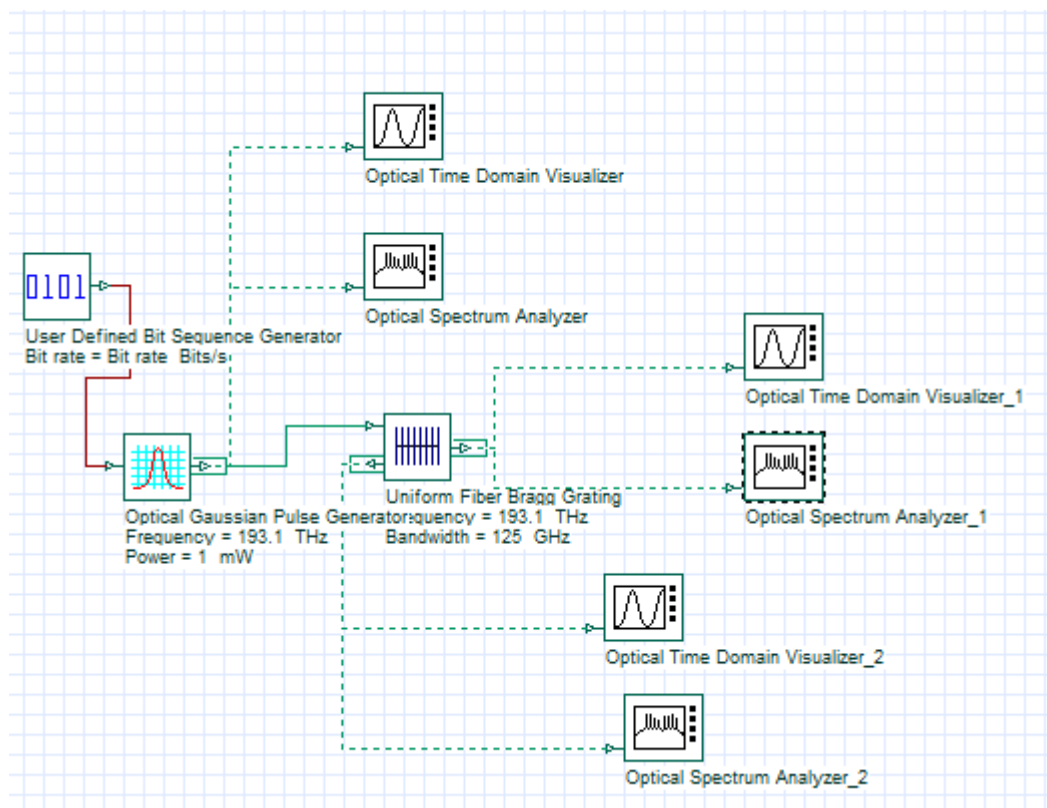


Figure III.31 : Disposition du projet pour un filtre avec un réseau de Bragg à fibre uniforme dans OptiSystem utilisant l'impulsion gaussienne

Un balayage avec la largeur d'impulsion (0,5 et 0,05 rapport cyclique dans le générateur gaussien) et avec le spectre des impulsions gaussiennes est effectué respectivement.

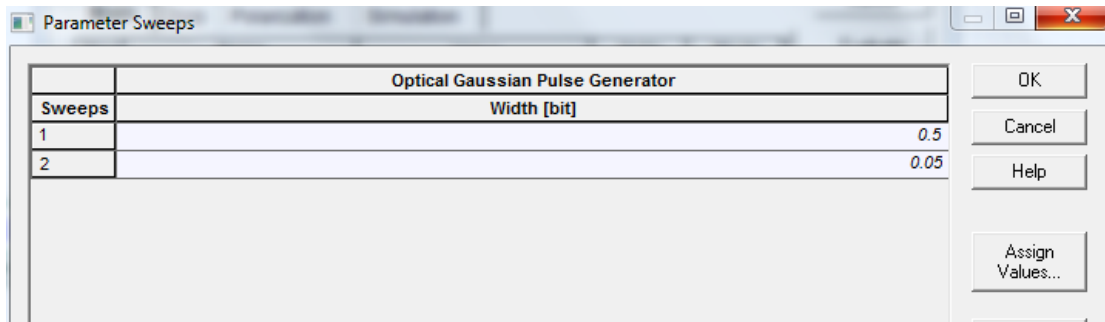


Figure III.32: Balayage du cycle de service.

Le spectre des impulsions gaussiennes initiales est présenté à la figure III.33.

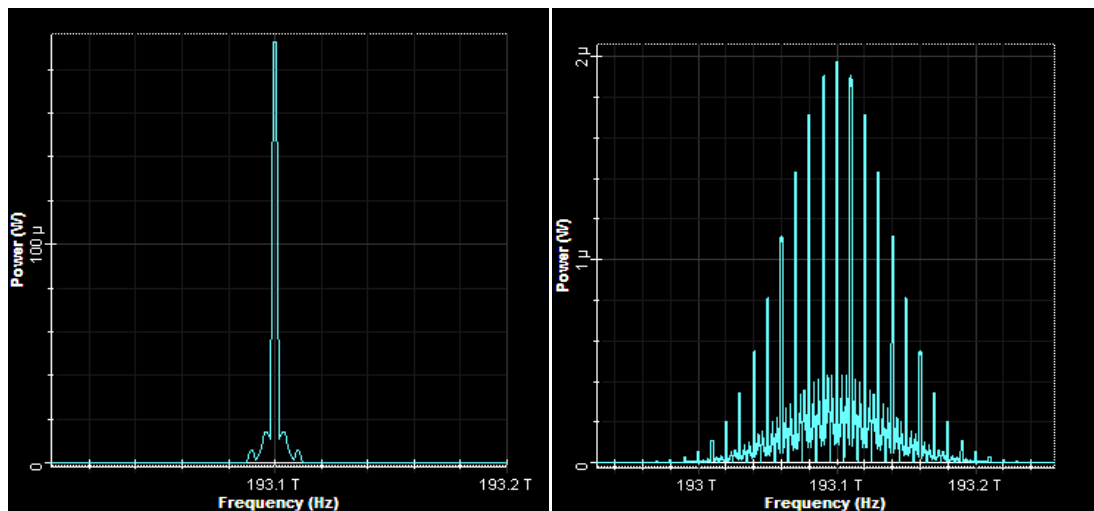


Figure III.33 : Spectres initiaux des impulsions gaussiennes, rapport cyclique 0,5 et 0,05 (12,5 ps et 1,25 ps, respectivement).

Les spectres de réflexion obtenus sont présentés à la figure III.34.

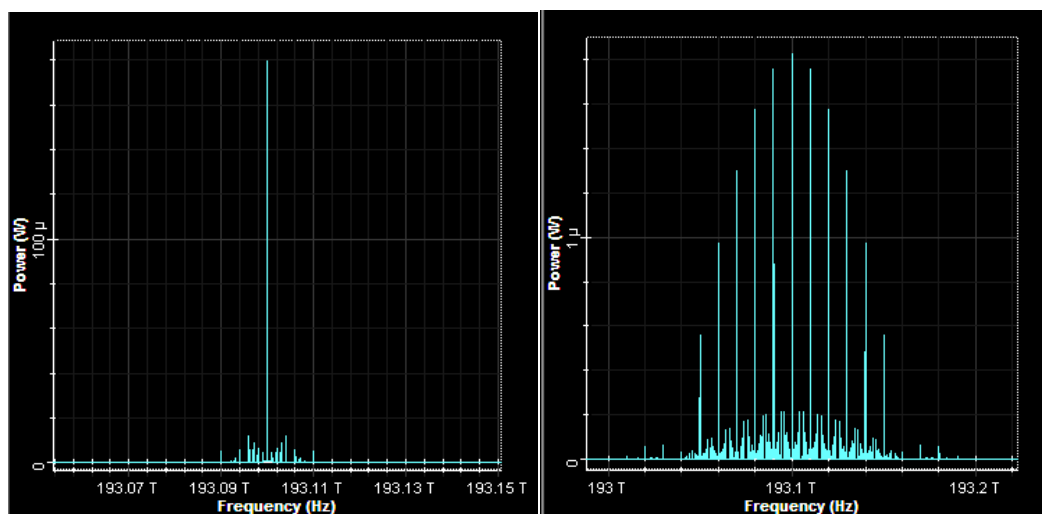


Figure III.34 : Spectres réfléchis des impulsions gaussiennes, rapport cyclique de 0,5 et 0,05, respectivement.

