

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJIMOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2017

Faculté: Sciences de l'Ingénierat

Département: Electronique

DWDM

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé :

**ETUDE ET SIMULATION D'UN SYSTEME DE
TELECOMMUNICATION
U-DWDM A 32 CANAUX EMIS PAR CONTINUUM A SIMILARITON
OPTIQUE**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : ELECTRONIQUE

Spécialité: Télécommunication Avancées

Par :

SAOUCHI MOHAMED OKBA

DEVANT Le JURY

Président : BOUGHAZI MOHAMED Professeur U.B.M Annaba Encadreur :

TOUMI SALAH

Professeur U.B.M Annaba

Examineur: HAFS TOUFIK

Assistant

U.B.M Annaba

Dédicace

Je dédie ce modeste travail.....

A mon père

A toute ma grande famille

A tous mes frères

A tous mes amies

A tous mes proches

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près
durant les moments difficiles

Remerciements:

Je veux tout d'abord remercier Allah de nous avoir donné force, santé, courage et volonté pour accomplir ce travail.

Je profite de cette occasion pour remercier tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce projet dans les meilleures conditions.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements en premier lieu à mon encadreur, Monsieur Toumi Salah pour m'avoir apporté son aide et ses conseils judicieux.

Je remercie aussi tous les professeurs qui m'ont apporté leurs connaissances tout au long de l'année

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Resumé.

Pour remplacer les diodes laser utilisées fréquemment dans le système WDM limité en portée maximale à 120 km de longueur de fibre optique transportant 32 canaux à 10 Gb/s, dans ce mémoire, on étudie et simule un système de télécommunication U-DWDM à 32 canaux émis par un continuum à similariton optique. Pour cela, la combinaison des paramètres de chirp positif initial de l'impulsion picoseconde se propageant dans une fibre optique à haute non linéarité et à faible dispersion normale génère une source continuum à équi-amplitude spectrale. Cette source de continuum est définie sur la bande C de la fenêtre de Télécommunication optique. Après le découpage spectral par un démultiplexeur optique, le continuum obtenu permet de générer 32 canaux espacés de 0.2 nm et tous centrés sur 1550 nm. Chaque canal étant un train d'impulsions gaussiennes ayant la même fréquence de répétition que la Source initiale et est apte à être modulé avec une fréquence de modulation égale à 10 GHz pour atteindre un débit de transfert de données de 10 Gb / s. Le format de modulation RZ-OOK a été utilisé pour le codage des canaux. Dans ce contexte, la capacité de transfert des données de la chaîne de transmission du système de Télécommunication U-DWDM est de 320 Gb/ s. Pour une portée de 5000 km de longueur de fibre optique un coefficient de qualité égale à 14 est obtenu.

Summary.

To replace the frequently used laser diodes in the limited range WDM system to 120 km fiber optic length carrying 32 channels at 10 Gb / s, in this memory, a 32-channel U-DWDM telecommunications system is being studied and simulated. Emitted by an optical similarity continuum. For this purpose, the combination of the initial positive chirp parameters of the picosecond pulse propagating in a high-non-linearity and low-dispersion normal optical fiber generates a continuum source with spectral equi-amplitude. This continuum source is defined on the band C of the optical telecommunication window. After the spectral division by an optical demultiplexer, the resulting continuum makes it possible to generate 32 channels spaced 0.2 nm apart and all centered on 1550 nm. Each channel is a train of Gaussian pulses having the same repetition frequency as the original source and is capable of being modulated with a modulation frequency equal to 10 GHz to achieve a data transfer rate of 10 Gb / s. The RZ-OOK modulation format was used for channel coding. In this context, the transmission capacity of the transmission chain of the U-DWDM telecommunication system is 320 Gb / s. For a range of 5000 km of fiber optic length a quality coefficient of 14 is obtained.

موجز.

10 إلى قناة 32 يحمل الضوئية الألياف طول كم 120 مدى أقصى محدود WDM نظام في استخدام الليزر الثنائيات لاستبدال البصرية متصلة سلسلة من المنبعثة قناة U-DWDM 32 الاتصالات نظام ويحاكي ودراسة المواصفات، هذه في ثانية، / جيجابت والألياف الخطي غير ارتفاع في ثانية بيكو نبض التكاثف من الأولية الإيجابية غرد المعلمات بين الجمع فإن لهذا، similariton. نافذة الفرقة C على متصلة المصدر هذا ويعرف. السعة متساوية طيفيا متصلة مصدر يولد الطبيعي التشتت المنخفضة البصرية نانومتر، 0.2 متباعدة قنوات 32 توليد إلى أدى مما التواصل بصري، demultiplexer على قطع طيفية بعد. للاتصالات البصرية لتكون وتكييفها أولي كمصدر تكرر التردد نفس مع جاوس البقول من القطر كونها قناة كل. نانومتر 1550 على تركزت وجميع RZ-OOK تعديل شكل استخدام تم. ثانية / جيجابت 10 البيانات نقل معدل لتحقيق غيغاهرتز 10 يساوي التردد تضمين مع التضمين U-DWDM 320 نظام اللاسلكية و السلكية الاتصالات البيانات نقل سلسلة نقل على والقدرة السياق، هذا في. الترميز لتوجيه. عليها الحصول تم 14 يساوي الجودة معامل الألياف طول بصري من كم 5000 من لمجموعة. ثانية / جيجابت

Table de matieres :

| | |
|---|-------|
| Introduction | 1 |
| Chapitre1 : Généralités sur les systèmes de transmission par fibre optique | |
| 1.Introduction..... | 2 |
| 2. Les techniques de transmission à très haut débit..... | 2 |
| 2.2 Description de la liaison optique..... | 4 |
| 2.3. Émetteur optique..... | 5 |
| 2.4. Le laser..... | 52.5. |
| Caractéristiques..... | 82.6. |
| La Modulation..... | 9 |
| 2.6.1. Modulation directe..... | 9 |
| 2.6 .2. Modulation externe..... | 10 |
| 2.6. 3. Le modulateur Mach-Zehnder (MZM) | 113. |
| Formats de modulation..... | 124. |
| Récepteur optique..... | 135. |
| Le canal de transmission (La fibre optique monomode conventionnel)..... | 14 |
| 6. Les fibres optiques microstructures..... | 247. |
| Critères d'évaluation d'une transmission..... | 26 |
| 8. Conclusion..... | 29 |
| CHAPITRE II :Génération de sources multi-longueurs d'ondes par Similaritons optiques | |
| I.INTRODUCTION..... | 30 |
| 2. Sources multi-longueurs d'ondes..... | 30 |
| 3. SIMILARITON OPTIQUE..... | 31 |

| | |
|--|----|
| 4. GENERATION DES SOURCES MULTILONGUEUR D'ONDE PAR LES SIMILARITONS..... | 33 |
|--|----|

| | |
|-------------------|----|
| 5.CONCLUSION..... | 34 |
|-------------------|----|

CHAPITRE III : SIMULATION D'UN SYSTEME DETELECOMMUNICATION

A 32 CANAUX

| | |
|---------------------|----|
| I.Introduction..... | 35 |
|---------------------|----|

| | |
|--|----|
| 2. Le modèle numérique de la propagation des impulsions dans la fibre optique..... | 35 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| 3. système U-DWDM (ultra-dense à multiplexage en longueurs d'onde) à 32 diodes laser..... | 36 |
|---|----|

| | |
|---------------------------------------|----|
| 4 .Continuum appliqué à l'U-DWDM..... | 39 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| 4.1 Génération de continuum par la formation de similaritons dans la PCF..... | 40 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| 4.2 Génération de source multi-longueurs d'ondes | 42 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 5. SIMULATION DE LA CHAÎNE DE TRANSMISSION DWDM..... | 43 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 5.1 Influence de la distance de propagation sur le coefficient de qualité Q..... | 46 |
|--|----|

| | |
|-------------------|----|
| 6.CONCLUSION..... | 46 |
|-------------------|----|

| | |
|---------------------------|----|
| -Conclusion générale..... | 48 |
|---------------------------|----|

| | |
|-----------------------------------|----|
| -Références bibliographiques..... | 50 |
|-----------------------------------|----|

Liste des figures :

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : système d'émission optique et de réception de la technique wdm.. | 4 |
| Figure 1.2: absorption(a), émission spontanée(b) et émission stimulée(c)..... | 6 |
| Figure 1.3 : condition de gain(a), condition de phase(b), spectre d'un laser Fabry –pérot(c)..... | 8 |
| Figure 1.4 : Schéma et principe de la modulation directe..... | 10 |
| Figure 1.5: Principe de la modulation externe..... | 11 |
| Figure 1.6: Schéma de principe d'un modulateur Mach-Zinder (à gauche) et sa fonction de transfert en intensité et en phase (à droite) en configuration « push-pull »..... | 12 |
| Figure 1.7: Format NRZ (a) et RZ (b)..... | 13 |
| Figure 1.8: Structure d'une fibre optique..... | 15 |
| Figure 1.9: Pertes linéiques (dB/Km) en fonction de la longueur d'onde pour une fibre standard (SMF) [24]..... | 16 |
| Figure 1.10: Impact de la dispersion chromatique sur un signal optique : (a) représentation spectral ; (b) représentation temporelle..... | 17 |
| Figure 1.11 : Courbe de dispersion de la fibre SMF..... | 18 |
| Figure 1.12: La compensation de la dispersion chromatique par une DCF..... | 19 |
| Figure 1.13: Effet de la PMD sur les impulsions courtes..... | 19 |
| Figure 1.14: Dépendance temporelle de l'intensité et la variation de la fréquence instantanée associée..... | 21 |

| | |
|---|----|
| Figure1.15: Génération de nouvelles longueurs d’ondes par mélange à quatre ondes..... | 22 |
| Figure1.16: Structure des fibres à cristaux photoniques..... | 24 |
| Figure1.17: Section transverse de la structure hexa (a) et le profil d’indice transverse (b)..... | 25 |
| Figure1.18: Paramètres fondamentaux d'un diagramme de l’œil d'un signal au format RZ..... | 27 |
| Figure1.19: Relation entre taux d’erreur binaire et facteur Q..... | 29 |
| Figure2.1: schéma de fonctionnement du super continuum pour générer un peigne de longueurs d’ondes..... | 31 |
| Figure2.2: Evolution similaritan [] temporelle dusimilariton..... | 32 |
| Figur2.3: Spectre du similaritan (bleu), spectre d’entrée (vert)[]..... | 33 |
| Figure2.4: découpage du spectre du similariton (bleu), spectre d’entrée (vert)..... | 34 |
| Figure3.1: Copie d’écran du logiciel de Simulation OptiSystem..... | 36 |
| Figure 3.2: montage simulé du système U-DWDM | 37 |
| Figure3.3: diagramme de l’œil :a) canal 1 à 120 km de distance, Q=2.39,TEB=0.006 b) canal 2 à 120 km de distance, Q=2.82,TEB=0.002 | 38 |
| Figure 3.4: (a) signal temporel émis au canal 1 à 10 Gb/s (b) signal temporel à la réception du canal 1 à 120 km de distance,..... | 39 |
| La Figure 3.5 : représente le montage simulé sous OptiSystem pour la génération du continuum..... | 40 |
| Figure 3.6 : train d’impulsions simularitons simulé | 41 |

| | |
|--|----|
| Figure 3.7 : spectre de l'impulsion similariton obtenue à la sortie de la fibre PCF | 41 |
| Figure 3.8: Génération de source multi-longueur d'onde et découpage spectrale du continuum par un démultiplexeur optique,..... | 42 |
| Figure 3.9 : Chaîne de transmission DWDM simulée..... | 44 |
| Figure 3.10 : représente le signal à l'entrée du canal 16..... | 44 |
| Figure 3.11: représente le signal à la sortie du canal 16 | 45 |
| Figure 3.12 : diagramme de l'œil pour le canal 16, $Q=9.44$, TEB= 1.75×10^{-21} | 45 |
| Figure 3.13 : courbe de variation du coefficient de qualité Q en fonction de la distance de propagation représente..... | 46 |

INTRODUCTION GENERALE

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes de transmission par fibre optique. Au début, on décrit brièvement les techniques de multiplexage actuellement utilisées pour augmenter la capacité totale d'information transmise dans la fibre optique ; puis on présente les principaux composants optiques et optoélectroniques constituant la liaison optique et on décrit un nouveau type de fibre optique qui est la fibre à cristaux photoniques.. Les critères qualité pour évaluer les performances d'une transmission sont également présentés.

Le deuxième chapitre décrit le principe d'un nouveau type d'impulsion appelé similariton dont la largeur spectrale permettant d'engendrer des longueurs d'ondes multiples

Dans le troisième chapitre on traite la simulation d'un système de télécommunication U-DWDM à 32 canaux où on remplace les diodes laser utilisées classiquement dans un système U-DWDM par de multiples longueurs d'ondes obtenus par multiplexage d'un continuum à similariton

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de transmission par fibre optique.

Ce chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes de transmission par fibre optique afin de faciliter la lecture des travaux de thèse présentés dans les autres chapitres. Une première partie on décrit brièvement les techniques de multiplexage actuellement utilisées pour augmenter la capacité totale d'information transmise dans la fibre optique. Dans une deuxième partie sera présentée les principaux composants optiques et optoélectroniques constituant la liaison optique et on décrit un nouveau type de fibre optique qui est la fibre à cristaux photoniques. Les critères pour évaluer la qualité d'une transmission sont également présentés.

1. Introduction

Les systèmes de transmission par fibres optiques peuvent être trouvés dans tous les niveaux du réseau: réseau de cœur, Wide Area Network (WAN), Metro Area Network (MAN), réseau local (LAN) et le réseau d'accès. Les liens de fibre longue courrier. (milliers de kilomètres) tels que les câbles sous-marins constituent l'épine dorsale ou le noyau d'un réseau de télécommunication. Un WAN est généralement constitué de liaisons de communication couvrant une vaste région, comme un pays. Un MAN est optimisée pour une zone géographique allant de plusieurs blocs de bâtiments à des villes entières. Un réseau local est un réseau couvrant une zone plus petite, comme un campus ou un bâtiment. Leurs architectures sont cependant basées sur le modèle, de la liaison dite « multipoints à multipoints » ou encore « point à point »

2. Les techniques de transmission à très haut débit

La bande passante des fibres optiques permet théoriquement l'établissement de systèmes de transmission à des débits très élevés. Cependant, le traitement électronique des

données, à l'émission et à la réception, impose des limitations en termes de débit, dues aux composants électroniques dont la bande passante reste bien en deçà de celle accessible par l'optique.

L'augmentation du nombre d'utilisateurs et de la quantité d'informations échangées dans les réseaux de communication a poussé au développement de solutions pour augmenter la capacité des réseaux, et profiter de l'avantage en bande passante qu'offre la fibre optique. Des techniques de multiplexage ont ainsi été développées, chacune permettant de transmettre N signaux de débit D sur le même canal, ce qui équivaut à la transmission d'un signal global de débit $N \times D$. Ces techniques de multiplexage doivent néanmoins respecter la condition nécessaire de pouvoir restituer les données propres à chaque utilisateur après leur transmission sans créer d'interférences entre les données des différents utilisateurs. Dans ce qui suit, nous présentons la technique principale de multiplexage optique utilisé.

2.1 La technique WDM : Wavelength Division Multiple multiplexing

Développés dans les années 1980, les systèmes de multiplexage en longueurs d'onde, WDM constituent en optique, l'équivalent des systèmes de multiplexage par répartition de fréquence ou FMA dans le domaine des radiofréquences.

Dans cette technique WDM, le multiplexage se fait en longueurs d'ondes, chaque utilisateur émet sur une longueur d'onde différente. La technique WDM permet l'utilisation optimale de la bande passante optique (~25 THz).

A chaque utilisateur, une longueur d'onde spécifique, qui distingue les données le concernant est attribuée. La figure I.1 présente le système d'émission - réception de la technique WDM.

Les données émises par les sources optiques sont appliquées à l'entrée de modulateurs optiques émettant à des longueurs d'ondes différentes. Les signaux en sortie des modulateurs sont multiplexés et transmis simultanément sur la même fibre optique comme illustré figure I.2. Le débit total de la fibre optique est la somme des débits de tous les utilisateurs.

A la réception, le signal optique reçu est démultiplexé puis appliqué à l'entrée d'un filtre optique qui permet d'extraire le signal à la longueur d'onde correspondant au destinataire. La conversion optique-électrique est assurée par une photodiode.

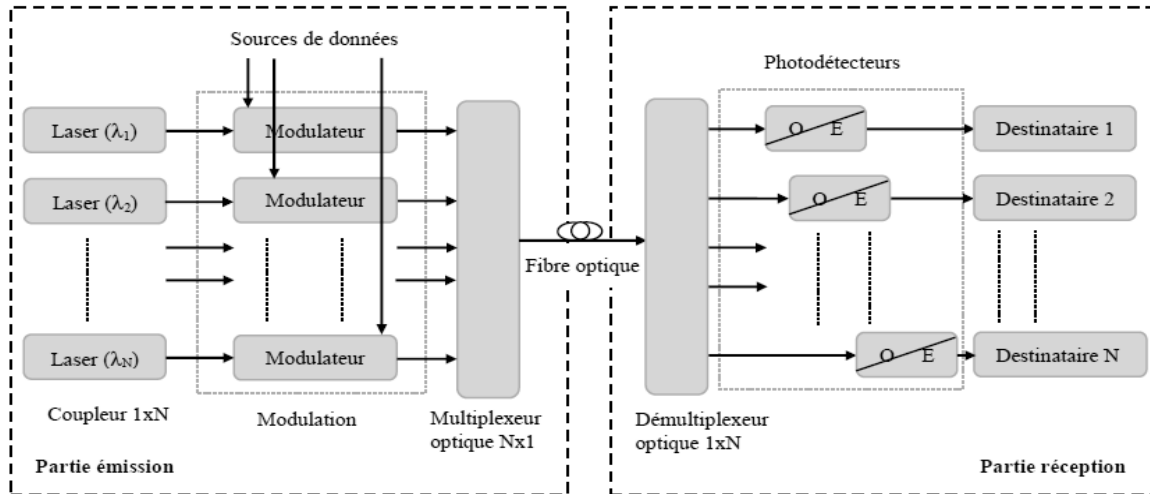


Figure I.1 : Système d'émission optique et de réception de la technique WDM1

Beaucoup de techniques d'extraction de longueur d'onde ont été développées dans ce sens. Nous citons principalement, les réseaux de coupleur 3 dB associés à des filtres Fabry-Perrot [1], les réseaux de Bragg sur fibres [2].