Les spectres de transmission correspondants sont illustrés à la figure 35.

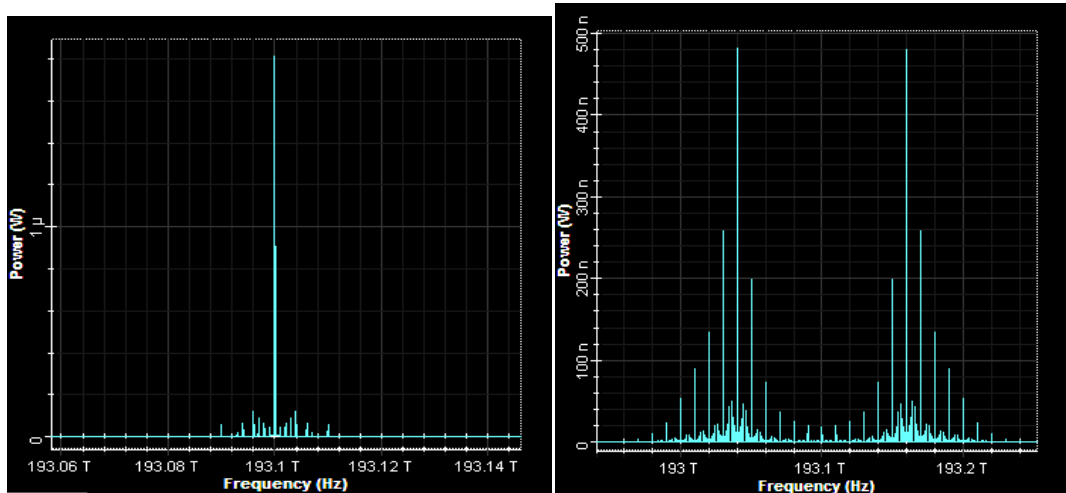


Figure III.35 : Spectres transmis des impulsions gaussiennes, rapport cyclique de 0,5 et 0,05, respectivement.

Comme on peut le voir, dans le second cas la bande passante du réseau (125 GHz) est beaucoup plus petite que le spectre de l'impulsion, une partie du spectre de l'impulsion est réfléchi.

En conclusion, nous avons démontré le composant de réseau de Bragg à fibre uniforme dans OptiSystem en tant que filtre.

III.8. Compensation de dispersion avec OptiGrating

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'idée sous-jacente est d'utiliser les possibilités supplémentaires offertes par OptiGrating pour la conception de réseaux de fibres.

L'idée physique derrière cette compensation est la suivante : la création d'un réseau linéaire chirpé (à pas variable) nous permet de créer un délai entre les différentes composantes spectrales du signal.

Par exemple, dans SMF à 1,55 m, la dispersion de vitesse de groupe crée un chirp négatif des impulsions, ce qui signifie que les fréquences les plus élevées (qui se propagent plus rapidement) se trouvent dans la partie avant de l'impulsion et les plus basses (se propageant plus lentement) dans la partie arrière.

En raison de cette vitesse de propagation différente des différentes composantes spectrales, l'impulsion s'étale. 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 le réseau. SMF.

Par conséquent, propager et refléter notre pouls dans cet appareil permettra de compenser

l'élargissement de la dispersion de notre pouls.

Le coefficient de dispersion D_g [ps/nm.km] pour le réseau de Bragg à fibre à modulation linéaire est donné par l'expression simple suivante [36] :

$$D_g = \frac{2n}{c\Delta\lambda_{chirp}}$$

où n est l'indice de mode moyen, c est la vitesse de la lumière, $\Delta\lambda_{chirp}$ est la différence des longueurs d'onde de Bragg aux deux extrémités du réseau (notez que cette quantité est donnée par le paramètre chirp total dans l'onglet de définition du réseau dans le gestionnaire de réseau d'OptiGrating).

III.8.1. Réseau de Bragg à fibres à pas variable linéairement

L'objectif de la première disposition est d'accomplir une compensation de dispersion dans OptiSystem à l'aide d'un réseau de fibres avec chirp linéaire généré conformément à la formule ci-dessus.

Le projet à l'étude est illustré à la figure III.36

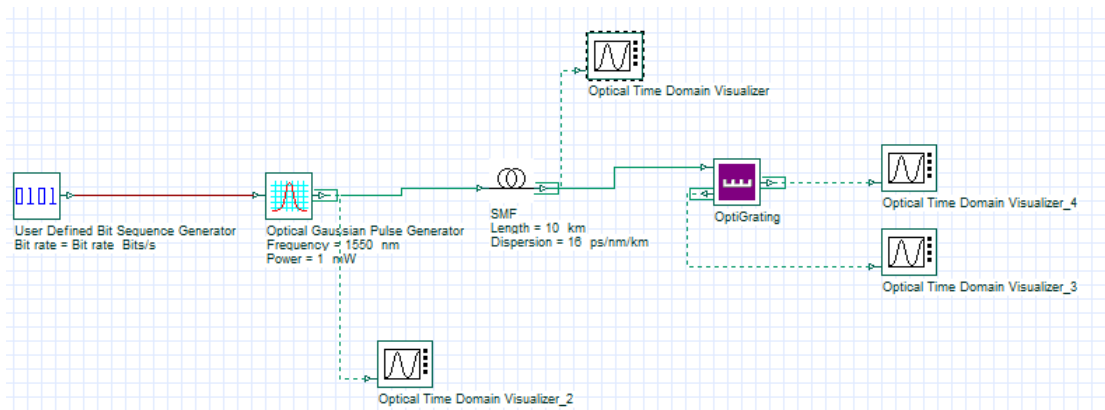


Figure III.36 : Disposition du projet pour la compensation de dispersion avec réseau de fibres avec chirp linéaire.

Pour un taux de bits de 40 Go/s et avec une fente de 0,5 fois bits, dans le générateur optique d'impulsions gaussiennes, une impulsion initiale de 12,5 ps a été générée et propagée en 10 km SMF. L'impulsion initiale et la sortie des impulsions SMF sont indiquées dans la figure 37 et la figure 38. Pour un débit binaire de 40 Gb/s et avec un intervalle binaire de 0,5 fois bits, dans le générateur d'impulsions optique gaussien, une impulsion initiale de 12,5 ps a été générée et propagée dans une SMF de 10 km.

L'impulsion initiale et la sortie des impulsions SMF sont illustrées aux figures III.37 et III.38.

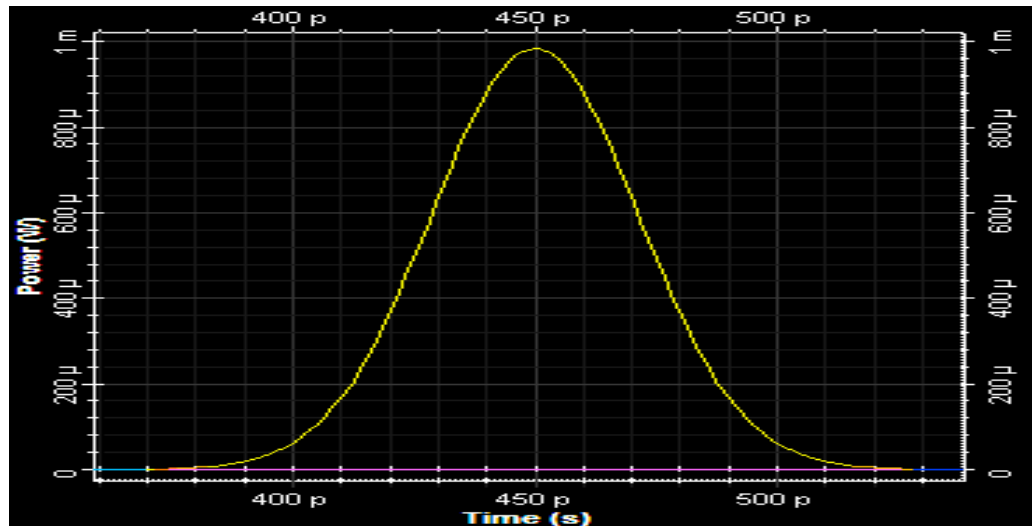


Figure III.37: Impulsion initiale

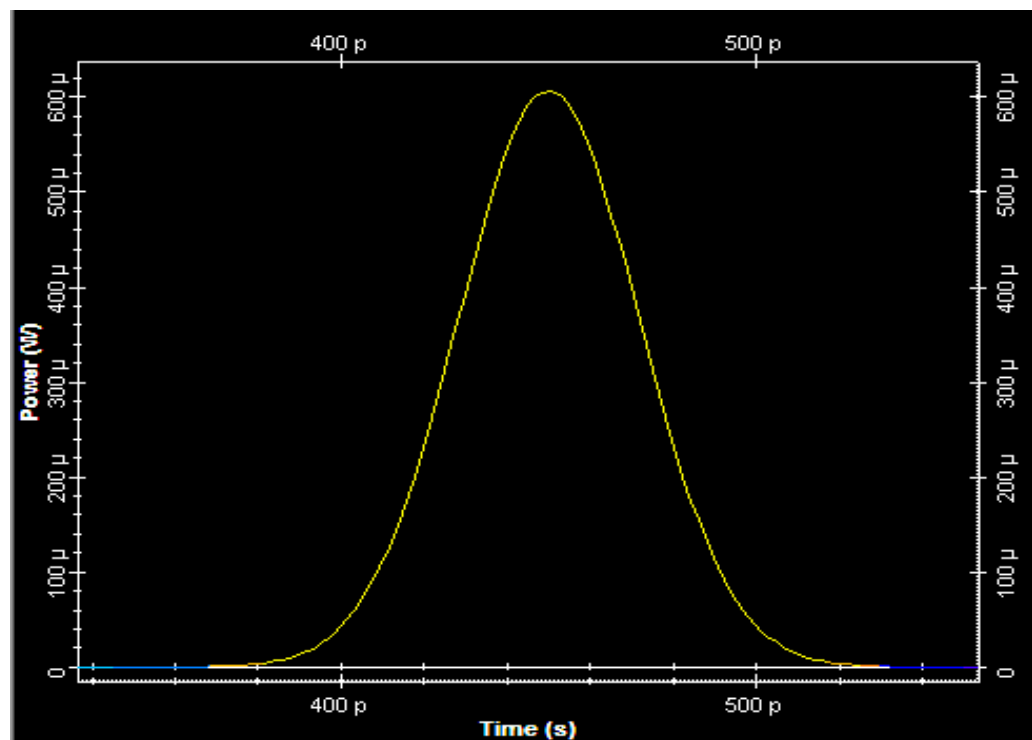


Figure III.38: Impulsion après propagation de 10 km en SMF

En raison de la dispersion, la largeur d'impulsion augmente jusqu'à environ 50 ps. La dispersion accumulée après 10 km de propagation en SMF est de 160 ps/nm.

Afin de compenser la dispersion accumulée, nous utiliserons FBG Linéairement chirpée.

Les données correspondantes pour la fibre et le réseau sont présentées sur les figures III.39 et III.40.

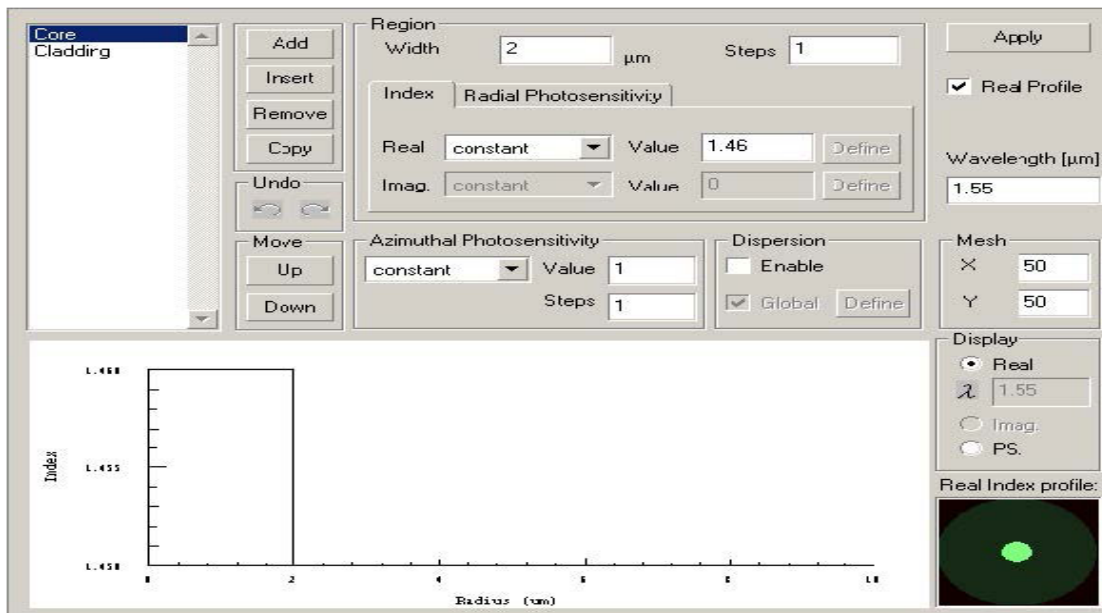


Figure III.39 : Données de base.

Fibre à saut d'indice avec les largeurs du cœur (indice de réfraction 1,46) et de la gaine (indice de réfraction 1,45) sont respectivement 2μm et 8μm.

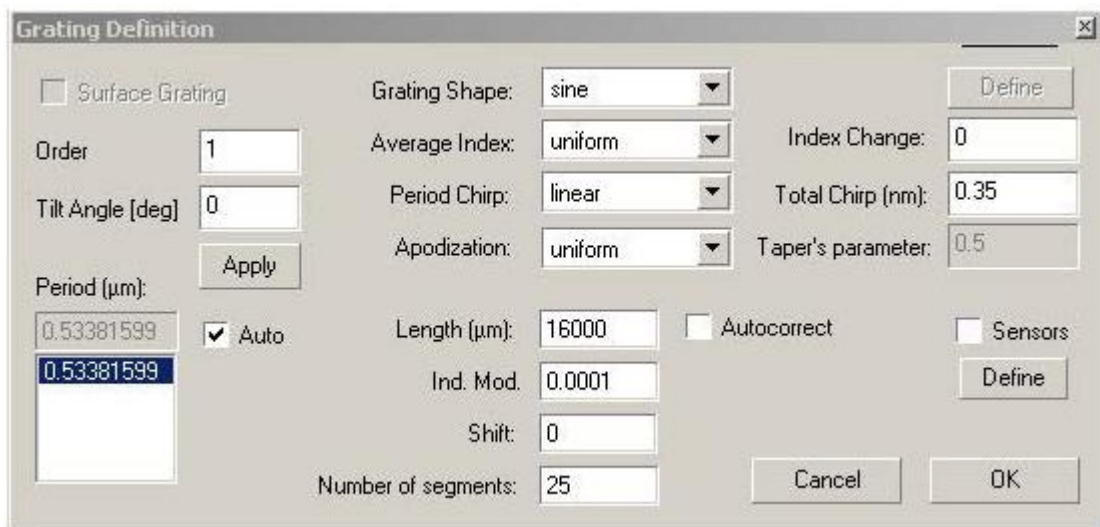


Figure III.40 : Boîte de dialogue de « définition le réseau »

On considère une FBG linéaire modulé avec une bande passante $\Delta\lambda$ chirp = 0,35 nm. Lorsqu'on suppose que l'indice de mode moyen $\sim 1,46$ conformément à la formule ci-dessus, on obtient la longueur requise du réseau de ~ 6 mm pour la compensation de la dispersion accumulée de 160 ps/nm dans le SMF.