L'union internationale de Télécommunications, ITU-T G 692 (Interfaces optiques pour systèmes multi-canaux avec amplificateurs optiques) [3] a défini une grille pour les longueurs d'ondes utilisées dans la fenêtre allant de 1530 nm à 1565 nm (appelée bande C). Dans cette fenêtre, les systèmes comportent aujourd'hui 8, 16, 32, 80 voire 150 canaux optiques, ce qui permet d'atteindre un débit respectivement de 20, 40, 80, 200 voire 400 Gb/s en prenant un débit nominal de 2.5 Gb/s avec des espacements respectifs entre canaux de 3,2 ; 1,6 ; 0,8 ; 0,4 voire 0,25 nm.

La technologie WDM est dite dense (DWDM pour Dense WDM) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 100 GHz. On parle des systèmes U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing) lorsque l'espacement utilisé est à 50 GHz (0,4 nm) et à 25 GHz (0,2 nm).

2.2 Description de la liaison optique

Le principe d'une liaison repose sur le principe de faire circuler une information entre un émetteur et un récepteur en réduisant au maximum les risques de déformation du signal réceptionné, afin d'assurer le bon transfert de l'information. La Figure I.1 montre le schéma de principe d'une liaison par fibres optiques, ou système de transmission optique « point à point ». Tous les systèmes se composent d'un bloc émetteur, d'une série de tronçons de fibres optiques séparés par des régénérateurs, et d'un bloc récepteur [4]. Le rôle d'un tel système est tout d'abord, au niveau de l'émetteur, d'émettre un signal optique et de

le moduler en fonction des données binaires et du format choisi. Ensuite, il a bien sûr pour autre objectif de faire propager ce signal optique sur une distance donnée, par le biais d'une ligne optique formée de fibres optiques et des régénérateurs, de telle sorte que le signal soit le moins affecté possible par les différents effets de propagation auxquels il est confronté. Enfin, au niveau du récepteur, ce signal optique est détecté après la transmission pour être reconverti en signal binaire électrique.

2.3. Émetteur optique

Dans un système de transmission optique, un émetteur a deux fonctions primordiales : la génération d'un signal optique et la modulation de ce signal par l'information à émettre.

Dans la plupart des systèmes, l'émetteur est tout d'abord constitué d'un laser (généralement une diode laser) émettant en continu à une certaine longueur d'onde et à une certaine puissance. La puissance d'un signal lumineux s'exprime en mW, mais dans l'usage elle sera la plupart du temps exprimée en décibels-milliwatts (dBm), échelle en décibels dotée d'une référence absolue à 1 mW.

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{mW}}{1mW} \right) \quad (I.1)$$

2.4. Le laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, le choix des sources optiques s'est porté sur les lasers à semi-conducteur (Fabry-Pérot), grâce à leurs petites dimensions, à la facilité de moduler directement la lumière émise en agissant directement sur le courant, à leur spectre optique relativement étroit et à leur faible consommation énergétique. Un laser est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée. Dans un semi-conducteur, un électron peut passer d'un état à un autre de trois manières différentes [5]:

- **L'absorption** (Figure I.2.a): en absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé (électron dans la bande de conduction et trou dans la bande de valence).

- **L'émission spontanée** (Figure I.2.b): de sa propre initiative, l'électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant un photon spontané.

- **L'émission stimulée** (Figure I.2.c): stimulé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, la même état de polarisation et la même directivité que le photon incident. L'émission stimulée introduit la

notion de gain ou d'amplification du rayonnement incident puisque, à partir d'un photon, on en obtient deux.

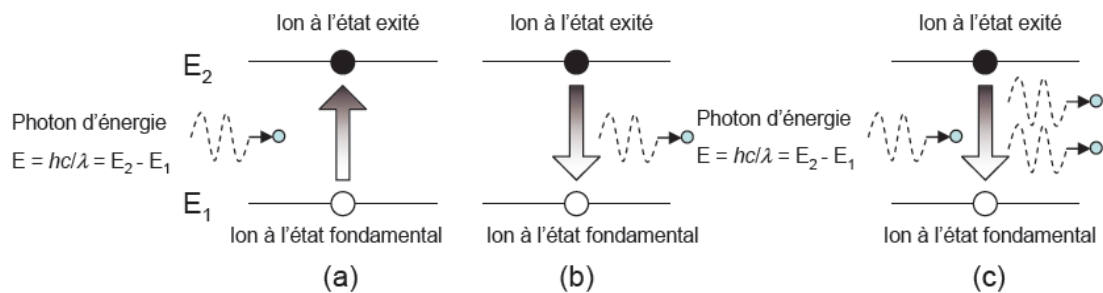


Figure 1.2: Absorption(a), émission spontanée(b) et émission stimulée(c).

Pour obtenir l'effet laser et donc rendre l'émission stimulée prépondérante, deux conditions doivent être réalisées :

- Il faut qu'il y ait suffisamment d'électrons dans l'état d'énergie supérieure. Lorsque ceci a lieu, on obtient une inversion de population. Dans un semi-conducteur, cette inversion est réalisée par l'opération de pompage électrique qui consiste à fournir de l'énergie aux électrons afin qu'ils passent dans la bande de conduction : c'est ce qu'on appelle une inversion de population.

- Il faut favoriser l'émission stimulée : Il faut qu'il y ait suffisamment de photons excitateurs. Pour cela, on oblige l'énergie lumineuse à s'accumuler dans un volume limité telle qu'une cavité résonante de type Fabry-Perot par exemple .

Un laser peut donc être vu comme un oscillateur. Tout oscillateur peut être présenté selon la sémantique propre à l'automatique comme un circuit bouclé composé d'un amplificateur et d'un filtre sélectif.

Les conditions d'oscillation, c'est à dire les conditions d'émission du laser, sont de deux natures:

- la condition de gain nécessite que le gain total de la boucle soit supérieur ou égal à 1 ($g \geq 1$).
- la condition de phase qui met en jeu la propagation des photons émis à travers la cavité, implique que seules certaines fréquences (longueurs d'ondes) pourront être émises.

Considérons une cavité Fabry Pérot, dont les deux miroirs sont identiques (ayant le même coefficient de réflexion). Au seuil du laser, l'onde lumineuse se retrouve identique à elle-même, c'est à dire que son changement d'amplitude est égal à 1, d'où la relation :

$$R e^{-i2L\beta} e^{gL} e^{-\alpha_i L} = 1 \quad (\text{I.2})$$

- R est le coefficient de réflexion de l'onde sur les miroirs de la cavité.
- L est la longueur de la cavité.
- β est la constante de propagation de l'onde.
- g est le coefficient de gain (= gain en intensité / unité de longueur).
- α_i est le coefficient d'absorption des photons à l'intérieur de la cavité.

La séparation des parties réelles et imaginaires de la relation (I.2), mène aux deux relations (I.3) et (I.4) :

$$g = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) = \alpha_i + \alpha_m \quad (\text{I.3})$$

Où α_m désigne les pertes résonantes (pertes par les facettes).

Et

$$\lambda = \frac{2nL}{m} \quad (\text{I.4})$$

- λ est la longueur d'onde d'émission laser.
- n est l'indice de réfraction réel du matériau.
- m est un entier naturel non nul.

La relation (1.3), montre qu'au seuil, le gain compense les pertes.

La relation (1.4), traduit la condition de phase dans un laser : les seules longueurs d'ondes susceptibles d'osciller dans la cavité sont celles qui satisfont cette relation.

Comme il a été précisé précédemment, le laser doit remplir simultanément les conditions de gain et de phase afin de pouvoir fonctionner. Le spectre optique sera donc la condition de gain (Figure 1.3.a), modulée par le peigne Fabry-Perot (Figure 1.3.b), l'ensemble étant inévitablement amplifié par le phénomène d'émission stimulée. Ce qui donne le spectre d'émission de la Figure 1.3.c.

D'après la Figure 1.3.c, on peut dire que la cavité joue le rôle d'un filtre en longueur d'onde, ce qui veut dire que l'onde n'est amplifiée qu'à certaines valeurs de fréquences précises.

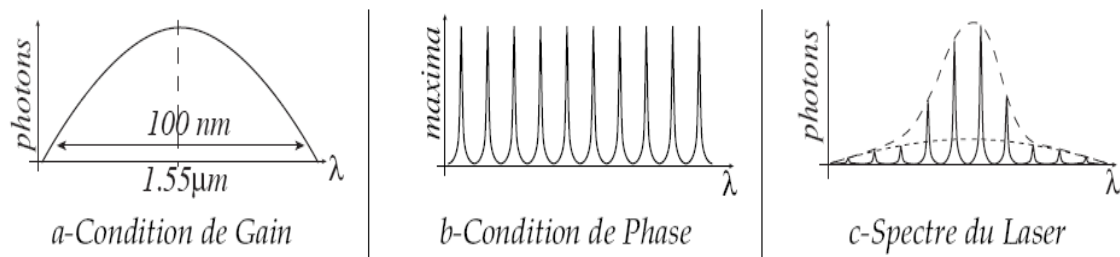


Figure 1.3: Condition de Gain (a), condition de phase (b) et spectre d'un Laser Fabry-Perot (c)

2.5. Caractéristiques

a- Courant de seuil

Le courant de seuil marque la séparation entre un fonctionnement dominé par l'émission spontanée et un fonctionnement dominé par l'émission stimulée. La puissance émise par le laser se calcule alors de la façon suivante [6] :

$$P = \eta(I - I_S) \quad \text{pour } I > I_S \quad \text{et } P = 0 \quad \text{pour } I < I_S \quad (I.5)$$

Où I : courant injecté au laser ; I_S : courant de seuil du laser ; et η : rendement du laser (égal à la pente de la zone émission stimulée de la Figure I- 4).

Mais dans une diode laser le courant seuil est perturbé par la température.

b- Longueur d'onde centrale d'émission laser (λ_c)

L'échauffement de la jonction de la diode laser conduit à une dérive de la longueur d'onde centrale λ_c vers les longueurs d'ondes plus élevées avec une dérive moyenne de 5 pm/mA les défauts provoquant des échauffements peuvent faire varier la valeur de λ_c par tracking, lors d'une élévation de la température de jonction moyenne, autour de $50 \text{ pm/}^\circ\text{C}$ [6]

c. Le régime transitoire

Dans les systèmes de télécommunications numériques par fibre optique, la modulation est constituée de signaux binaires pour lesquels la puissance optique, et donc le courant de polarisation, doivent commuter brusquement entre un niveau bas et un niveau haut.

Lorsqu'un laser à semi-conducteur est soumis à un échelon de courant, l'émission de la lumière suit l'envoi du courant avec un retard qui peut aller jusqu'à quelques nanosecondes. La réponse du laser à un échelon de courant n'est pas instantanée. Ce retard est suivi des oscillations de relaxation. La durée d'oscillations est d'autant plus longue et néfaste si le courant est faible et proche du seuil. Ceci limite donc le débit [6].

d- Le bruit des lasers

Un laser à semi-conducteur constitue un générateur de fréquences optiques particulièrement imparfait et affecté par des bruits d'amplitude et des bruits de fréquence.

Ces fluctuations imposent une limite ultime aux performances de n'importe quel système optique de communications. Ce bruit est provoqué par l'émission spontanée dans la diode laser.

2.6. La Modulation

La modulation est le procédé qui permet au laser de transmettre de l'information dans une fibre optique en faisant varier certaines caractéristiques du signal lumineux mis en particulier son amplitude sa fréquence ou sa phase. La fréquence de modulation détermine le débit de données qui peut être transmis. On parle de modulation directe ou externe selon que le laser lui-même ou un composant extérieur « modulateur » fait varier le signal.

2.6.1. Modulation directe

C'est la méthode de modulation la plus simple : elle consiste à moduler directement le courant de pompe de la diode laser, ce qui va se répercuter sur la puissance du signal lumineux émis (Figure I.8). Mais une telle modulation du courant de pompe induit aussi un chirp du signal [7], c'est-à-dire une modulation parasite de la phase du signal optique en fonction de la puissance du signal de pompe. Formellement le chirp, noté C , relie la phase et la puissance du signal par la relation :

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{C}{2} \left[\frac{d \ln P(t)}{dt} + k_0 P(t) \right] \quad (\text{I.9})$$

Pour laquelle on a choisi la convention pour la phase: $e^{i(\omega t - \beta z + \varphi)}$. Le premier terme est appelé : modulation de fréquence dynamique ou chirp transitoire et le second : modulation de fréquence adiabatique ou chirp adiabatique. Pour des fréquences de modulation élevées (ce qui est le cas pour les systèmes que nous considérons) le chirp transitoire est prépondérant devant le chirp adiabatique et l'équation I.9 se ramène donc à :

$$d\varphi = \frac{C}{2} d[\ln(P)] \quad (\text{I.10})$$

Qui lie la dérivée temporelle de la phase à celle de la puissance du signal. Le chirp est un élément à prendre en compte puisqu'il influe sur l'évolution des impulsions soumises à la dispersion chromatique des fibres .

Combiné à la dispersion chromatique des fibres, le chirp peut entraîner un élargissement temporel des impulsions. Il serait alors responsable d'un recouvrement des signaux et de

dégradations importantes des performances du système de télécommunications si les impulsions étaient peu larges, donc si le débit des informations était élevé.

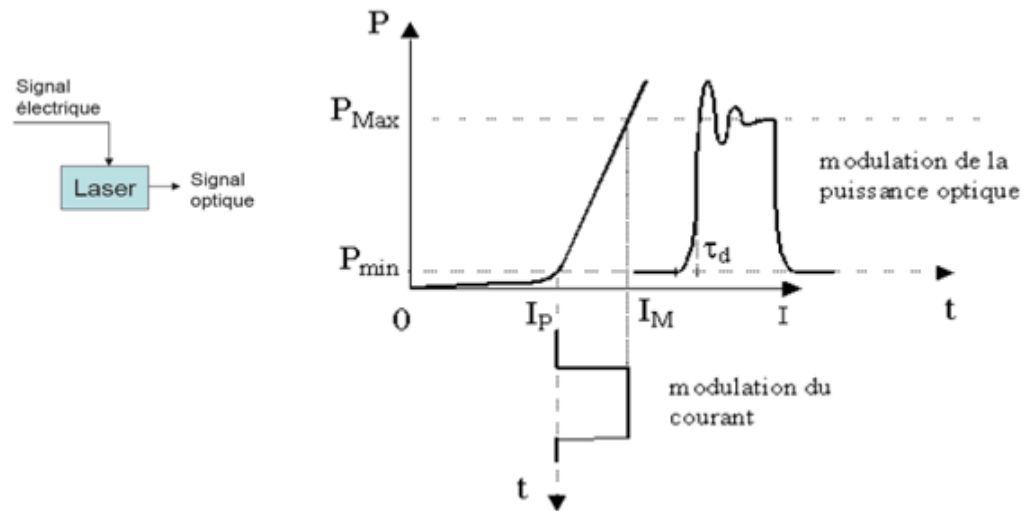


Figure 1.4: Schéma et principe de la modulation directe.

2.6..2 Modulation externe

Les propriétés des diodes lasers vues précédemment font que la modulation directe est satisfaisante jusqu'à 5 GHz environ mais qu'au delà, cette méthode n'est plus applicable. Trop de dégradations (oscillations de relaxation, chirp, bruit, ...) apparaissent et limitent les capacités de transmission. De plus, la modulation directe ne permet que d'effectuer une modulation du signal optique via son intensité.

La modulation externe (Figure I.10) est une bonne alternative, le laser émettant dans ce cas un simple signal constant, tous les défauts dus à la modulation du courant de polarisation seront éliminés. De plus, la bande passante des modulateurs externes est beaucoup plus élevée (80 GHz) que celle d'une modulation directe (5 GHz) qui est limitée par la fréquence de relaxation des diodes laser.