Dans la simulation présentée, nous avons utilisé le réseau avec une longueur légèrement plus grande $\sim 1,6$ cm.

Le résultat obtenu de la compensation est montré dans la Figure III.41.

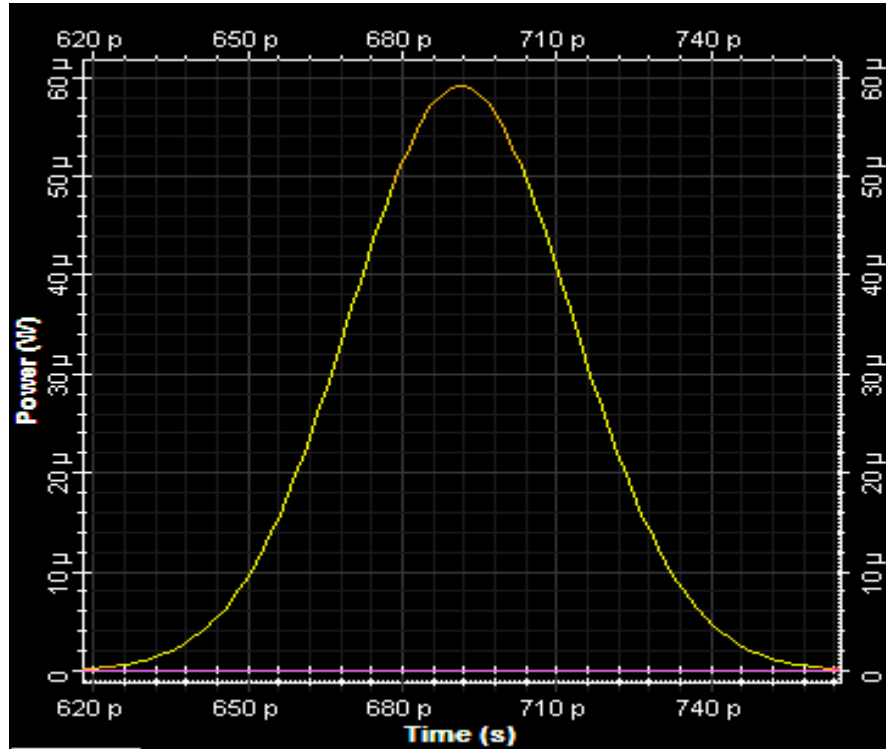


Figure III. 41 : Impulsion après compensation de dispersion avec FBG linéairement chirpée.

Comme nous le voyons, une compensation de dispersion pratiquement complète a été obtenue, conçu au moyen de FBG.

III.8.2. Réseau de Bragg à fibre conçu au moyen d'un algorithme de diffusion inverse

Le but de cette disposition est d'effectuer une compensation de dispersion à l'aide d'un réseau de Bragg à fibre, conçu avec l'algorithme de diffusion inverse d'OptiGrating.

L'exigence lors de la conception de ce FBG est qu'il doit produire une dispersion accumulée de -160 ps/nm.

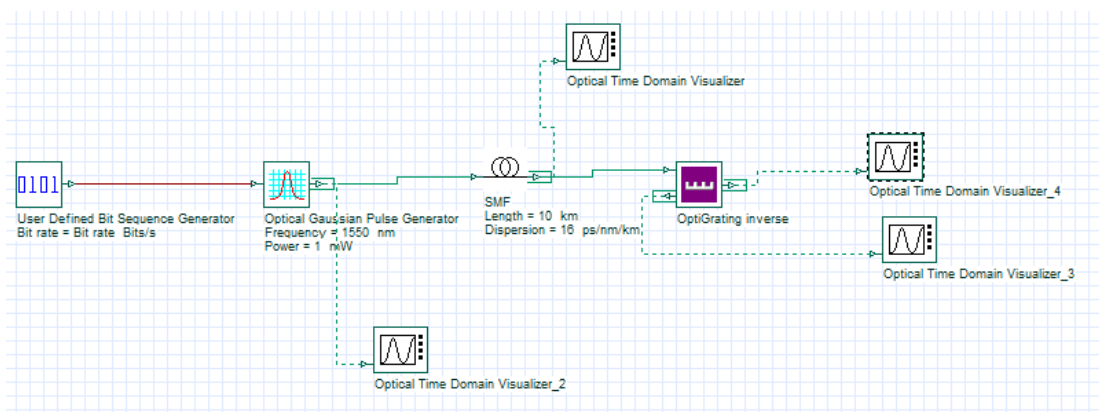


Figure III.42 : Disposition du projet pour la compensation de dispersion avec FBG avec algorithme de diffusion inverse

Le résultat de la compensation de dispersion de la dispersion accumulée dans SMF est illustré à la Figure III.43.

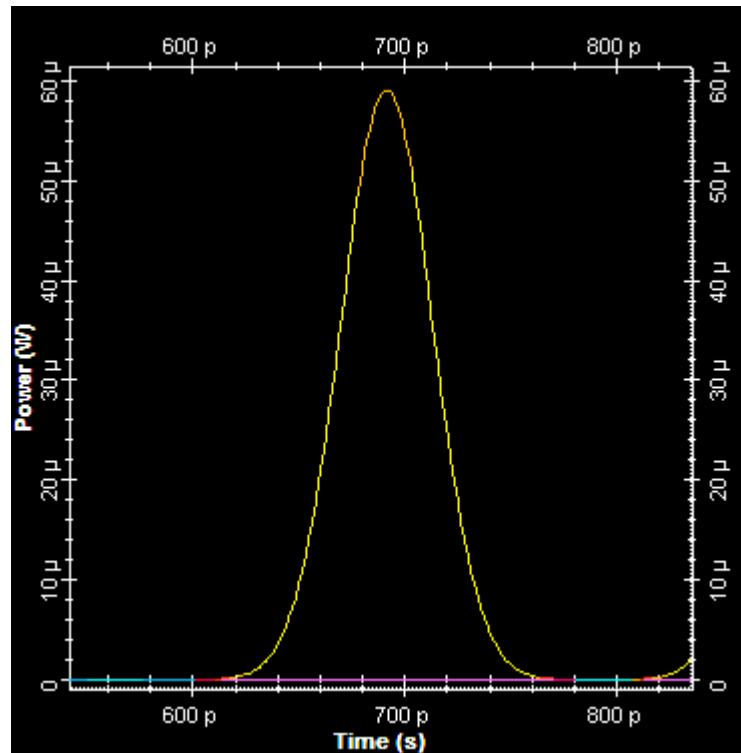


Figure III.43 : Impulsion après compensation de dispersion avec réseau de fibres FBG généré dans OptiGrating avec un algorithme de diffusion inverse et de dispersion accumulée égale à -160 ps/nm. Comme on le voit, FBG permet de réduire la largeur d'impulsion à environ 17 ps.