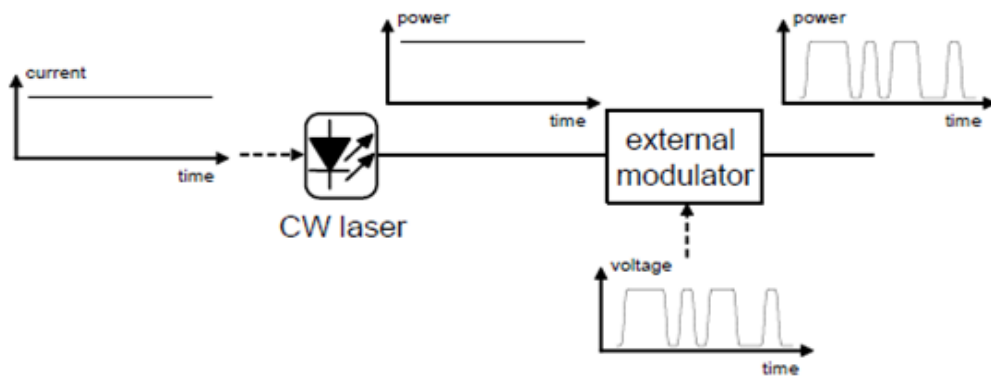


Figure 1.5 : Principe de la modulation externe

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

2.6.3. Le modulateur Mach-Zehnder (MZM)

Le modulateur Mach-Zehnder est un interféromètre à deux ondes, constitué de deux bras recevant chacun la moitié de la puissance lumineuse initiale. Au niveau de ses bras, un déphasage relatif entre les deux signaux est appliqué, au moyen d'une ou de deux cellules électro-optiques disposées chacune dans un bras. Ce déphasage est converti en variation d'intensité du signal optique par l'interférence entre les signaux déphasés issus des deux bras. La Figure 1.2. partie gauche, montre un schéma d'un MZM.

Le MZM est caractérisé par sa fonction de transfert décrite, dans sa forme idéale, par l'Équation [8].

$$E_s = E_e \cos\left(\pi \frac{V_1 - V_2}{2V_\pi}\right) \cdot e^{-i\left(\pi \frac{V_1 + V_2}{2V_\pi}\right)} \quad (I.11)$$

E_e représente le champ électrique du signal optique d'entrée, continu car provenant de la source laser. E_s représente le champ électrique du signal de sortie, susceptible de présenter une modulation d'amplitude ou de phase. V_1 et V_2 sont les tensions de commande des cellules électro-optiques, appliquées à chacun des bras du MZM.

Un MZM est caractérisé par sa tension V_π , qui représente la tension, ou le différentiel de tension, à appliquer sur le MZM pour obtenir un déphasage de π entre les deux bras. V_π vaut typiquement

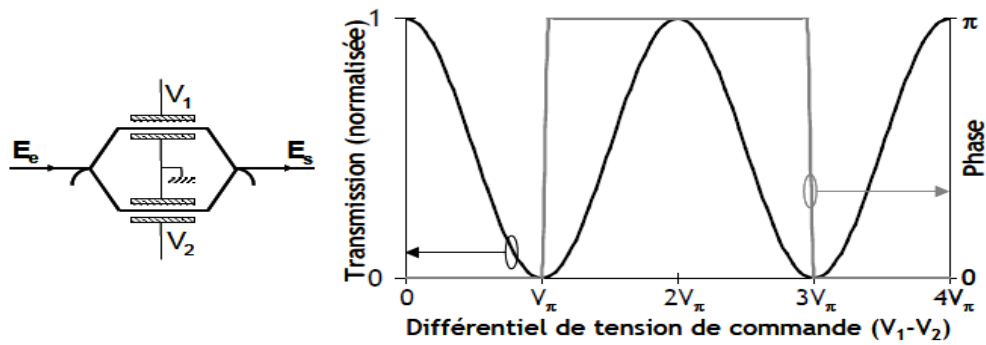


Figure 1.6: Schéma de principe d'un modulateur Mach-Zehnder (à gauche) et sa fonction de transfert en intensité et en phase (à droite) en configuration « push-pull »

Dans le cas général, cette fonction de transfert comporte un terme de phase. Ceterme peut être assimilé à du chirp. Toutefois, si l'on prend $V_1 = -V_2$ ce chirp est nul. On parle dans ce cas d'une configuration « push-pull », c'est-à-dire que l'on agit sur les deux bras du modulateur de façon opposée

3 Formats de modulation

Les systèmes de transmission par fibres optiques sont conçus pour faire propager par voie optique des données binaires « 0 » et « 1 ». Il convient donc de déterminer un code permettant de traduire ces signaux dans le domaine optique par une modulation adéquate d'un signal optique continu. Le code utilisé pour la traduction en optique des signaux binaires est appelé format de modulation.

La méthode de modulation la plus intuitive consiste à coder l'information de la manière suivante : « 0 » = pas de lumière transmise, ou à faible puissance et « 1 » = de la lumière transmise, à puissance plus forte. C'est le principe du codage en intensité, appelé OOK (pour On/Off Keying), et parfois ASK (Amplitude Shift Keying) ou IMDD (Intensity-Modulated Direct Detection)[9].

Lorsque les informations sont portées par la phase, nous parlons de la modulation de phase (PSK pour Phase-Shift Keying). La modulation de phase notamment le format DPSK (pour Differential Phase Shift Keying), connaît à l'heure actuelle un regain d'intérêt car elle permet de repousser les limites des performances très haut débit [10]. L'intérêt suscité pour ce type de format est cependant assez récent et n'a pas fait l'objet d'étude particulière pendant ces travaux.

Le codage OOK regroupe plusieurs formats de modulation, ayant tous en commun le codage de l'information binaire par le biais de l'intensité de l'onde lumineuse. La Figure

I.12 représente la forme temporelle des deux principaux formats de la modulation d'amplitude qui sont connus sous les noms NRZ (non retour à zéro) et RZ (retour à zéro).

Pour le format NRZ, l'amplitude du signal optique est maintenue pendant tout le temps bit, et ne retourne pas à zéro entre deux (ou plusieurs) bits «1» successifs. Le format RZ signifie cette fois-ci que l'amplitude n'est pas maintenue pendant tout le temps bit, et retourne à zéro avant que le temps bit se termine. L'avantage du format NRZ est sa largeur spectrale plus faible que celle du format RZ, puisque la transition d'amplitude apparaît moins fréquemment. Grâce à cette efficacité spectrale, le format NRZ est le plus utilisé dans les systèmes de transmission optique actuels.

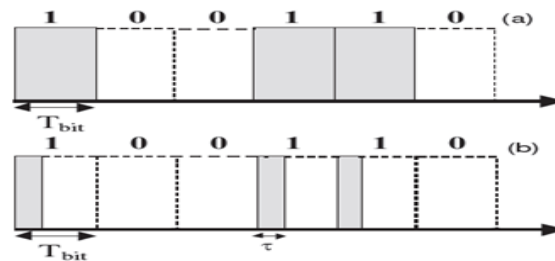


Figure 1.7: Format NRZ (a) et RZ (b)

. Les performances du format RZ en termes de sensibilité et de tolérance aux effets non-linéaires sont améliorées par rapport à celles du format NRZ[11].

4. Récepteur optique

La fonction d'un récepteur dans un système de transmission optique est de détecter et de démoduler un signal lumineux transmis sur une fibre.

La détection consiste à la conversion du signal optique en signal électrique. La démodulation est généralement accomplie ensuite par les techniques habituelles des systèmes de transmission électriques.

La détection est assurée par des photodiodes semi-conductrices qui fournissent un courant proportionnel à la puissance lumineuse moyenne interceptée ; cette moyenne (temporelle) étant prise sur un temps d'intégration caractéristique de la technologie de la diode et du circuit électrique dans lequel elle est montée. Les modulations d'amplitude ne seront donc détectées que si leur période est suffisamment grande par rapport au temps d'intégration[12].

3.1. Le photodétecteur

Le photodétecteur est un composant à base de matériaux semi-conducteurs absorbant plus ou moins le rayonnement incident. Sa structure lui permet de transférer efficacement l'énergie de photons incidents sur des électrons contenus dans le matériau. Ces électrons excités par le flux de photons sont alors plus ou moins libres de se déplacer dans la structure pour former un courant électrique.

Dans notre étude nous allons parler des photodétecteurs, les plus utilisés dans les systèmes de transmission par fibre optique qui sont les photodiodes PIN ou APD. La photodiode PIN (Positive Intrinsic Negative) polarisée en inverse, est réalisée à partir de trois couches de semi-conducteur. Les photodiodes PIN sont les plus utilisées car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante. Lorsque la puissance lumineuse reçue est très faible, les courants détectés sont peu élevés et se superposent au courant d'obscurité, conduisant à un mauvais rapport signal sur bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire que le courant détecté soit plus important en utilisant d'autres types de photodiode, comme les photodiodes à gain interne de type avalanche (APD).

Les photodiodes à avalanche sont aussi utilisées grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte [12].

3.2. Le bruit dans les photodétecteurs

Le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait. Le courant photodétecté est affecté par des bruits qui contribuent à dégrader les performances des systèmes de communication. Le bruit de grenaille (shot noise), le bruit d'obscurité et le bruit thermique sont les principaux bruits qui perturbent le signal électrique émis par le module de réception.

5. Le canal de transmission (La fibre optique monomode conventionnel)

Le signal optique modulé est acheminé par une fibre optique (le canal de transmission) jusqu'au récepteur. Dans sa configuration la plus simple, la fibre est constituée d'un cœur cylindrique de silice d'indice n_1 entouré par une gaine dont l'indice de réfraction n_2 est plus faible que celui du cœur. Un revêtement supplémentaire en polymère assure une protection à la fois mécanique et chimique à cette structure. Les couches sont des cylindres coaxiaux, représentés schématiquement sur la Figure I.18.

On distingue principalement deux catégories de fibres : à saut d'indice si le changement d'indice à l'interface entre cœur et gaine est brusque, ou à gradient d'indice si l'indice de réfraction décroît graduellement à l'intérieur du cœur.

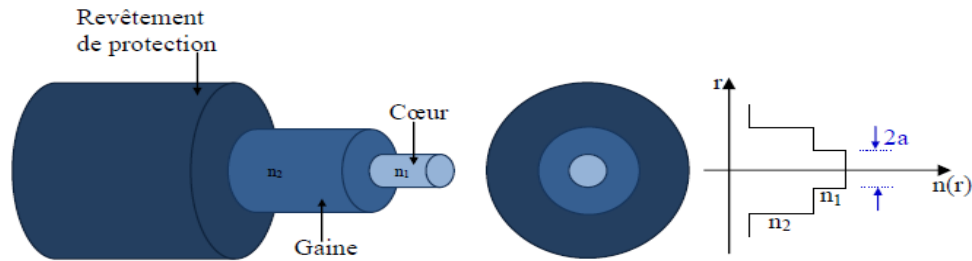


Figure 1.8 : Structure d'une fibre optique.

Suivant les applications envisagées, la taille du cœur va déterminer le comportement monomode (SMF) ou multimode (MMF) de la fibre. Pour un grand diamètre de cœur (de quelques dizaines de microns à $600\ \mu\text{m}$), la fibre est multimodale, ce qui a l'avantage de faciliter le couplage de la lumière dans le guide. Des fibres de petit diamètre de cœur (de 3 à $10\ \mu\text{m}$ environ) ne laissant propager qu'un seul mode ont été réalisées pour des applications aux télécommunications du fait de leur large bande passante. La fibre optique monomode classique $9/125\ \mu\text{m}$ présente des pertes très faibles à 1550nm , proches de $0,2\ \text{dB/km}$ [13], permettant des transmissions sans répéteurs sur des centaines de kilomètres, même si les effets de diffusion Rayleigh, de biréfringence ou de dispersion chromatique limitent ses performances.

4.1 Caractéristiques linéaires de la fibre optique

4.1.1. l'atténuation

Malgré les performances avérées des fibres optiques, les signaux qui les traversent subissent des atténuations lors de la propagation. Les différents types de pertes sont liés à la diffusion de Rayleigh, l'absorption, l'imperfection des connexions, la présence des courbures et micro-courbures à l'intérieur de la fibre. L'atténuation du signal dépend essentiellement de la nature de la fibre (monomode ou multimode).

La Figure I.19 suivante donne un exemple de l'évolution des atténuations de la fibre optique en fonction de la longueur d'onde.

Au cours de la propagation, la puissance $P(z)$ du signal optique décroît exponentiellement avec la distance (équation I.17). P_0 est la puissance à l'entrée de la fibre, $\alpha_{Km^{-1}}$ le coefficient d'atténuation en Km^{-1} et z la distance en Km :

$$P(z) = P_0 \cdot \exp(-\alpha_{Km^{-1}} \cdot z) \quad (I.17)$$

Il est commode d'exprimer α en dB/Km . α (dB/Km) est alors reliée au coefficient d'atténuation α (Km^{-1}) par l'équation I.18.

$$\alpha_{Km^{-1}} = \alpha_{dB/Km} \cdot \frac{\ln(10)}{10} \approx 0.23 \cdot \alpha_{dB/Km} \quad (I.18)$$

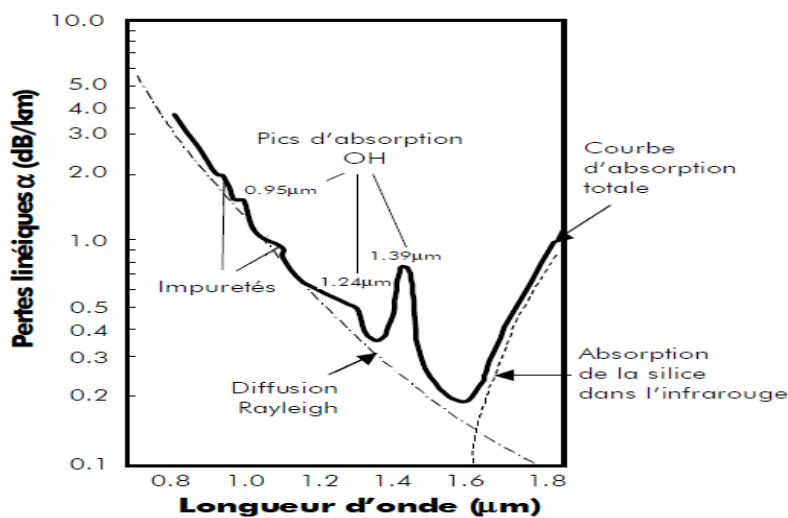


Figure 1.9 : Pertes linéiques (dB/Km) en fonction de la longueur d'onde pour une fibre standard (SMF)[13]

4.1.2 La dispersion chromatique

Dans une fibre monomode, la dispersion chromatique est un paramètre important puisqu'elle traduit la différence de vitesse de groupe entre différentes longueurs d'onde. Elle résulte de la variation de l'indice de réfraction $n(w)$ vu par l'onde en fonction de sa fréquence.

La dispersion chromatique (ou GVD pour Group Velocity Dispersion) introduit différents retards de propagation pour différentes composantes spectrales du signal, une impulsion peut donc s'élargir (Figure I.21). La GVD a deux origines dans la fibre : la dispersion due aux caractéristiques géométriques du guide d'onde et la dispersion due au matériau.

Pour déterminer la valeur de la dispersion, la constante de propagation β est développée en série de Taylor d'autour de la pulsation centrale w_0 de l'onde [13] :

$$\beta(\omega) = \beta_0 + (\omega - \omega_0)\beta_1 + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2\beta_2 + \frac{1}{6}(\omega - \omega_0)^3\beta_3 + \dots \quad (\text{I.19})$$

Ou

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (m = 1, 2, 3 \dots) \quad (\text{I.20})$$

Le paramètre β_1 est lié à la vitesse de groupe des ondes $\beta_1 = v_g^{-1}$ le paramètre β_2 est le coefficient de dispersion du deuxième ordre, et le paramètre β_3 le coefficient de dispersion du troisième ordre.

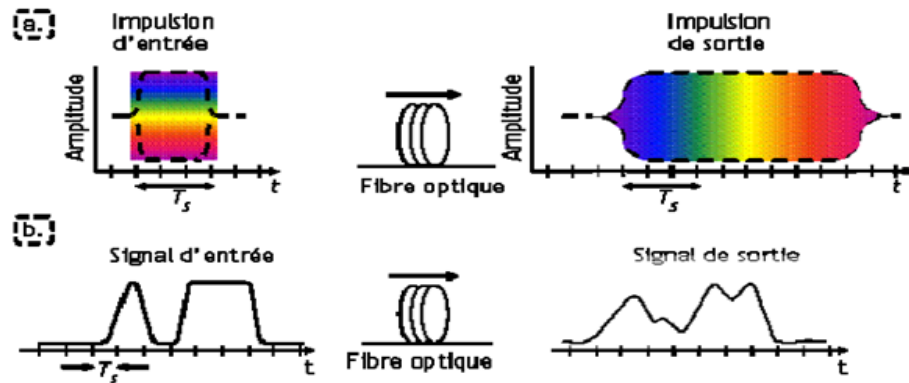


Figure 1.10 : Impact de la dispersion chromatique sur un signal optique :
(a) représentation spectrale ; (b) représentation temporelle.

Dans la pratique, il est commode d'utiliser un paramètre D qui exprime le retard de groupe (appelé dans la suite "dispersion" de la fibre) :

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (\text{I.21})$$

L'unité de la dispersion D est la ps/nm/km. Cela signifie que pour 1 km de propagation, deux longueurs d'onde écartées de 1 nm ont un écart temporel en picoseconde égal à D à la sortie.

La Figure I.21 illustre une courbe de dispersion de la fibre SMF. La dispersion est positive si $\lambda > 1310$ nm.

Dans la zone de dispersion positive $D > 0$ (ou dispersion anormale), une longueur d'onde λ_0 se propage plus vite qu'une longueur d'onde plus grande $\lambda_0 + \Delta\lambda$. Inversement, une longueur d'onde $\lambda_0 - \Delta\lambda$ se propage plus vite qu'une longueur d'onde plus courte $\lambda_0 - \Delta\lambda$, dans la zone de dispersion négative $D < 0$ (ou dispersion normale). Le phénomène de dispersion cause un élargissement temporel des impulsions au cours de la propagation.