En résumé, avec ces simulations, nous avons démontré comment la compensation de dispersion dans OptiSystem peut être obtenue en utilisant un spectre de réflexion obtenu avec les réseaux conçus au moyen d'OptiGrating.

III.9. Compensation de la dispersion avec composant de dispersion idéal

Cette étude démontre la possibilité d'une compensation de dispersion à l'aide d'un composant de dispersion idéal dans OptiSystem.

La disposition du projet est illustrée à la figure III.44.

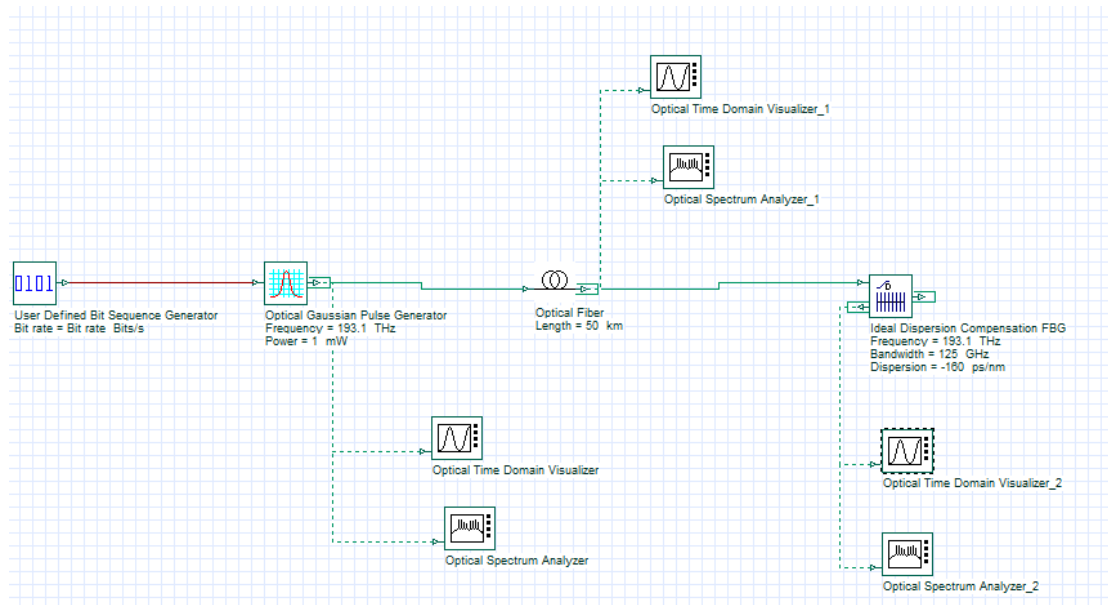


Figure III.44 : Disposition du projet pour la compensation de dispersion avec un composant de dispersion idéal dans OptiSystem

La forme suivante a été générée dans le générateur d'impulsions optiques gaussiennes avec une impulsion initiale de 12,5 ps et des paramètres globaux d'un débit binaire de 40 Gb/s et d'un intervalle binaire de 0,5 fois bits.

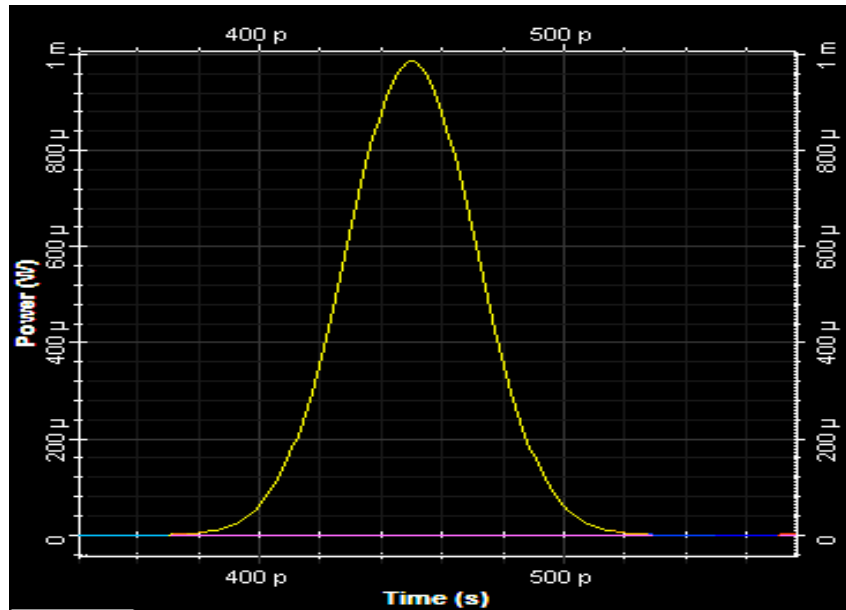


Figure III.45 : Impulsion gaussienne initiale.

L'impulsion a été lancée en 10 km SMF. À la suite de cette propagation, la largeur de l'impulsion augmente environ quatre fois.

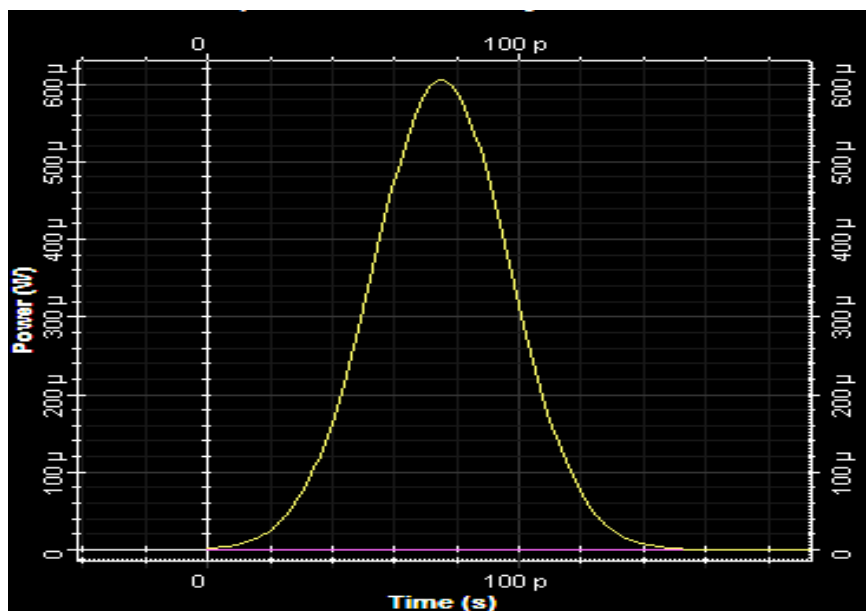


Figure III.46 : Impulsion gaussienne après 10 km de propagation en SMF.

Après 10 km de propagation en SMF, la dispersion accumulée est de 160 ps/nm. Afin de compenser cette dispersion accumulée, la compensation de dispersion idéale est fixée à -160 ps/nm. La fréquence centrale et la bande passante correspondante (dans ce cas ~ 3 fois le débit binaire) doivent être correctement choisies. Les paramètres de compensation pour ce composant est illustré à la Figure III. 47.