Pour évaluer l'élargissement subi par une impulsion de durée T_0 se propageant dans une fibre de dispersion D , on utilise un paramètre appelé la longueur de dispersion [14]:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (I.22)$$

Dans la pratique, L_D est la longueur de fibre pour laquelle une impulsion va être élargie d'un facteur $\sqrt{2}$ si la fibre est purement dispersive.

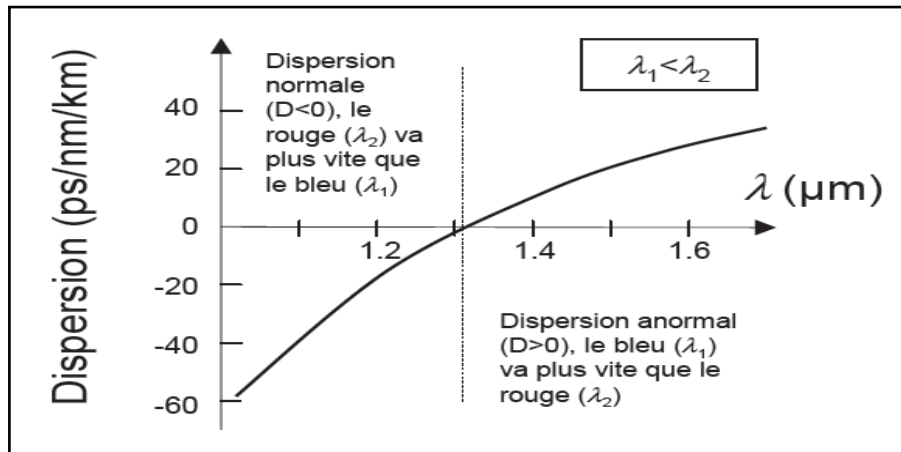


Figure 1.11 : Courbe de dispersion de la fibre SMF.

Etant donné que, pour assurer une transmission la meilleure possible, il n'est pas recommandé, en particulier dans une configuration WDM, d'utiliser des fibres à dispersion nulle, il est nécessaire de compenser la dispersion accumulée dans les fibres de ligne le long de la transmission par des fibres spécifiquement allouées à cela, comme la fibre dite « à compensation de dispersion », ou DCF pour Dispersion Compensated Fibre. Or plutôt que de compenser en une seule fois la dispersion accumulée dans tout le système au niveau du récepteur, il peut être envisagé de répartir la compensation de dispersion tout le long du système afin de minimiser les interactions entre la dispersion et les effets non linéaires le long de la ligne. C'est le principe de la gestion de dispersion.

Pour cela, il suffit de choisir une fibre dont la dispersion, D_{DCF} , est de signe opposé à la dispersion, D , dont l'effet doit être compensé et de choisir la longueur, L_{DCF} , de cette nouvelle fibre telle que :

$$L \cdot D = L_{DCF} \cdot D_{DCF} \quad (I.24)$$

Où L est la longueur de la fibre dont les effets de dispersion doivent être compensés.

Ainsi, pour pallier les dégradations du signal dues à la dispersion chromatique, des tronçons de fibres DCF sont régulièrement insérés dans les lignes de transmissions optiques. On parle alors de lignes de transmission à gestion de dispersion chromatique.

La figure 1.22 illustre ceci. Cette méthode est toujours utilisée dans les systèmes où la compensation de dispersion se fait en ligne.

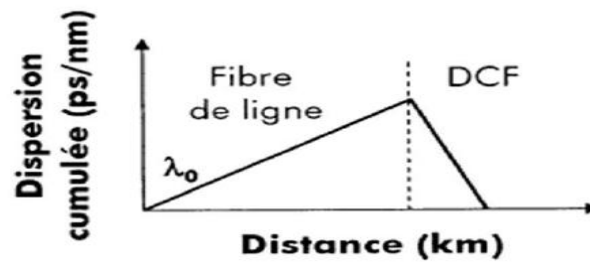


Figure 1.12 : La compensation de la dispersion chromatique par une DCF

La dispersion de polarisation modale (ou PMD pour Polarisation Mode Dispersion)

En plus de la dispersion chromatique, il existe aussi une autre forme de dispersion qui perturbe la propagation des signaux dans une fibre optique : la **dispersion de polarisation** (ou **PMD** pour Polarisation Mode Dispersion) [15]. L'origine de la PMD vient du fait que le mode fondamental d'une fibre optique monomode (LP_{01}) est une combinaison de deux modes électromagnétiques notés LP_{01}^x et LP_{01}^y qui ne se propagent pas à la même vitesse de groupe dans la fibre si celle-ci présente une biréfringence résiduelle, de forme ou de contrainte.

Cette dispersion dépend du conditionnement de la fibre et de la température. Généralement, cette dispersion peut être négligée dans les systèmes de transmission inférieurs à 10 Gbit/s parce que les fibres utilisées pour les télécommunications présentent une PMD très faible, inférieure à $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. La présence de la racine dans l'unité de ce paramètre vient du fait que le phénomène de dispersion de polarisation est un phénomène aléatoire.

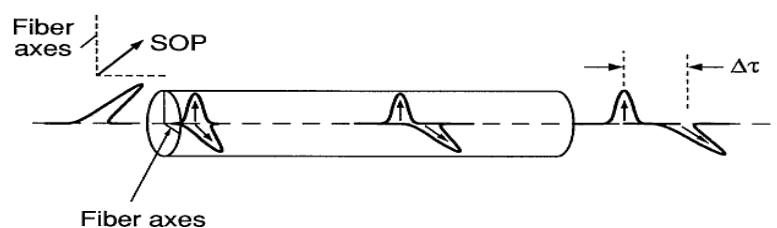


Figure 1.13 : Effet de la PMD sur les impulsions courtes

4.1.2 Caractéristiques non linéaires de la fibre optique

Nous allons brièvement décrire les effets non-linéaires pouvant se manifester dans les fibres optiques à savoir : l'effet Kerr, le mélange à quatre ondes, l'effet Raman et l'effet Brillouin.

4.1.3. L'effet Kerr optique

Les effets non-linéaires subis par le signal optique au cours de sa propagation proviennent majoritairement de l'effet Kerr. Cet effet consiste en une variation de l'indice de réfraction du matériau en fonction de l'intensité du signal optique. L'indice de réfraction d'un milieu optique affecté par l'effet Kerr est déterminé de la manière suivante] :

$$n = n_0 + n_2|E|^2 = n_0 + n_2I \quad (\text{I.25})$$

Où : E : est le champ électrique, n_0 : est la contribution linéaire, n_2 : est le coefficient non-linéaire de réfraction ou coefficient de Kerr qui dépend du matériau. Sa valeur typique dans la silice est d'environ $2,6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ à 1550 nm pour une SMF (et elle varie peu en fonction du type de fibre), et I l'intensité du signal.

Le coefficient non linéaire défini par γ , rend compte de l'effet Kerr responsable des effets non linéaires, il est défini par :

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega}{c \cdot A_{eff}} \quad (\text{I.26})$$

Avec : ω : la pulsation du signal, c : la vitesse de la lumière dans le vide, A_{eff} la surface effective de la fibre.

Le paramètre γ donne une mesure de la sensibilité de la fibre aux effets non linéaires qui peuvent avoir lieu lors de la propagation d'une impulsion dans une fibre optique. Sa valeur dans les fibres monomode standard est de $2 \text{ W}^{-1} \text{ Km}^{-1}$ à 1500 nm, mais elle varie, de même que n_2 , avec le type de dopage et la surface effective.

Pour évaluer l'impact des effets non-linéaires sur une impulsion de puissance crête P_0 qui se propage dans une fibre possédant un coefficient non-linéaire γ , on utilise un paramètre appelé longueur non-linéaire L_{NL} :

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (\text{I.27})$$

a. L'auto-modulation de phase (SPM)

L'auto-modulation de phase est le processus non linéaire d'ordre trois le plus fondamental et son traitement dans un formalisme en ondes planes C'est un processus temporel. La variation temporelle de l'indice de réfraction crée de l'auto-modulation de phase. En effet, durant sa propagation, dans le cadre de l'approximation de l'enveloppe lentement variable et d'une réponse instantanée du milieu, l'impulsion acquiert une phase non Linéaire .

$$\Phi_{NL}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 LI(t) \quad (I.28)$$

Cette phase dépendante du temps modifie la largeur et la forme du spectre la notion de fréquence instantanée :

$$\omega(t) = \omega_0 - \delta\omega(t) \quad (I.29)$$

$$\delta\omega(t) = -\frac{d}{dt} \Phi_{NL}(t) \quad (I.30)$$

La Figure I.24 représente l'exemple d'un profil temporel d'intensité de type gaussienne et la variation $\delta\omega(t)$ associée dans le cas $n_2 > 0$.

Le front avant de l'impulsion, pour lequel $\delta\omega(t) > 0$ est translate vers les hautes longueurs d'onde, tandis que le front arrière est décale vers les basses longueurs d'onde.



Figure I.14 : Dépendance temporelle de l'intensité et la variation de la fréquence instantanée associée

b. La modulation de phase croisée

La modulation de phase croisée (ou XPM pour Cross Phase Modulation) est basée sur le même principe physique que l'auto-modulation de phase, mais elle se produit en présence de plusieurs ondes dans la fibre optique. Ces ondes différentes peuvent être des ondes de longueurs d'onde différentes ou de même longueur d'onde mais de polarisations différentes.

L'indice de réfraction vu par une onde est modulé, non seulement par sa propre intensité, mais aussi par l'intensité des autres ondes. Dans le cas d'un système à deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 , l'indice de réfraction vu par λ_1 est :

$$n = n_0 + n_2 [I(\lambda_1) + 2I(\lambda_2)] \quad (I.31)$$

Le terme dépendant de $I(\lambda_1)$ correspond à la SPM, et le terme dépendant de $I(\lambda_2)$, correspond à la XPM. La XPM est donc deux fois plus importante que la SPM dans ce cas. La XPM affecte notamment une liaison optique multiplexée en longueur d'onde (WDM).

c. Le mélange à quatre ondes (FWM)

C'est un mélange à quatre ondes résultant de la superposition non linéaire de trois ondes continues de fréquences porteuses ω_i , ω_j et ω_k entraînant l'émission d'une quatrième onde centrée sur la fréquence $\omega_l = \omega_i + \omega_j - \omega_k$. Les nouvelles fréquences générées par FWM sont appelées produits d'intermodulations (Figure I.25).

La polarisation non-linéaire conduisant à une génération de ce produit d'intermodulation par FWM s'écrit [16] :

$$P_{NL}(\omega_i + \omega_j - \omega_k) = \frac{3}{4} \varepsilon_0 \chi_3 E_i E_j E_k \quad (I.32)$$

On remarque que la condition d'accord de phase n'est pas nécessairement réalisée entre la polarisation non linéaire et les ondes qui l'introduisent. L'efficacité du mélange à quatre ondes est donc maximisée quand :

$$\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_l = 0 \quad (I.33)$$

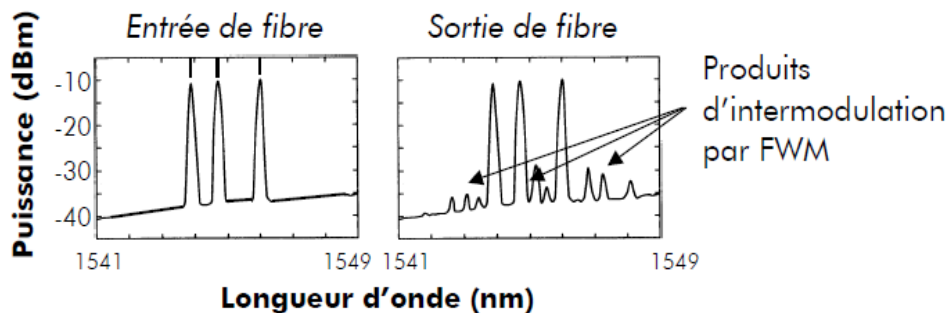


Figure I.15 : Génération de nouvelles longueurs d'ondes par mélange à quatre ondes

Dans le cas de systèmes WDM où les canaux sont équidistants en fréquence les uns des autres, les produits d'intermodulation génèrent des fréquences déjà existantes et donc une fluctuation d'amplitude de certains bits en fin de transmission. L'effet du mélange à quatre ondes est très pénalisant sur les fibres à faible dispersion chromatique telles que la DSF (Dispersion Shifted Fiber) dont la dispersion locale proche de 0 ps/nm/Km à 1550 nm, favorise l'accord de phase. Sur des fibres à plus fortes dispersions comme la SMF, ou

l'accord de phase est plus loin d'être vérifié, le mélange à quatre ondes n'est pas plus un effet dominant.

4.2.L'effet Brillouin

La diffusion Brillouin stimulée SBS (Stimulated Brillouin Scattering) résulte d'un couplage paramétrique entre une onde optique et une onde acoustique lorsque la puissance optique dépasse un certain seuil, appelé PsB. Elle se manifeste par la génération d'ondes optiques décalées en fréquence par rapport à l'onde incidente d'une quantité déterminée par le milieu de propagation. Dans les fibres optiques, la diffusion Brillouin stimulée n'a lieu que dans la direction opposée à celle de l'onde incidente, et le décalage de l'onde générée est défini par :

$$\Delta\nu_B = \frac{(2\pi v_A)}{\lambda_p} \quad (I.34)$$

4.3.3.L'effet Raman

La diffusion Raman stimulée (ou SRS pour Stimulated Raman Scattering) est un processus à trois ondes couplées dans lequel l'onde de pompe génère une onde décalée en fréquence et une onde d'excitation vibrationnelle dans le milieu. Ce phénomène apparaît lorsque la puissance optique dépasse un certain seuil appelé PsR. La diffusion Raman stimulée a lieu dans les deux directions de propagation de la fibre.

Le décalage en fréquence $\Delta\nu_R$ par diffusion Raman est beaucoup plus grand que dans le cas de la diffusion Brillouin. Dans la silice, il est environ de 13 THz.

Une technique pour réduire cet effet non-linéaire est d'utiliser les fibres à haute dispersion chromatique locale. L'accord de phase entre les canaux est par conséquent minimisé. La compensation de la dispersion chromatique peut être utilisée périodiquement pour réduire l'accumulation de dispersion chromatique.

Dans le cadre de ce mémoire nous sommes essentiellement intéressés aux fibres optiques spéciales hautement nonlinéaires dites microstructurées. Ces fibres permettent d'obtenir des gains significatifs de performances dans le domaine du traitement optique de l'information par des techniques non linéaires, telle que la génération de supercontinuum utilisables dans la télécommunication multiplexée en longueur d'onde.

Nous allons maintenant décrire les particularités de ces fibres.

6. Les fibres optiques microstructurées

Il existe plusieurs appellations pour désigner cette famille de fibres optiques qui s'est imposée comme une technologie incontournable en photonique : Fibres microstructurées, fibres à trous, fibres à cristaux photoniques ou fibres à bandes interdites photoniques.

L'idée de fibres à cristaux photoniques, PCF pour Photonic Crystal Fiber, remonte à 1991, mais la fabrication de la première PCF ne date que de 1995. Les problèmes liés à la fabrication de telles fibres furent résolus à l'Université de Bath par les fondateurs de l'entreprise Blaze Photonics[17].

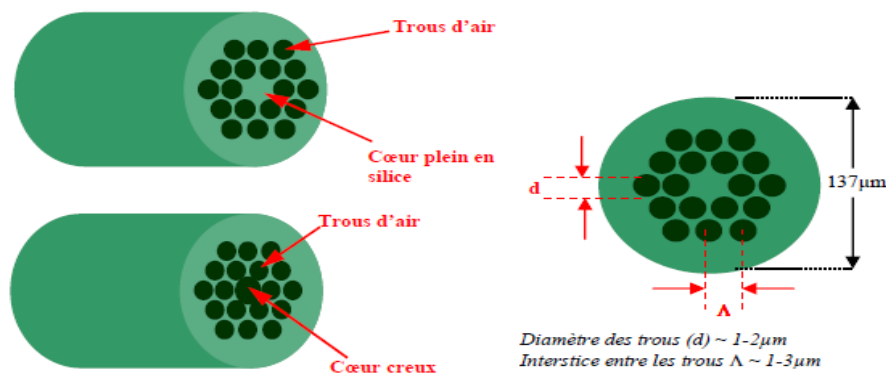


Figure 1.16: Structure des fibres à cristaux photoniques.

Les fibres PCF sont très proches des fibres classiques au premier abord. Cependant, l'étude au microscope de la section d'une PCF permet d'observer une structure particulière. En effet, les fibres PCF sont construites à partir d'une structure hexagonale de petits cylindres d'air autour d'un cœur qui peut être en silice ou constitué d'air (Figure 1.26), suivant l'utilisation visée.

La figure 1.27.a montre une vue plus détaillée de la microstructure centrale, présente une représentation schématisée d'une structure hexagonale idéale avec une régularité parfaite, définissant les paramètres de la structure Λ (le pas) et d (le diamètre de trou).

Des modifications des caractéristiques d et Λ de la microstructure permettent l'obtention de nouvelles propriétés de dispersion et de non-linéarité.

L'originalité de ces guides d'ondes provient de leurs mécanismes de confinement de la lumière qui reposent sur la périodicité de leur structure d'indice (Figure 1.27.b). Cette dernière permet, dans certains cas, d'utiliser l'air pour propager la lumière dans un cœur de verre ou d'air.