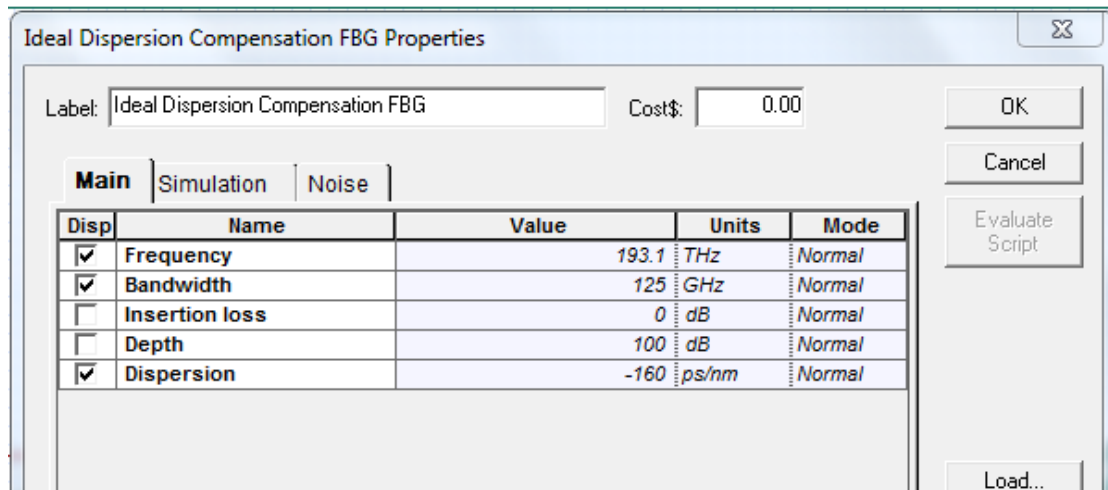


Figure III.47 : Paramètres de la composante de compensation de la dispersion idéale.

Le résultat de la compensation de dispersion effectuée avec la composante compensation de dispersion idéale est indiqué à la figure III.48.

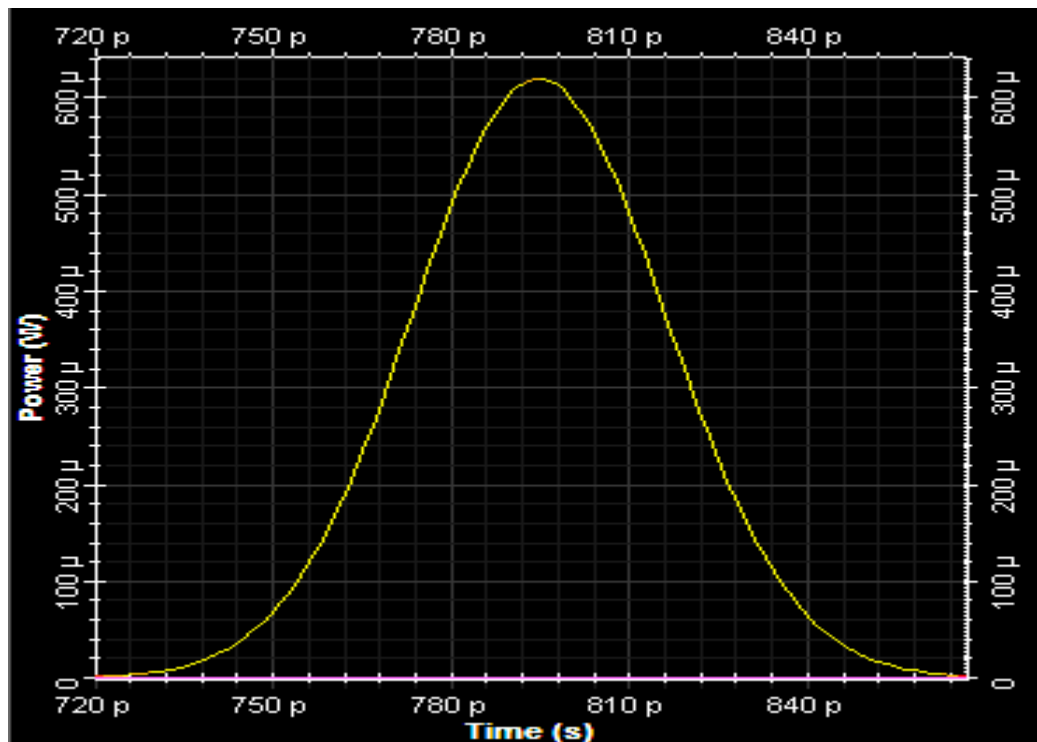


Figure III.48 : Impulsion après compensation de dispersion avec composant de compensation de dispersion idéale.

Comme on pouvait s'y attendre, une compensation exacte de la dispersion accumulée a été obtenue. En conclusion, nous avons montré au cours de cette partie comment utiliser un composant idéal

dispersion compensation dans OptiSystem pour la compensation de dispersion.

III.10. Compensation de dispersion à l'aide de la péréquation électronique

L'optique et l'électronique donnent une compensation de dispersion électronique (EDC) qui est utilisée pour compenser la dispersion dans une fibre monomode (SMF). De nombreuses techniques peuvent être suivies pour réduire la dispersion et les performances peuvent être améliorées à l'aide de l'EDC. Dans les travaux de HuiWi, l'intégration de filtres transversaux utilisant le gain à chaque étage et l'utilisation de lignes à retard réduiront efficacement l'interférence de symboles interférentiels (ISI) qui se traduit par une fibre optique à haute vitesse lien [26]. Dans l'oeuvre de Manpreet Kaur, Asymmetric Mach Interféromètre Zehnder (AMZI) qui a un plus grand délai différentiel et a la capacité de réduire le non linéarités des fibres [37].

La figure III.49 démontre l'application de l'égaliseur dans un lien optique. La figure III.50 représente le diagramme de l'œil avant et après compensation de dispersion.

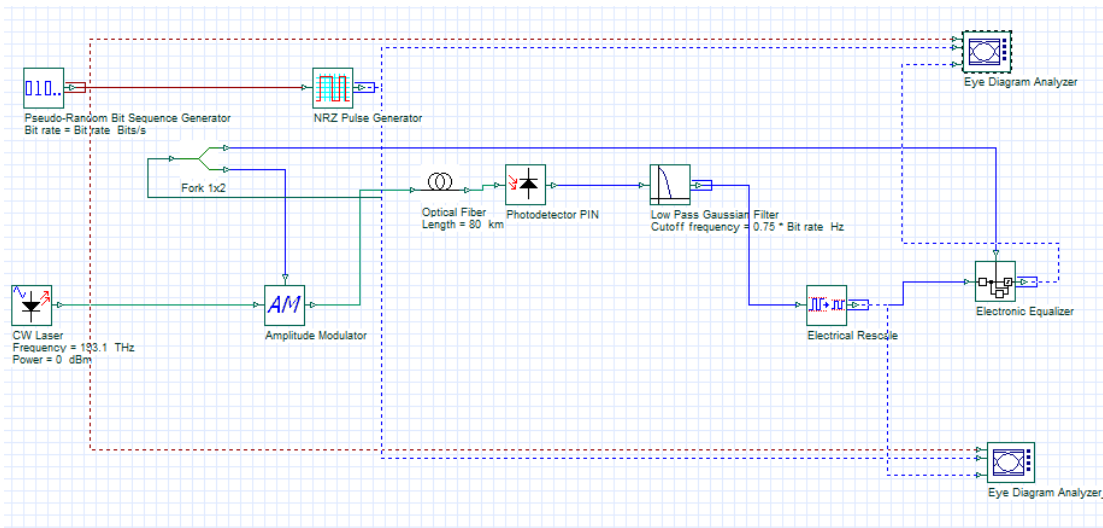
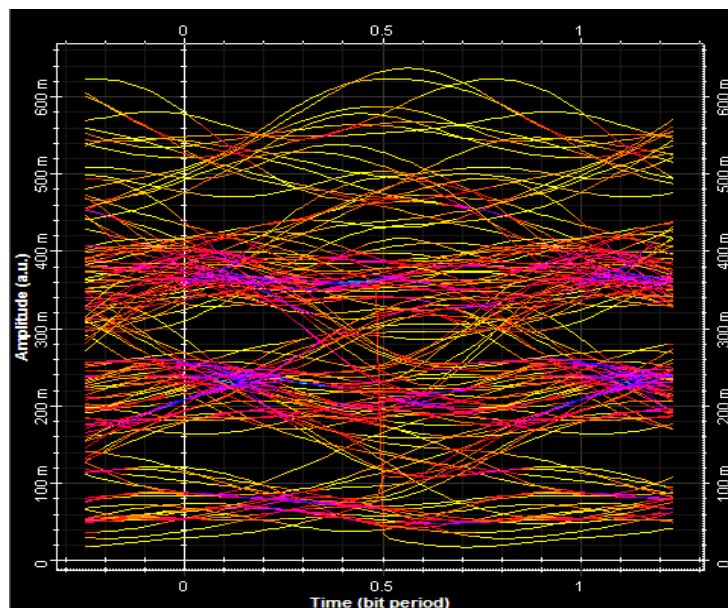