Les fibres microstructurées se divisent généralement en deux catégories principales: les fibres à guidage d'indice qui possèdent un cœur solide et les fibres photoniques à bande interdite qui ont des éléments micro-structurés périodiques et un cœur constitué d'un matériau à indice bas (par exemple un cœur creux).

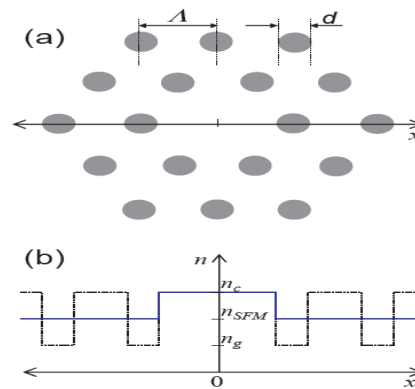


Figure. 1.17: Section transverse de la structure hexa (a) et le profil d'indice transverse (b)

6.1 Fonctionnement de la fibre microstructurée

6.1.1 Propagation de la lumière

Contrairement aux fibres classiques SMF et MMF pour lesquelles la lumière est piégée dans le cœur par réflexion interne totale, les fibres PCF piègent la lumière dans le cœur suivant deux mécanismes. Le premier mécanisme est une réflexion interne totale modifiée et le second repose sur l'effet de bande interdite photonique [18].

3.1.1.1 Réflexion interne totale modifiée

Le premier mécanisme pour piéger la lumière dans le cœur exploite l'indice de réfraction effectif dans la gaine de la fibre plus faible que celui dans le cœur. On parle alors de réflexion interne totale modifiée puisqu'on peut observer une réflexion totale comme dans les fibres classiques.

6.1.2 Bande interdite photonique

Le second mécanisme pour piéger la lumière repose sur la rétrodiffusion cohérente de la lumière dans le cœur. La lumière incidente à l'interface cœur-gaine est fortement diffusée par les trous d'air.

Pour certaines longueurs d'onde et certains angles d'incidence, ce phénomène de diffusion multiple peut engendrer des interférences constructives de tous les rayons revenant vers le cœur [17].

6.3. Caractéristiques

6.3.1 Les pertes

Les pertes d'une la PCF ont pour origine la diffusion Rayleigh, l'absorption par les ions OH^- les courbures et les pertes par confinement. Ladernière cause est une forme additionnelle de pertes qui se produit seulement dans les fibres mono-matériau (notamment les PCF). Ces pertes diminuent quand le nombre de couronnes de trous augmente et quand d/Λ et Λ augmente [17].

6.3.2. La dispersion

Les PCF, avec leurs structures spéciales peuvent fournir une très grande gamme de valeurs de dispersion , en variant d/Λ et Λ [33]..offre la possibilité de modifier la pente de la dispersion telle qu'elle soit positive, négative ou à une valeur très faible.

6.3.3 Le coefficient non-linéaire

Les fibres PCF permettent d'obtenir une grande gamme de non-linéarité par rapport aux fibres à saut d'indice en silice. Les fibres PCF peuvent être jusqu'à 50 fois plus non-linéaires qu'une fibre SMF. Cette propriété vient du fait, qu'avec une fibre PCF, la taille du cœur peut être réduite jusqu'à des valeurs extrêmes [18]. Cependant, il faut noter que plus la fibre est non-linéaire, plus ses pertes augmentent. La fibre PCF la plus non-linéaire a un $\gamma=70$ ($1/\text{Wkm}$) ($A_{\text{eff}}= 1,5 \text{ mm}^2$) avec un $\alpha =190 \text{ dB/km}$ [18]. Il faut également noter que la valeur d'aire effective de $1,5 \text{ um}^2$ est proche de la limite fondamentale pour le diamètre minimum d'un mode guidé à 1550 nm dans une fibre silice [19].

7. Critères d'évaluation d'une transmission

Pour déterminer la qualité d'une transmission optique, différents critères sont définis. Les trois critères principaux sont le taux d'erreur binaires, le diagramme de l'œil et le facteur de qualité. Ces critères sont souvent évalués dans le domaine électrique après la détection du signal optique.

7.1 Diagramme de l'œil

La façon la plus visuelle de juger de la qualité d'un signal est d'observer le diagramme de l'œil. Ce type de diagramme est visualisé dans le domaine électrique après détection à l'aide d'une photodiode et d'un oscilloscope à échantillonnage [20].

Il représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise. La Figure I.38 présente les paramètres fondamentaux d'un diagramme de l'œil.

Le diagramme de l'œil permet de juger de la qualité du signal en termes d'interférences entre symboles mais surtout de bruit d'amplitude et de gigue temporelle. Nous rappelons que les interférences entre symboles sont la conséquence principale de l'élargissement temporel des impulsions du signal du a la dispersion chromatique ou a la SPM. Le bruit d'amplitude quant a lui résulte de l'accumulation du bruit d'émission spontanée amplifiée sur le signal tout au long de son parcours dans la liaison. Enfin, la gigue temporelle est une conséquence de la dispersion de mode de polarisation mais également du couplage entre les impulsions et le bruit d'émission spontanée amplifiée, c'est-à-dire plus simplement, a la présence d'ESA sur les fronts montant et descendant des impulsions qui conduit a une fluctuations des temps d'arrivée des impulsions. D'unpoint de vue plus quantitatif, on peut définir le facteur de qualité à partirdu diagramme de l'œil:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{I.38})$$

Ou σ_1 et σ_0 , les racines carrées des variances des densités de probabilité des symboles '1' et '0'. Il permet une évaluation du bruit d'amplitude que subit le signal. Plus le signal est de mauvaise qualité, plus le diagramme de l'œil est fermé, plus les facteurs de qualité est faibles et ainsi plus la détection du signal sans erreur est difficile. Le diagramme de l'œil est donc un excellent moyen visuel de juger de la qualité du signal dans la limite de la réponse de laphotodiode et de l'oscilloscope utilise.

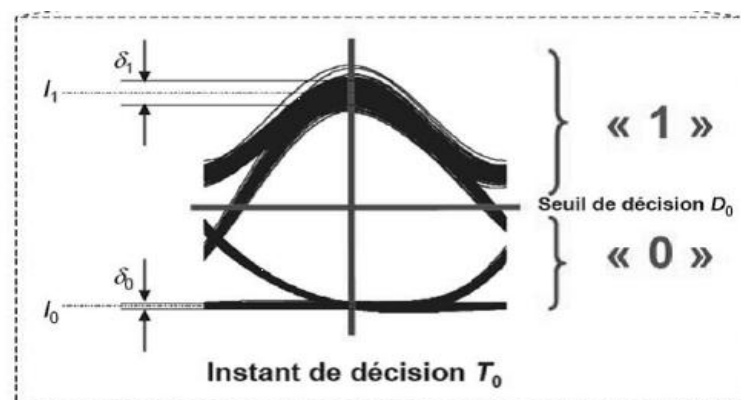


Figure 1.18 : Paramètres fondamentaux d'un diagramme de l'œil d'un signal au format RZ

7.2 Taux d'erreur binaire

Le signal transmis est un signal numérique binaire. La durée d'un symbole binaire est nommée 'temps bit'. Pour que les études en laboratoire soient les plus représentatives

possibles d'un signal réel, le signal émis est une séquence binaire pseudoaléatoire (PRBS pour Pseudo Random Bit Sequence) qui est représentatif de l'ensemble des combinaisons possibles de successions de bits. et peut prendre typiquement les valeurs 7, 15, 31 (dans les normes internationales des télécommunications). Comme nous transmettons des données numériques, c'est-à-dire une succession de « 0 » et de « 1 », le critère caractérisant la qualité du signal transmis est le taux d'erreurs binaire TEB, ou BER (Bit Error Ratio). Du fait du bruit et des effets de propagation, le signal se déforme et il peut arriver qu'un « 1 » soit détecté en lieu et place d'un « 0 » ou réciproquement, si le signal à détecter passe de l'autre côté du seuil de décision. Le BER est le rapport du nombre d'erreurs de transmission, c'est-à-dire du nombre de fois où un « 1 » a été détecté à la place d'un « 0 » ou vice-versa, sur le nombre total de bits transmis. Un signal de qualité idéale aura un BER nul. Comme cette valeur est impossible, la valeur demandée par les opérateurs de télécommunications est de l'ordre de 10^{-9} , soit une erreur pour un milliard de bit transmis. Si les « 1 » et les « 0 » du signal sont équiprobables, nous pouvons montrer que le facteur de qualité Q est relié au BER par la relation :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q} \quad (1.39)$$

Avec erfc, la fonction erreur complémentaire :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-y^2) \cdot dy \quad (1.40)$$

Le facteur Q est directement calculé par l'oscilloscope d'acquisition, et il est usuel d'utiliser la courbe de correspondance du facteur Q avec le BER qui est illustré par la Figure 1.39.

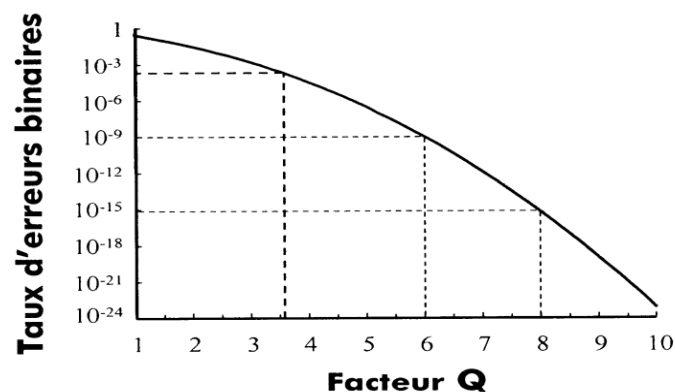


Figure 1.19: Relation entre taux d'erreur binaire et facteur Q.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes notamment intéressés à la façon dont le signal optique est émis, transmis et détecté.

La description complète d'une liaison optique, composant par composant a été effectuée.

Le laser et les caractéristiques du signal émis ont été décrits surtout de la qualité du signal optique émis par les diodes lasers et des différentes contributions de bruit et les limitations de ce type de composants telles que le chirp, la variation de la longueur d'onde d'émission et le courant de seuil avec la température et les oscillations qui sont engendrées pour les systèmes de transmission à hauts débit. Une solution pour éviter ces limitations, est de remplacer les diodes lasers par une source unique (supercontinuum) découpée spectralement pour générer un émetteur multi-longueur d'onde..

Le chapitre suivant va décrire le principe d'un nouveau type d'impulsion appelées similariton.

CHAPITRE II

Génération de sources multi-longueurs d'ondes par Similaritons optiques

1. INTRODUCTION

Dans une liaison WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) classique, la partie émettrice nécessite un ensemble de diodes laser émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches (dans le voisinage des 1550 nm). L'inconvénient de cette technique est que les diodes laser nécessitent un contrôle en température car la longueur centrale d'émission des diodes laser varie dès que la température change, la longueur d'onde émise augmente d'environ $0,1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ (ce qui correspond à un décalage de la fréquence optique de l'ordre de 10 GHz pour la fenêtre à 1,5 μm). Un autre inconvénient est le bruit laser, Ces fluctuations imposent une limite ultime aux performances de n'importe quel système optique de communications. Ce bruit est provoqué par l'émission spontanée dans la diode laser. Pour éviter ces inconvénients, la technique de supercontinuum remplace avantageusement les diodes laser pour créer de nombreuses sources optiques émettrices, car elles sont insensibles à la variation de température.

2. Sources multi-longueurs d'ondes

Il existe plusieurs méthodes théoriques et expérimentales pour générer du supercontinuum pour différentes applications [21,22]. Dans ce mémoire, nous nous intéressons à son application aux systèmes WDM qui exige des supercontinuum avec une haute puissance, une largeur de bande spectrale large, et une bonne platitude spectrale (variation de puissance <1dB). Ce large spectre est ensuite découpé en de nombreux canaux à longueurs d'ondes différentes à l'aide d'un démultiplexeur [23], le principe de fonctionnement est montré par la figure 1. Pour cela, l'utilisation des impulsions similaritons ont le potentiel de générer ce type de supercontinuum. Dans cette technique, des impulsions courtes avec la puissance de crête élevée se propagent dans une fibre optique pour générer un spectre large qui peut ensuite être découpé en de nombreux canaux à longueurs d'ondes différentes à l'aide d'un démultiplexeur. Le principe de fonctionnement est montré par la figure 2.1.

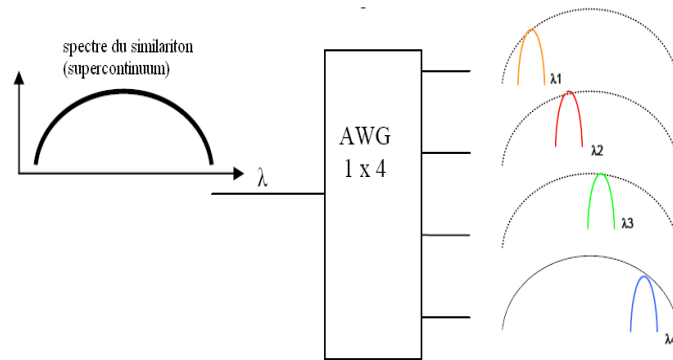


Figure 2.1 : schéma de fonctionnement du supercontinuum pour générer un peigne de longueurs d'ondes

3.SIMILARITON OPTIQUE

La propagation des impulsions optiques ultracourtes de forte puissance dans les fibres optiques actives (fibre amplificatrice) est associée à l'effet de la distorsion due à l'interaction du gain, de la non-linéarité et de la dispersion. Suivant le régime de dispersion de la fibre, des comportements très différents seront observés. Dans le cas d'une dispersion anormal, l'impulsion se comprime avant d'éclater. Dans le cas d'une dispersion normale, l'impulsion s'élargit progressivement et sa forme évoluera vers un profil d'intensité parabolique avec une dérive de fréquence linéaire et de pente positive [24] et se propage de manière auto-similaire (similariton optique).

La description de la propagation des similaritons optiques dans une fibre optique est modélisée par l'équation suivante, dite non linéaire de Schrödinger NLSE avec gain constant [37]:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} - \gamma |\psi|^2 \psi + i \frac{g}{2} \psi, \quad (1)$$

Cette équation inclut des termes de dispersion de deuxième ordre β_2 , l'effet non linéaire γ , ainsi que le terme du gain g . Où ψ est l'amplitude de l'impulsion variant lentement.

Il s'agit d'une équation différentielle partielle non linéaire, où il est très difficile d'obtenir la solution analytique. Une approche numérique est donc souvent nécessaire afin de simuler la propagation des impulsions dans les fibres. [25]. La solution de l'équation (1) est [26]:

$$\begin{cases} \psi_p(z, T) = A_p(z) \sqrt{1 - \frac{T^2}{T_p^2(z)}} \exp\left(-i \frac{C_p}{2} T^2 + i \phi_p\right) & \text{if } |T| \leq T_p \\ \psi_p(z, T) = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_p(z) = \frac{1}{2} U_{mi}^{1/3} \left(\frac{g}{\sqrt{\beta_2 \gamma / 2}} \right)^{1/3} \exp\left(\frac{g}{3} z\right) \\ T_p(z) = 3 U_{mi}^{1/3} \frac{\sqrt[3]{\beta_2 \gamma / 2}}{g^{2/3}} \exp\left(\frac{g}{3} z\right) \\ C_p = \frac{g}{3 \beta_2} \\ \varphi_p = \frac{3 \gamma A_0^2}{2 g} \exp\left(\frac{2 g z}{3}\right) \end{array} \right. \quad (3)$$

Avec

La variable $A_p(z)$ correspond à l'amplitude de l'impulsion parabolique de demi-largeur totale $T_p(z)$, et d'énergie initiale U_{mi} . Le paramètre $\psi_p(z)$ décrit la phase de celle-ci au cours de sa propagation, tandis que C_p définit le coefficient de chirp linéaire.

L'impulsion gaussienne dans la fibre optique amplificatrice considérée se propage de manière auto-similaire (figure II.2), subissant une croissance exponentielle simultanée de sa puissance crête et de ses largeurs temporelle et spectrale, et conserve sa forme parabolique inchangée (résiste au wave-breaking optique). Le similariton optique présente également l'intérêt d'être indépendant de la forme initiale de l'impulsion, et dépend que de l'énergie initiale [27]. Le champ électrique $A(0, t)$ correspondant à une telle impulsion peut être exprimé sous la forme :

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right) \quad (4)$$

Où P_0 est la puissance d'entrée de l'impulsion et T_0 est la largeur d'impulsion d'entrée, et est liée à la moitié de maximum (FWHM) de l'impulsion d'entrée par $T_{FWHM} \approx 1.665 T_0$. W , $T_{FWHM} = 2,4 ps$, $\beta_2 = 1.01 ps^2/Km$, $\gamma = 51 [W.Km]^{-1}$, et la longueur d'onde centrale $\lambda_0 = 1550 nm$.