Figure III.49: Compensation GVD



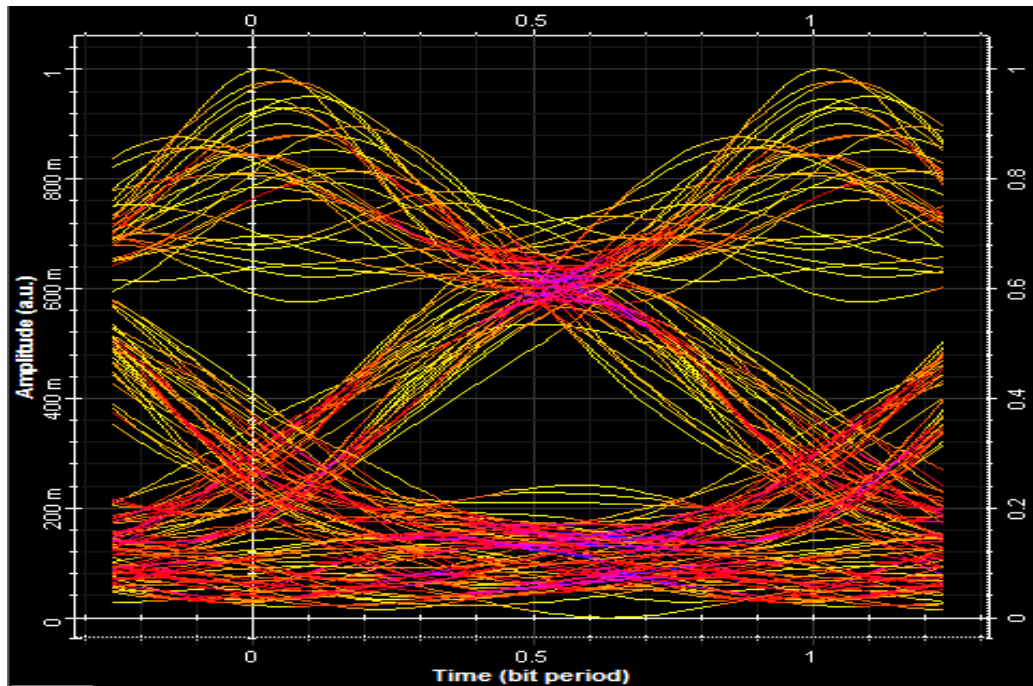


Figure III.50 : Diagramme d'œil avant et après l'égaliseur.

Dans le système optique, l'utilisation de la compensation de dispersion électronique (EDC) est une méthode efficace pour éliminer la dispersion. L'égaliseur électronique améliorera la qualité du système et réduira le taux d'erreur binaire dans le système.

La compensation de dispersion électronique (EDC) est un moyen efficace de réduire la dispersion dans une liaison par fibre optique amélioré de manière flexible les performances du système.

III.11. Conclusion

Concevoir et améliorer de nouveaux systèmes de transmission optique plus performants que jamais est un problème qui devient de plus en plus difficile, en raison du grand nombre de paramètres qui influencent l'efficacité de la connexion.

L'objectif de ce chapitre était de présenter les résultats d'études de transmission basées sur la simulation en fibre optique SMF, ainsi que l'optimisation des chaînes de transmission haut débit à l'aide du logiciel optisysteme, qui permet une conceptualisation plus facile et des temps de simulation plus courts.

Notre travail s'est concentré sur les longueurs et vitesses de transmission ainsi que sur d'autres paramètres tels que compensation de la dispersion avec le composant de réseau de Bragg en fibre, compensation de la dispersion avec le composant de dispersion idéale, compensation de dispersion à l'aide de l'égalisation électronique, compensation de dispersion à l'aide de sous-systèmes, composants du système Lightwave. La bande passante selon chaque étude conduira à terme à des résultats permettant de vérifier les choix de technologies et de composants utilisés pour développer notre liaison fibre optique haut débit.

Conclusion Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans notre mémoire d'une étude la transmission dans une fibre monomode SMF, là où dans le premier chapitre, nous avons appris les unités de lignes de transmission les plus importantes, nous avons présenté leurs principales caractéristiques, et nous avons également appris que les fibres ont des qualités importantes en tant que moyen de transmission d'informations qui leur permettaient de prouver leur présence dans les réseaux de télécommunications. Certains défauts peuvent être corrigés (dispersion, atténuation, ...), C'est ce que nous avons présenté comme une description complète du programme de simulation Optiwave au deuxième chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de l'étude de transmission dans une fibre monomode (SMF) lorsque le logiciel de simulation OptiSystem a été utilisé pour étudier la transmission d'une fibre monomode (SMF), et cela, afin d'améliorer la capacité d'une liaison optique simple qui a été proposée précédemment.

Cependant, nous avons simulé un scénario de conception d'une liaison optique simple à haut débit, où le débit de transmission utilisé est de 10 Gbit/s. Dans cette partie, nous avons fait varier la portée de la fibre optique SMF afin d'obtenir une distance maximale qui peut acheminer les données avec un taux d'erreur binaire de $\sim 10^{-9}$ et un facteur de qualité de ~ 6 dB. Comme résultats, la distance maximale qui a été aboutie avec la présence de l'atténuation et de la dispersion chromatique du signal optique transmis et la longueur maximale de transmission pour RZ (cycle de service = 0,5) ~ 200 km, tandis que pour NRZ ~ 100 km. Le RZ est supérieur par rapport à NRZ conventionnel - format de modulation.

Par contre à 40 Gbit/s, les résultats indiquent que le régime post-indemnisation est supérieur au régime de pré-compensation dans les systèmes de dispersion indemnisés à 40 Go/s en SMF, en effet, l'amélioration de la portée maximale de la fibre optique SMF peut être réglée via l'insertion d'une fibre optique DCF et un amplificateur optique de ligne.

Nous avons optimisé la puissance de lancement et la longueur DCF afin de maximiser le facteur Q au récepteur par optimisation de la compensation de puissance et de dispersion pour la transmission RZ non Linéaire et aussi, nous avons démontré la possibilité de compensation de dispersion en utilisant le réseau de Bragg à fibre. Ce composant permet la conception des réseaux des fibres apodisées et de chirpées qui sont capables de fournir une compensation de dispersion.

Ce travail montre l'application du composant de réseau de Bragg uniforme à fibre dans OptiSystem en tant que filtre. Dans le premier temps, on utilise une source de lumière blanche, après une impulsion gaussienne est utilisée. La réflectivité étant liée au produit de la longueur de couplage et de la longueur des réseaux, ce balayage correspond au changement de la longueur de couplage et/ou de la longueur du réseau.

Pour un débit binaire de 40 Gb/s, dans le générateur d'impulsions optique gaussien, une impulsion initiale de 12,5 ps a été générée et propagée dans une SMF de 10 km.

En raison de la dispersion, la largeur d'impulsion augmente jusqu'à environ 50 ps. La dispersion accumulée après 10 km de propagation en SMF est de 160 ps/nm.

Examinons les formes d'onde du signal à l'entrée, et après le SMF. On peut observer qu'après la SMF les impulsions du signal sont atténuées, élargies d'un facteur 2 environ et qu'il y a des interférences inter-symboles importantes.

Afin d'accomplir une compensation de dispersion, on utilise d'un réseau de Bragg à fibres avec chirp linéaire (un pas variable linéairement) dans OptiSystem.

Par contre à l'aide de la péréquation électronique nous avons trouvé un moyen efficace de réduire la dispersion dans une liaison par fibre optique améliorer de manière flexible les performances du système. et dans le composants du système Lightwave, le canal linéaire a un filtre passe bas qui façonne l'impulsion. Le bruit du récepteur est proportionnel à la bande passante du récepteur et peut être réduit à l'aide d'un filtre passe bas dont la bande passante est inférieure à la vitesse du bit.

Avec composant de dispersion idéal, nous avons montré au cours de cette session comment utiliser un composant idéal dispersion compensation dans OptiSystem pour la compensation de dispersion enfin dans le systèmes d'indemnisation de dispersion – Une perspective de système, nous avons étudié comment les régimes de compensation de dispersion affectent les performances du système, l'effet d'élargissement des impulsions de la dispersion chromatique provoque le chevauchement des signaux dans les périodes de bits adjacentes, L'élargissement est fonction de la distance ainsi que du paramètre de dispersion D. Le paramètre de dispersion est donné en ps/nm/km et change de fibre en fibre.

C'est aussi une fonction de longueur d'onde. D est généralement d'environ 17 ps/nm/km dans la plage de longueur d'onde de 1,55 μm pour une fibre mono mode standard (SMF).

Au fur et à mesure que les réseaux optiques avancées, nous devons chercher d'autres techniques afin d'augmenter la capacité de transmission des fibres optiques, comme perspectives, nous allons suggérer de trouver des solutions optimales à la compensation et l'atténuation dans les fibres optiques.

Références Bibliographique

Références bibliographiques

- [1] Basel RIHAWI : « Analyse et réduction du power ratio des systèmes de radiocommunications multi-antennes » pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Rennes I Soutenu le 20 Mars 2008.
- [2] <https://www.maxicours.com/se/cours/chaine-de-transmission-d-informations---signaux-analogique-et-numerique/>
- [3] JOINDOT, Irene et Mechel, les télécommunication par fibre optique collection technique et scientifique des télécommunication , Paris : Dunod et CENT-ENST, 1996.
- [4] les technique de l'ingénieur, technique de l'ingénieur, paris , 1999 .
- [5] mémoire de fin d'étude, master 2, filaire génie électrique de thème <<simulation d'une fibre optique pour une transmission haute débit >>, 2015.
- [6] projet de fin cycle, thème <<Analyse numérique et étude spectrale de réseaux de Bragg a fibre : Compensation de la dispersion chromatique dans une ligne de transmission optique>>, université Blida 1, promotion 2019.
- [7] Experide, " Guide de la fibre optique-2001 ", édition 2008, 32 rue de l'Avenir 69740 Genas - FRANCE, Vol.45. <http://www.experide-consulting.com>.
- [8] <http://physique.unice.fr/sem6/2006-2007/PagesWeb/Telecom/liens.html>
- [9] <https://t-p-e-la-fibre-optique.webnode.fr/nos-travaux/caracteristiques-de-la-fibre/les-inconvenients/>
- [10] <https://sites.google.com/site/dcsprojectcognizats/dispersion-management-using-dispersion-compensation-fiber>
- [11] Julien MAURY, « Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, novembre 2003.
- [12] <https://community.fs.com/blog/types-of-optical-fiber-dispersion-and-compensation-strategies.html>
- [13]. https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating
- [14] https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Bragg_Gratings_A_Versatile_Approach_to/a19690
- [15] <https://www.teraxion.com/fr/entreprise/reseauxdebragg/>
- [16] <https://www.eecg.utoronto.ca/~tcc/edc.htm>
- [17] Andrew C. Singer, Naresh R. Shanbhag, and Hyeon-Min Bae « Electronic Dispersion Compensation [An overview of optical communications systems] IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE NOVEMBER 2008
- [18] 12H.Billami 8R : Bendahmane, «étude d'un reseau optique ADM 10 Gbit/s », PFE pour obtenir de diplôme de master, universite Abou Bekar Belkaid, Telemcen, juin 2013.
- [19] Jean-Louis VERNEUIL « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », thèse doctorat UNIVERSITE DE LIMOGES 2003.
- [20] H. Takara, S. Kawanishi, M. Saruwatari, «Optical signal eye diagram measurement with subpicosecond resolution using optical sampling», Electronics Letters, 32 (15), p 1399 -1400, 1996.
- [21] CHIALI Imane, Etude d'une transmission d'un signal modulé directement par une source optique laser à un débit de 10 Gbit/s, Mémoire de Master en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2013.

- [22] Adardour Haroun Errachid, " étude et évaluation des performances d'un système WDM pour la télécommunication optique haute débit " PFE université de TLEMCEM 2012.
- [23] Sondes KHAMIR, " Génération d'impulsion optiques brèves 40 GHz par mélange a quatre ondes ", PFE, Ecole Supérieur des Communications de Tunis, 2005.
- [24] Alcatel, " introduction to WDM ", Copyright ©Alcatel University, édition 2003, ISBN 8AS902000667VHZZA ED.02.
- [25] Peng Xia,ZHANG Li-Hua,Yao Lin,"Simulation Study of Dispersion Compensation in OpticalCommunication Systems Based on Optisystem",IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1187 (2019) 042011.
- [26] Laurent COLOMER, «Les mesures de dispersion chromatique (DC)», Conférences Opto 2005.
- [27] S. Y. Park et coll. «Longueur de fibre dopée et puissance de pompe des EDFA à gain aplati», Elect. Lett. 32, 2161 (1996).
- [28] Priyanka Sharma and Himali Sarangal," Simulation and Analysis of Filters Using Different Photodiode and Wavelength in Free Space Optics", Asian Journal of Computer Science and Technology,ISSN: 2249-0701 Vol. 5 No. 1, 2016, pp.25-29
- [29] https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_attenuator
- [30] G. P. Agrawal, Systèmes de communication par fibre optique, Wiley-Interscience, 1997.
- [31] R. Ramaswami et K. N. Sivarajan, Réseaux optiques: une perspective pratique, Morgan Kaufmann, 1998.
- [32] M. I. Hayee et A. E. Willner, «Pré- et post-compensation de la dispersion et des non-linéarités dans les systèmes WDM 10 Gb / s», IEEE Photon. Technologie. Lett. 9, pages 1271, 1997.
- [33] C. Furst, et al., «RZ verses NRZ coding for 10Gbit / s amplificateur free transmission», LEOS 1999 1, MJ1-82 (1999).
- [34] G. Mohs, et al., «Avantages de la RZ non linéaire par rapport à la NRZ sur les liaisons à une travée 10 Gb / s», OFC 2000, FC2-35 (2000).
- [35] S.Chuang, Physique des dispositifs optoélectroniques, Série Wiley en optique pure et appliquée, 1995
- [36] G.P. Agrawal, «Systèmes de communication par fibre optique», Wiley Inter-Science, 2002.
- [37] M. OUADAH, «Etude des Fibres Microstructurées Compensatrices de Dispersion Chromatique», Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen - Faculté de TECHNOLOGIE, 2017.