évolution temporelle du similariton

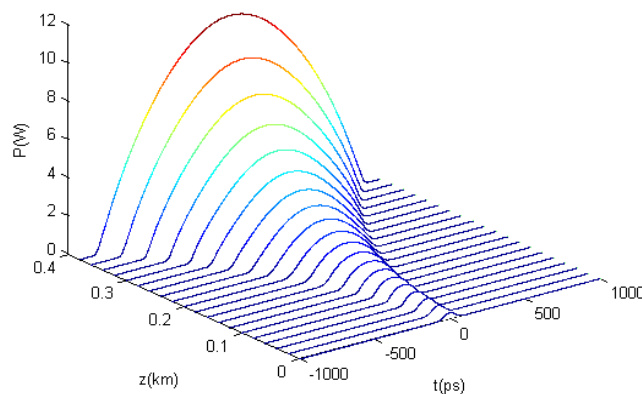


Figure 2. 2 : Evolution temporelle du similariton [28]

4.GENERATION DES SOURCES MULTILONGUEUR D'ONDE PAR LES SIMILARITONS

Les caractéristiques des similaritons, telles que la largeur de bande spectrale , le chirp linéaire et la haute puissance rendent ces impulsions aptes à la génération de sources multi-longueurs d'ondes utilisées dans les systèmes WDM. C'est-à-dire à partir d'une source unique, il est donc possible de générer N canaux identiques à des longueurs d'ondes différentes.

La figure 2.3 montre le spectre du similariton (supercontinuum) généré dans les conditions de la simulation , mentionnés dans le paragraphe précédent. La simulation est faite à l'aide du logiciel Optisystem.

Lorsqu'une impulsion se propage dans la fibre de dispersion normale et sous l'amplification, le chirp fréquentiel induit par l'intermodulation (SPM) génère une impulsion de forme parabolique (similariton). Cette impulsion peut élargir le spectre d'une manière plate et rectangulaire. En outre, l'utilisation de fibre hautement non linéaire et à faible dispersion normale, la puissance requise est inférieure [28]. De la figure 2.3, on peut constater que l'impulsion d'entrée change son spectre en un supercontinuum à large bande 1500-1600 nm (source couvrant la bande C+L de la fenêtre des communications optiques) d'amplitudes quasiment égales

(variation de puissance < 1dB) due à la linéarité du chirp spectral du similariton.

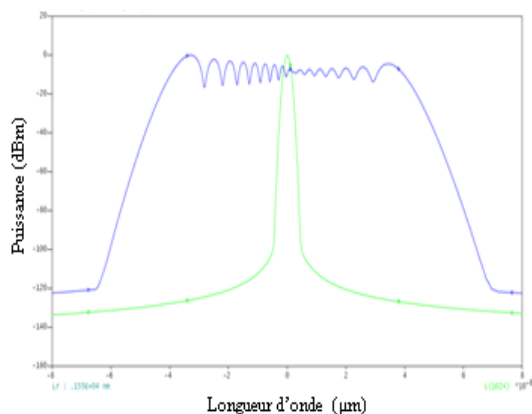


Figure 2.3 : Spectre du similariton (bleu), spectre d'entrée (vert)[28]

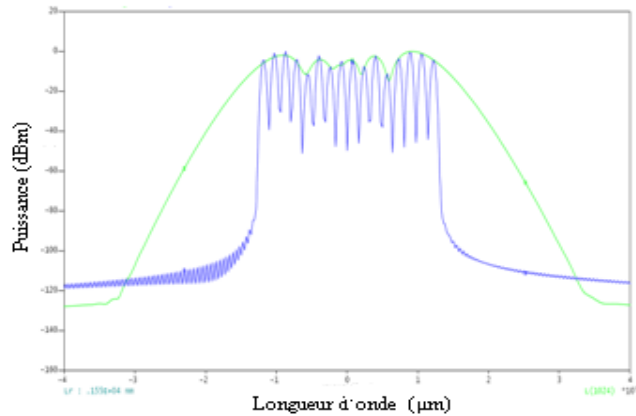


Figure 2.4 : découpage du spectre du similariton (bleu), spectre d'entrée (vert)

Pour générer des sources multi-longueurs d'ondes, il suffit d'utiliser un démultiplexeur pour découper le spectre du similariton (100 nm de largeur) en canaux à longueurs d'ondes différentes. Cette source permettant de générer plus de 200 canaux espacés de 100 GHz (0.4 nm), tous centrés à 1552 nm, dont 32 canaux dans la bande 1530-1565 nm (bande C). L'emploi d'un nombre élevé de canaux conduit à l'augmentation du débit, et par conséquent de la capacité de transmission de la fibre optique considérée. Si la source est délivrée à un taux de répétition de 10 GHz, on peut atteindre un débit de 2 Tbit/s. La figure II .4 montre la juxtaposition des spectres de 16 canaux à la sortie d'un démultiplexeur à largeur de bande de 10 GHz avec un espacement entre canaux égale à 200 GHz afin de limiter les interférences. Les canaux sont générés dans la gamme des longueurs d'onde de 1535 à 1565 nm.

5.CONCLUSION

On a exploité les caractéristiques de l'impulsion similariton pour générer une source supercontinuum appartenant à la bande de la fenêtre de la communication optique basée sur le spectre du similariton. Une source multi-longueurs d'ondes est obtenue après découpage spectral du continuum par un démultiplexeur de bande passante 50 GHz, et 32 canaux sont générés dans la gamme de longueur d'onde 1528 – 1558 nm.

CHAPITRE III
SIMULATION D'UN SYSTEME DE TELECOMMUNICATION U-DWDM
A 32 CANAUX

I.Introduction

Dans une liaison WDM classique (multiplexage par division en longueurs d'onde), la partie de l'émetteur nécessite un ensemble de diodes laser émettant à différentes longueurs d'ondes mais assez proches (au voisinage d'une longueur d'onde de 1550 nm), cette technique est simple mais son inconvénient est le bruit laser; Ces fluctuations imposent une limite maximale à la performance de toutes les communications du système optique. Ce bruit est causé notamment par une émission spontanée dans la diode laser. En outre, le chirp laser est l'inconvénient majeur dans la performance du système WDM directement modulé, et il augmente lorsque le débit binaire a augmenté, ce qui limite la transmission à un débit inférieur à 5 Gb / s [1, 2]. La technique continuum remplace les diodes laser par génération de nombreux émetteurs optiques et est insensible à la variation de température. Nous nous proposons de générer une seule source de continuum capable de fournir tous les canaux nécessaires à l'efficacité du système WDM. Pour cela, on se propose de simuler le système U-DWDM à 32 diodes laser puis le même système mais avec source continuum à similariton afin de comparer les 2 systèmes.

2.Le modèle numérique de la propagation des impulsions dans la fibre optique

Ce modèle numérique de la propagation des impulsions convient à l'étude de l'évolution des impulsions ultra-courtes dans les médias non linéaires et tient compte à la fois des phénomènes linéaires et non linéaires se produisant dans la fibre optique. L'équation non-linéaire de Schrödinger généralisée est comme suit [9]:

$$i \frac{\partial A(z, t)}{\partial z} + \frac{i}{2} \alpha A(z, t) - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} - \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A(z, t)}{\partial t^3} + \gamma \left[|A(z, t)|^2 A(z, t) + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial (|A(z, t)|^2 A(z, t))}{\partial t} - T_R A \frac{\partial |A(z, t)|^2(z, t)}{\partial t} \right] = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où $A(z, t)$ est l'enveloppe lentement variable du champ électrique, z la distance de propagation, α les pertes, β_2 la dispersion chromatique d'ordre 2, β_3 la dispersion d'ordre 3, t le temps (définissant un repère qui se propage à la même vitesse de groupe que l'impulsion) et γ le

coefficient non-linéaire qui est décrit par l'équation (3.1), et T_R : la constante de temps Raman. Les effets non linéaires mis entre crochets dans l'équation (3.1) mettent en évidence respectivement l'effet Kerr, l'effet Raman et l'effet Brillouin ; ces deux derniers effets sont importants pour des signaux de très courte durée et de puissance élevée.

Aujourd'hui, grâce à de puissants logiciels de simulation, il est possible, d'étudier, d'analyser et d'évaluer complètement une chaîne de transmission. Par cela, le logiciel Optisystem 7 est utilisé. Il intègre les fonctions électroniques, et optiques telles que les fibres optiques, les lasers, les modulateurs.... En effet ce logiciel résout l'équation non linéaire de Schrödinger par la méthode RK4IP [21], qui est une méthode itérative basée sur la méthode de Runge- Kutta d'ordre 4, et qui fait appel en même temps à la transformée de Fourier.

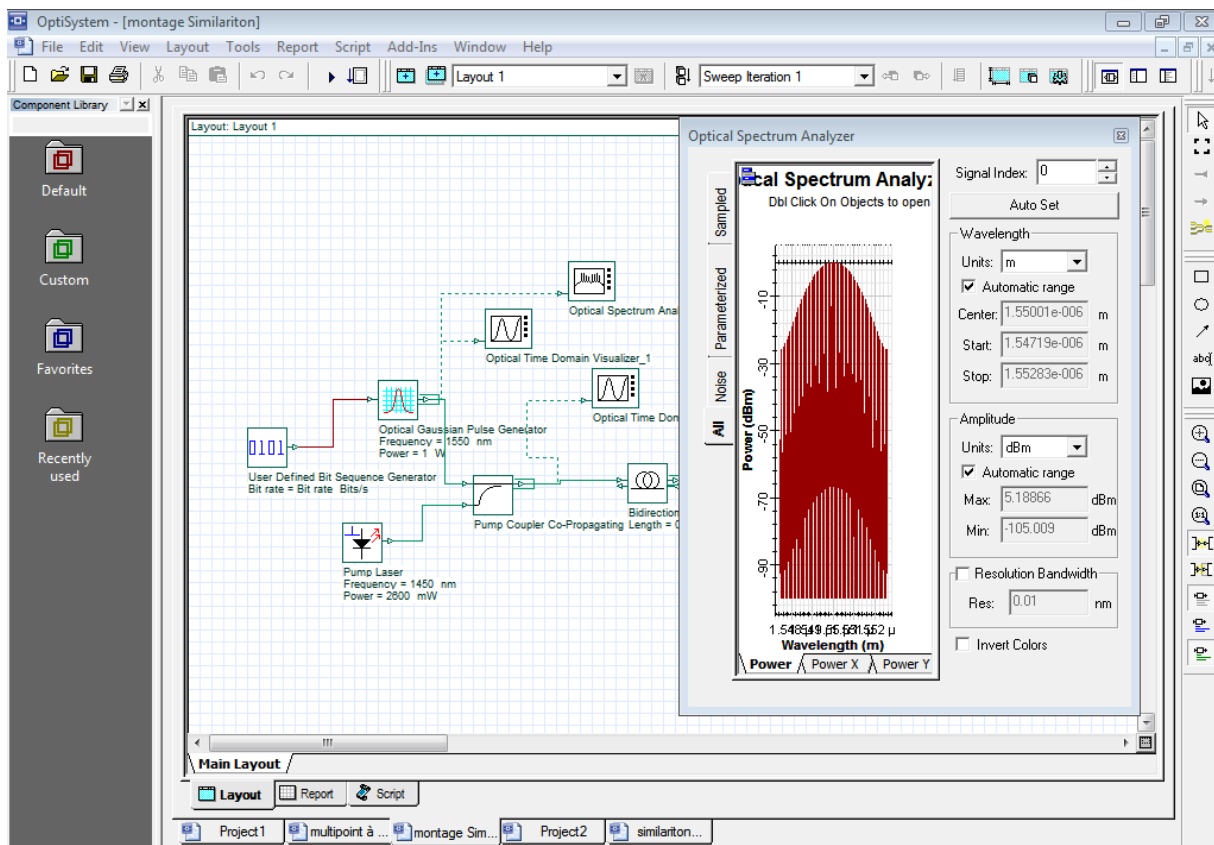


Figure 3.1 : Copie d'écran du logiciel de Simulation OptiSystem

3. système U-DWDM (ultra-dense à multiplexage en longueurs d'onde) à 32 diodes laser

On désire transmettre à grande distance 32 informations différentes portées par 32 canaux centrés à 1550 nm et dont la distance de séparation inter-canaux est 0.2nm via une

seule fibre optique. La largeur de séparation entre canaux est 0.2nm .Le montage simulé est représenté sur la figure 2. Chaque canal émettant, à une fréquence $F=10$ GHz , un train d'impulsions codé RZ et modulé par un modulateur Mach-Zehnder qui est commandé par le signal à transmettre. Un multiplexeur rassemble tous ces canaux pour les transmettre sur une seule ligne de fibre optique constituée périodiquement d'un tronçon de fibre SMF à dispersion positive ($D=17$ ps/nm/km) suivie par un tronçon de fibre DCF à dispersion négative ($D=-80$ ps/nm/km). A la sortie de chaque tronçon de fibre est disposé un amplificateur EDFA pour compenser les pertes accumulées durant la propagation. A la fin de cette chaîne , un démultiplexeur sépare tous les canaux

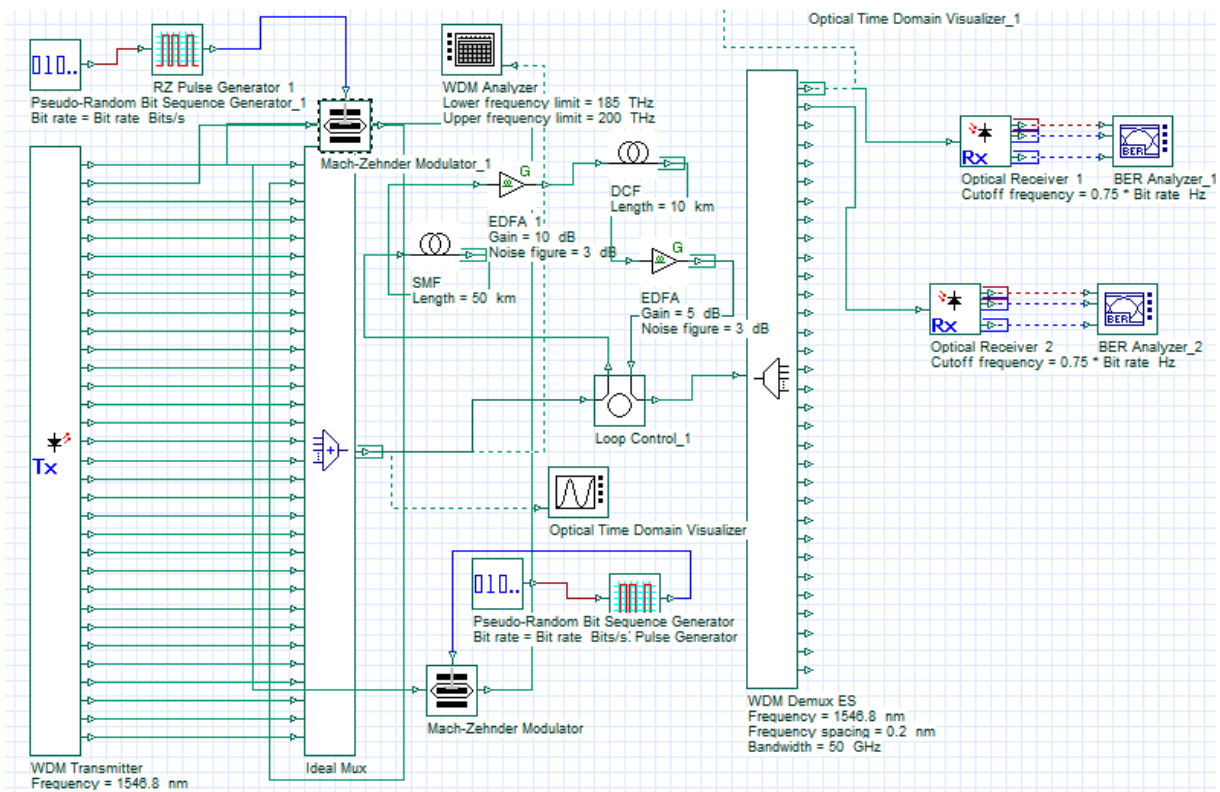
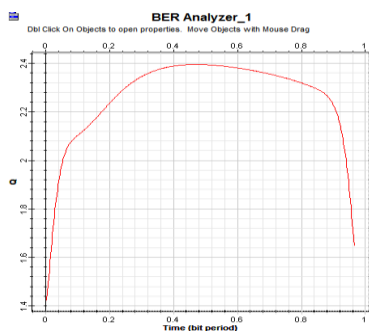
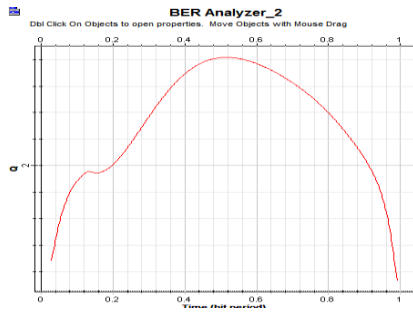


Figure 3.2 : montage simulé du système U-DWDM

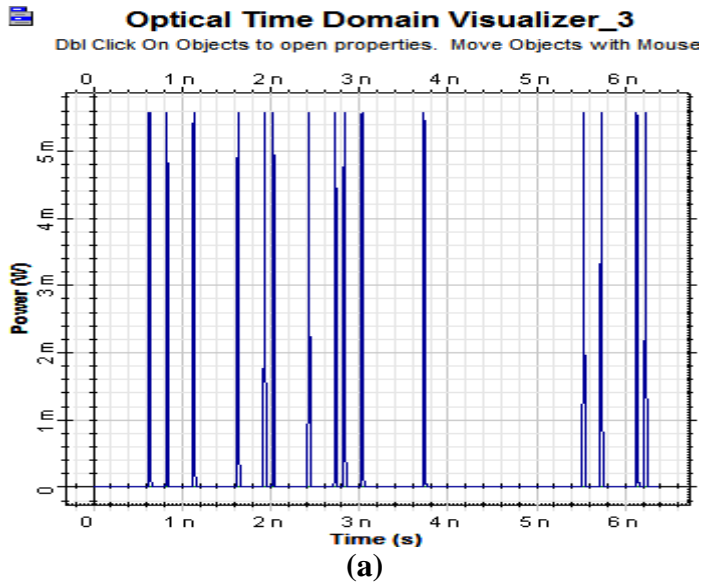


(a)



(b)

Figure 3.3 : diagramme de l'œil : a) canal 1 à 120 km de distance, $Q=2.39, TEB=0.006$
 b) canal 2 à 120 km de distance, $Q=2.82, TEB=0.002$



(a)

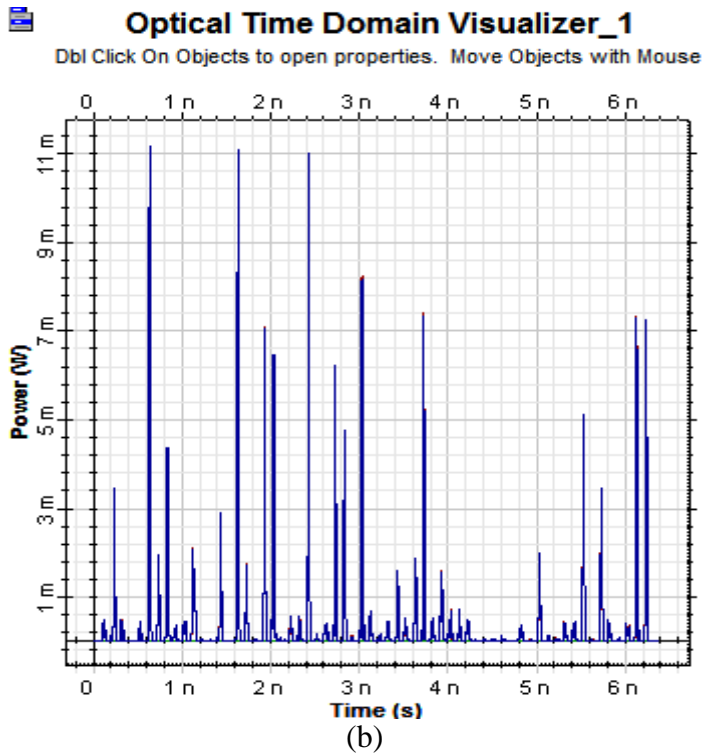


Figure 3.4 : (a) signal temporel émis au canal 1 à 10 Gb/s
 (b) signal temporel à la réception du canal 1 à 120 km de distance,

les figures 3.3 –3.4 montrent qu'à 120 km de distance et à 10 Gb/s les coefficients de qualité obtenus sont très inférieurs au minimum requis par les télécommunications acceptables ($Q > 6$) et le signal de réception est déformé par comparaison avec le signal émis. Ceci est dû au bruit de l'émission spontanée dans la diode laser et le chirp laser qui est l'inconvénient majeur dans la performance du système WDM directement modulé et augmente lorsque le débit binaire augmente.

Conclusion

Ceci limite donc la transmission en débit et en portée inférieurs respectivement à 10 Gb / s et à 120 km. Ces fluctuations imposent des diminutions aux performances du système de communications optiques U-DWDM à diodes. En raison de ces inconvénients dans ce qui suit, on se propose de simuler le système U-DWDM à continuum simulairiton .

4 .Continuum appliqué à l'U-DWDM

Les continus recherchés sont d'un intérêt considérable pour l'application de télécommunications optiques multiplexé en longueur d'ondes WDM ou l'intensité et la

platitude spectrale sont d'une importance considérable. Ceci peut être réalisé par l'utilisation des impulsions similaritons en raison de ses caractéristiques : spectre large, résistance au wavebreaking, auto-similarité, et le chirp linéaire.

4.1 Génération de continuum par la formation de similaritons dans la PCF

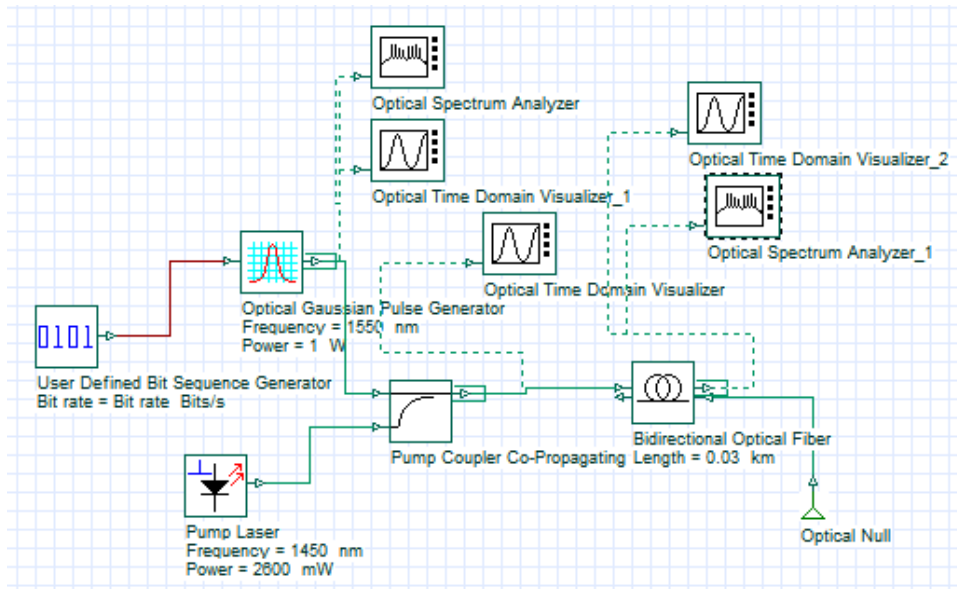


Figure 3.5 : La Figure 3.2 représente le montage simulé sous OptiSystem pour la génération du continuum.

Dans la Figure 3.5 Le signal d'entrée est fixé à la longueur d'onde $\lambda=1550$ nm, est commandé par l'horloge représentant des états binaires 1 et 0. Pour chaque état binaire 1, une impulsion est générée, le maximum de l'impulsion est situé au centre du bit. C'est donc un générateur d'impulsions optiques courtes de type gaussien de puissance $P= 1$ W avec une fréquence de répétition $F_{rep}= 10$ GHz

Ce signal gaussien de durée à mi-hauteur $T=2$ ps, combiné avec le signal pompe CW laser de puissance $P=2.5$ W et de longueur d'onde $\lambda_p= 1450$ nm par l'intermédiaire d'un coupleur, est injecté dans la fibre optique spéciale de type PCF décrite dans le chapitre précédent.

Les impulsions formant la source initiale émises par le générateur d'impulsions sont espacées de $1/F = 100$ ps. Cette durée temporelle est supposée suffisamment grande pour éviter toute interaction non linéaire entre deux impulsions successives lors de la génération du continuum.

A la sortie on peut obtenir après propagation dans la fibre PCF non-linéaire, un train d'impulsions similaritons à un taux de répétition de 10 GHz (Figure 3.6) ayant pour chaque spectre de similariton notre continuum.

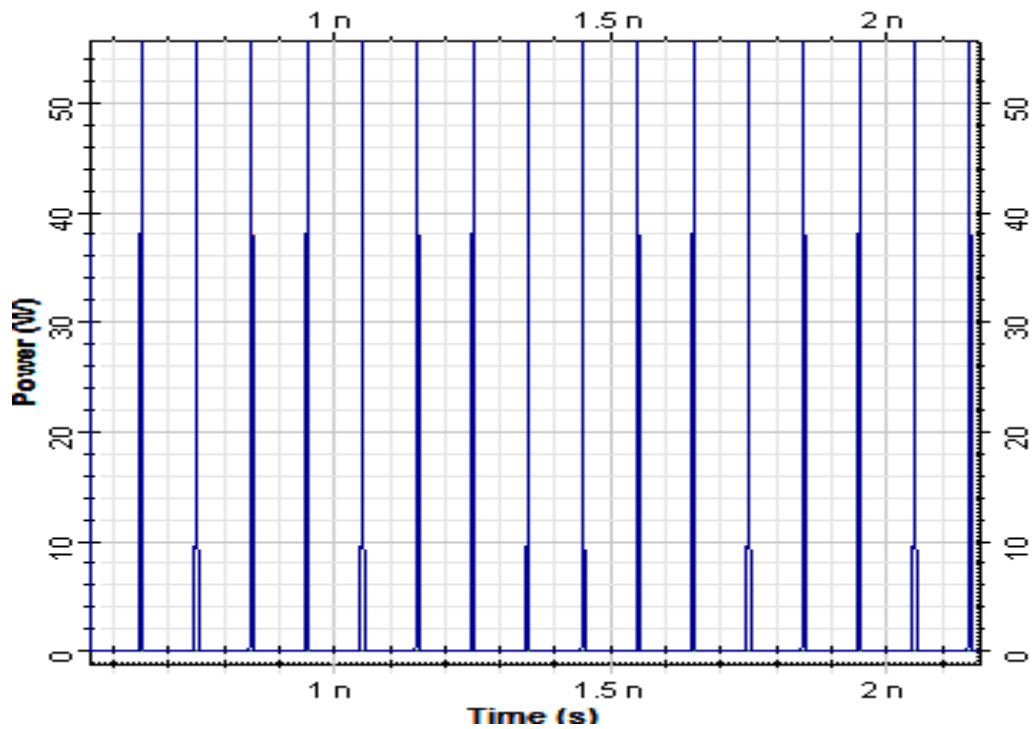


Figure 3.6 : train d'impulsions similaritons simulé

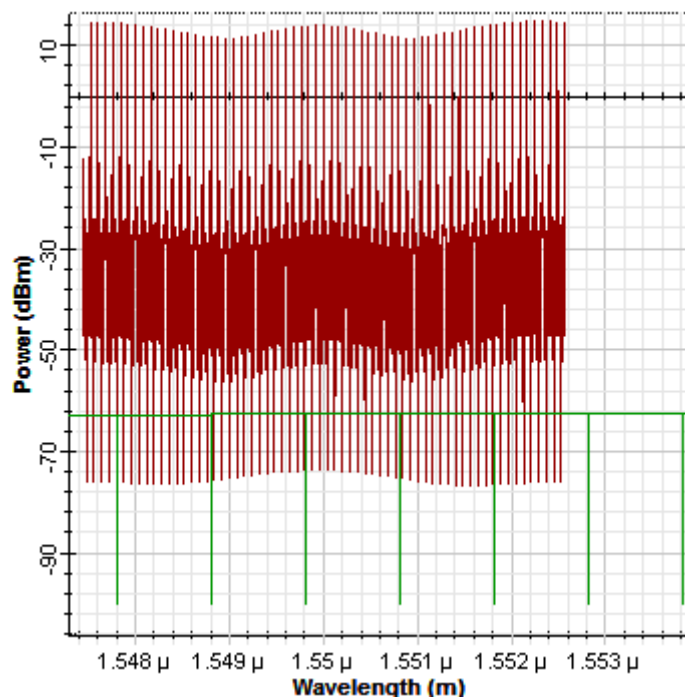


Figure 3.7 : spectre de l'impulsion similariton obtenue à la sortie de la fibre PCF

Les simulations numériques réalisées pour la génération du continuum peuvent alors être effectuées pour la propagation d'une impulsion unique. La Figure. III.7 montre le continuum généré après propagation d'une impulsion gaussienne à $T_{FWHM} = 2\text{ps}$ dans une

PCF de 30 m caractérisée par une dispersion chromatique normale $D_{ch} = -0.8$ ps/nm/km, et un coefficient de non-linéarité $\gamma = 51$ (W.km)⁻¹ à la longueur d'onde de 1550 nm (vu au chapitre précédent) et une dispersion de troisième ordre $\beta_3 = -0,01$ ps³ / Km.

Ces conditions conduisent à la formation de l'impulsion similariton, et le spectre d'une telle impulsion centrée sur la longueur d'onde de 1550 nm est rectangulaire et large environ de 6 nm (variation de puissance très faible) due à la linéarité du chirp spectral induit par l'interaction de l'auto-phase modulation (SPM) et la dispersion normale [7]. Le spectre étant plat (avec de faibles ondulations) est intéressant pour l'application DWDM car il peut générer des canaux avec le même niveau de puissance

4.2 Génération de source multi-longueurs d'ondes

Les caractéristiques du continuum généré, telles que la bande spectrale large et plate, et la puissance élevée rendent ces derniers aptes à la génération de source multi-longueurs d'onde utilisée comme émetteurs dans les systèmes WDM. C'est-à-dire à partir d'une source unique, il est donc possible de générer N canaux de puissance identiques à des longueurs d'ondes différentes.

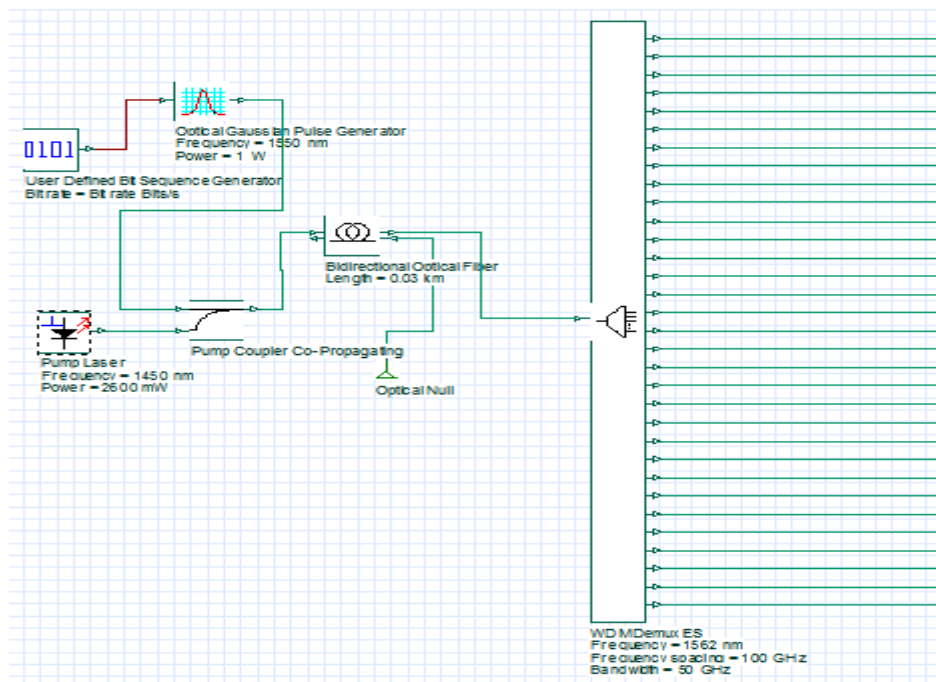


Figure 3.8: Génération de source multi-longueur d'onde et découpage spectral du continuum par un démultiplexeur optique,

Pour générer des sources multi-longueurs d'ondes, nous utilisons un démultiplexeur optique pour découper le spectre continu) dans de nombreux canaux à différentes longueurs d'onde. Ce

Source génère 32 canaux espacés de 0.2 nm tous centrés sur 1550 nm, dans leBande C des télécommunications (1530-1565 nm). Accroître le nombre de canaux conduit à l'augmentation du débit binaire, ce qui augmente la capacité de transmission par fibre optique. Si la source initiale est livré avec un taux de répétition de 10 GHz, un débit de 320 Gbit / s peut être atteint.La figure 3 ntre le spectre obtenu après découpage par un démultiplexeur optique. La bande passante totale du démultiplexeur est50 GHz .

5. SIMULATION DE LA CHAÎNE DE TRANSMISSION DWDM

On désire utiliser les 32 canaux pour transmettre différentes informations à 32 abonnés situés à grande distancequ'on veut optimiser par l'investigation du système DWDM représenté sur la figure III.6. La chaîne comprend un Module de transmissionqui vise à enregistrer des informations électriques surSignal optique. La modulation de données à 10 Gbit / s se fait par Modulateur Mach-Zehnder,un multiplexeur optique qui rassemble les 32 canaux avant de les transmettre sur la fibre optique. Ce support de transmissionconsidéré dans cette étude est unesuccession périodique de fibre monomode standard(SMF), suivie d'une fibre compensatrice de dispersion (DCF) et des amplificateurs optiques (EDFA fonctionne sans avoir à Transformer le signal optique en électrique).La forme spectrale du signal multiplexé est modifiée par les propriétés de la dispersion chromatique de la fibre SMF. La fibre DCF compense les distorsions précédentes en raison de son coefficient de dispersion négatif

Le bloc de réception estcomposé d'un démultiplexeur utilisé pour séparer les différents canaux, des photodiodes PIN conçues pour convertir le signal optiquevéhiculant l'information en impulsions électriques. Une fois la chaine de liaison construite, on peut visualiser les signaux à différents points dela liaison par fibre optique. Cela permet de visualiser les transformations successives du signal pendant sa propagation ainsi que lecomportement et l'influence de chaque bloc.

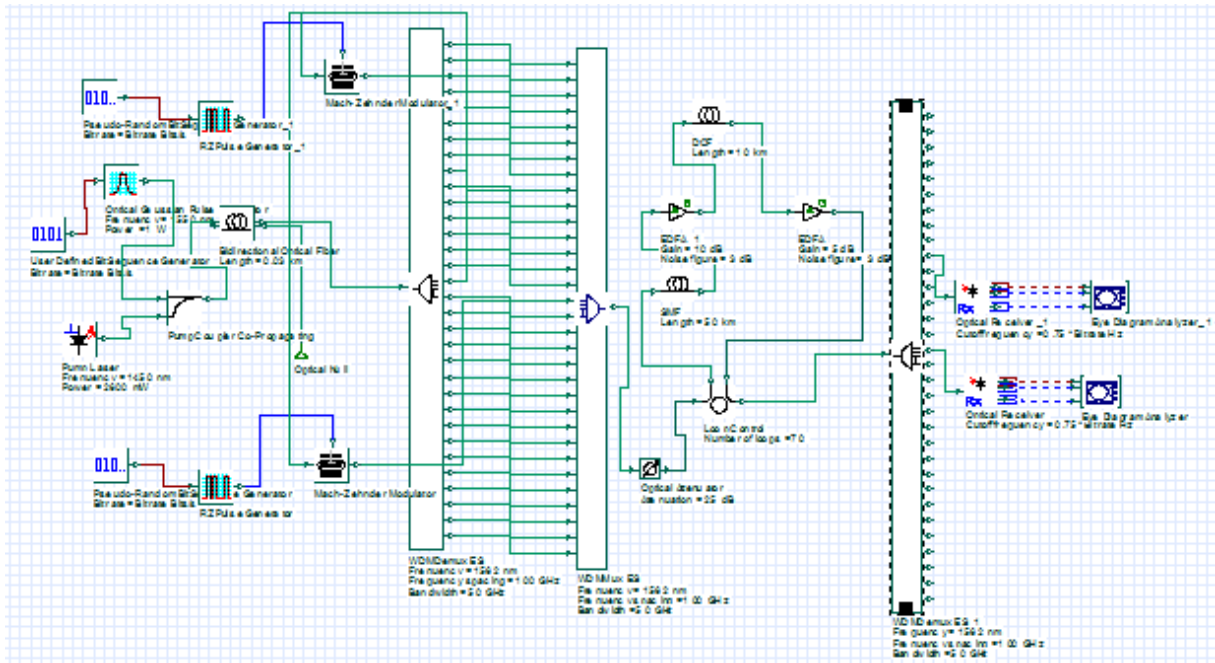


Figure 3.9 : Chaîne de transmission DWDM simulée

Pour évaluer les performances de ce système de transmission, on utilise le coefficient de qualité ou le TEB qui sont des critères de qualité qui doivent être respectivement supérieur à 6 et inférieur à 10^{-9} . Après une distance de transmission égale à 4200 km la figure III. 7 montre le diagramme de l’œil pour le canal 10 et 16.

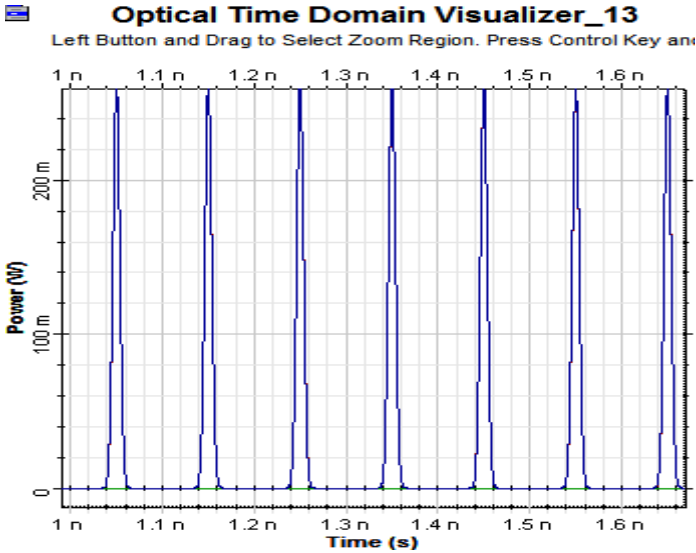


Figure 3.10 : représente le signal à l’entrée du canal 16

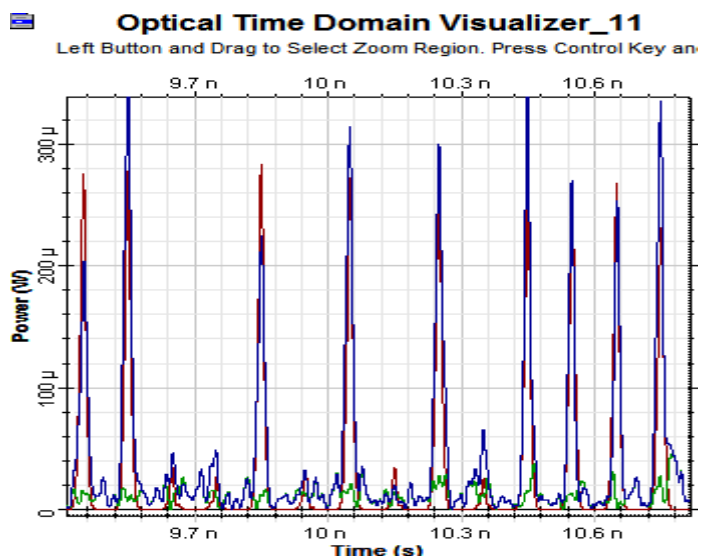
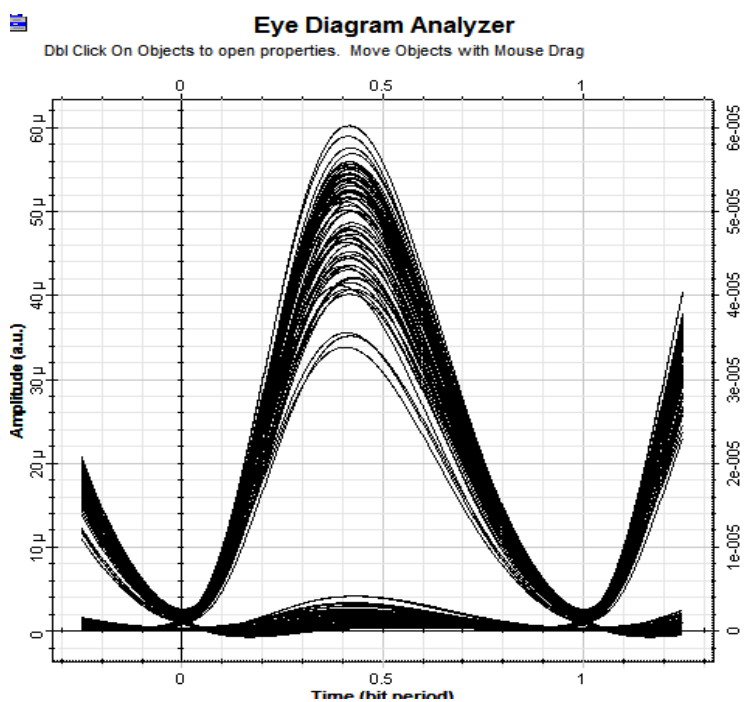


Figure 3.11 : représente le signal à la sortie du canal 16



3.12 : diagramme de l'œil pour le canal 16, $Q=9.44$, $TEB=1.75 \times 10^{-21}$

La figure 3.11 montre des signaux temporels bruités qui se traduisent par des fluctuations d'amplitudes comme indiqué sur la figure III.12 (gigue d'amplitude) mais les signaux conservent malgré ces perturbations un coefficient de qualité > 6 acceptable en télécommunication optique.

5.1 Influence de la distance de propagation sur le coefficient de qualité Q.

On a mis en œuvre un programme permettant de visualiser la courbe de variation du coefficient de qualité Q moyen des 32 canaux en fonction de la distance de propagation représentée sur la figure 3.12. Celle-ci montre que la valeur du coefficient de qualité moyen diminue lorsque la distance augmente et qu'à 5000 Km la valeur de Q_{moy} est égale 14.

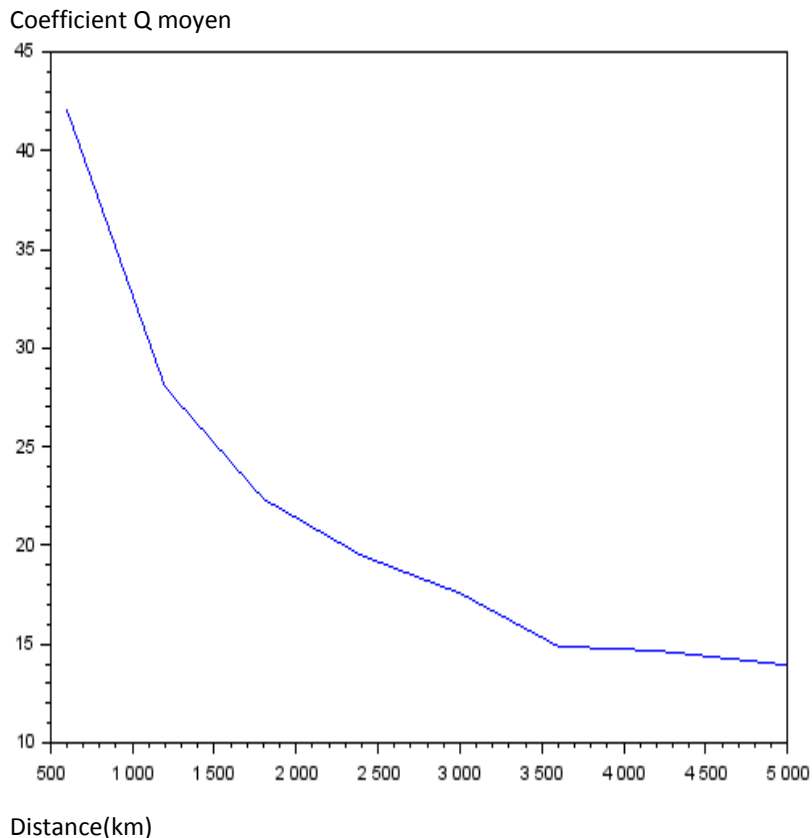


Figure 3.13 : courbe de variation du coefficient de qualité Q en fonction de la distance de propagation représentée

6. Conclusion

Dans cette simulation on a exploité les caractéristiques de l'impulsion similariton pour générer une source continuum couvrant la fenêtre de la communication optique basée sur le spectre de similariton. Une source multi-longueurs d'ondes est obtenue après découpage spectral du continuum par un multiplexeur de bande passante 50 GHz, avec espacement entre canaux de 0.2nm, et une superposition de 32 canaux sont générés dans

la gamme de la bande des télécommunications Optiques. Dans ces conditions une portée (en terme de longueur de fibre) de 5000 km est atteinte.

Conclusion générale

Le similariton optique est une impulsion qui est progressivement générée dans une fibre optique par combinaison des effets liés au gain, à la dispersion normale et à la non-linéarité. C'est une impulsion optique avec un profil d'intensité parabolique et une dérive de fréquence linéaire. Cette impulsion parabolique évolue de manière auto-similaire, subissant une croissance exponentielle de ses largeurs temporelle et spectrale et de son amplitude. L'acquisition de ce profil parabolique par une impulsion ne dépend ni de la structure de son enveloppe, ni de sa phase, mais uniquement de son énergie initiale. Cette impulsion possède des propriétés fondamentales remarquables, comme la forme parabolique, résistance au wavebreaking, auto-similarité, sa dérive de fréquence (chirp) linéaire, et son large spectre. Ces caractéristiques de restructuration des enveloppes temporelle et spectrale ainsi que de la phase de l'impulsion, rendent les similaritons aptes à une utilisation dans le domaine des télécommunications optiques. L'objectif de ce mémoire de master est de montrer de quelle manière on remplace les diodes laser utilisées fréquemment comme porteuses de données dans les systèmes WDM classiques par une source continuum à similaritons optiques.

Pour cela, dans une première partie de ce manuscrit, après avoir exposé une présentation générale des systèmes de transmission optique, nous nous sommes occupés surtout de la qualité du signal optique émis par les diodes lasers et des limitations de ce type de composants telles que le chirp, la variation de la longueur d'onde d'émission avec la température, ce qui rend les longueurs d'ondes fournies par le système de transmission optique instables et donc inacceptables par WDM. Pour éviter ces limitations, la solution proposée est de remplacer les diodes lasers par une seule source étendue appelée source continuum à similariton. La génération de ce type source est traitée par le deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre, la simulation montre qu'à partir d'une seule source optique, il est possible de générer un continuum définie sur la bande C avec une densité spectrale de puissance la plus plate possible. Le découpage spectral de celui-ci par un démultiplexeur optique permet d'obtenir les 32 canaux nécessaires au système U-DWDM. Dans ces conditions une portée (en termes de longueur de fibre) de 5000 km est atteinte avec un

Q=12. Les résultats obtenus montrent la résistance de ce système durant une distance de propagation supérieur à 6000 km .

Références Bibliographiques

- [1] Olivier Bouchard, «*Etude de diodes laser à cavité planaire entièrement définie par cristal photonique : nouvelle approche pour le contrôle de l'émission*», thèse de doctorat, université de Toulouse, 2008
- [2] M. E. Fermann, V. I. Kruglov, B. C. Thomsen, J. M. Dudley, and J. D. Harvey, «*Self-Similar Propagation and Amplification of Parabolic Pulses in Optical Fibers*», *Physical Review Letters*, 84 (26), p 6010-6013, 2000.
- [3] 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.
- [4] Minh Nguyet Ngo, «*Theoretical and Experimental Studies of Semiconductor Based Photonic Devices for All-Optical Signal Processing at 40 Gbit/s and Beyond* », thèse de doctorat , université de Rennes, 2010.
- [5] O. Leclerc, B. Lavigne, E. Balmeffre, P. Brindel, L. Pierre, D. Rouvillain, and F. Segueineau, «*Optical Regeneration at 40 Gbit/s and Beyond*», *J. of Lightwave Technol.* 21 (11), p 2779–2790, 2003.
- [6] C. Finot, G. Millot, and J.M. Dudley. «*Asymptotic characteristics of parabolic similariton pulses in optical fiber amplifiers*». *Optics Letters*, 29 (21), p 2533–2535, 2004.
- [7] C. Finot, S. Pitois, and G. Millot, «*Regenerative 40-Gb/s wavelength converter based on similariton generation*», *Opt. Lett.* 30, p. 1776-1778, 2005.
- [8] Denis Penninckx, «*Étude des liaisons numériques terrestres sur fibres optiques dispersives : du codage duobinaire aux transmissions binaires à profil de phase contrôlé (PSBT)*», thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure des télécommunications, Paris, 1997.
- [9] G. Charlet, P. Tran, H. Maroyan, M. Lefrançois, T. Fauconnier, S. Bigo, «*151*43 Gbit/s transmission over 4080 km based on return-to-zero-Differential quadrature phase-shift keying*», *European Conference on Communications, ECOC*, 2005.
- [10] A.H. Gnauck, G. Raybon, S. Chandrasekhar, J. Leuthold, C. Doerr, L. Stulz, E. Burrows, «*25* 40 Gbit/s copolarised DPSK transmission over 12*100km NZDSF with 50 GHz channel spacing*», *IEEE Photonics Tech. Letters*. 15 (3), p 467-469, 2000.
- [11] Mathieu Lefrançois «*Etude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s*», thèse de doctorat, université Paris-Sud, 2007.
- [12] Peterman K., «*Laser diode modulation and noise*», Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [13] G.P. Agrawal. «*Nonlinear Fiber Optics*». Academic Press, third edition, 2001.
- [14] G. P. Agrawal, «*Fibre-optic communication system* » 3rd Ed., 2002.
- [15] C. D. Poole et R. E. Wagner, «*Phenomenological approach to polarization dispersion in single mode fibers* », *Electron. Lett.*, 22, p 1029, 1986.
- [16] F. Benabid et P.J. Roberts, «*Linear and nonlinear optical properties of hollow core photonic crystal fiber*», *Journal of Modern Optics*, 58 (2), p 87–124. 2011.
- [17] Ferrarini, «*Leakage properties photonic crystal fibers*», *Optics Express*, 10, p. 1314, 2002.
- [18] W. Belardi, J. Lee, K. Furusawa, Z. Yusoff, P. Petropoulos, M. Ibsen, T. Monro, Richardson, «*A 10 Gbit/s tuneable wavelength converter based on four-wave mixing in highly nonlinear holey fibre*», *ECOC*, p. PDI–2, 2002.
- [19] V. Finazzi, T.M. Monro, et D. Richardson, «*Confinement loss in highly nonlinear holey optical fibres*», *OFC*, p. 524, 2002.
- [20] H. Ohta, N. Banjo, N. Yamada, S. Nogiwa, Y. Yanagisawa, «*Measuring eye*

diagram of 320 Gbit/s optical signal by optical sampling using passively modelocked fibre laser», IET, 37 (25), p 1541-1542, 2001.

[21]: K.K .Chow, Y.Takushima, C. Lin, C. Shu and A. Bjarklev, Electronics Letters, vol 42, 2006.

[22]: F.Begum, Y.Namihira, T.Kinjo and S. Kaijage, Electronics Letters, vol 46, 2010.

[23]: Jian Li, Junming An, Junlei Xia, Hongjie Wang, Xiongwei Hu, Optical Engineering, 2005/Vol. 44(6).

[24]: M. E. Fermann, V. I. Kruglov, B. C. Thomsen, J. M. Dudley, and J. D. Harvey, Phys. Rev. Lett., vol. 84, pp. 6010-6013, 2000.

[25]: G. P. Agrawal. Nonlinear fiber optics. Academic Press, 2001.

[26]: C. Finot, G. Millot, C. Billet, J. M. Dudgey, Opt. Express 11(2003) 1547.

[27]: Jun Takayangi, Norihiko Nishizawa, . Optical society of America, (2006).

[28]: Graini Leila, Saouchi Kaddour, These de Doctorat, Universite de Badji Mokhtar, Annaba, 2017