

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique

جامعة ابي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Télécommunications

Spécialité : Système des Télécommunications

Par :BOUREGAA Abdelkader

Sujet

Etude d'une liaison optique avec régénération 3R basé sur
XPM pour un signal RZ

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

Mr : BOUSAHLA Miloud	MCB	Université de Tlemcen	Président
Mr : BERKAT Abdellatif	MCA	Université de Tlemcen	Examinateur
Mr : BORSALI Ahmed Riad	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement :

Tout d'abord, je remercie Allah tous puissant qui m'a aidé de revenir au classe d'études ; j'exprime ma profonde reconnaissance et gratitude à tout l'ensemble du staff de la faculté de technologie à leur tête Mr :IRID Mohamed el-Hadj de leur soutient de tout genres inlassable , ainsi que l'ensemble des enseignants pour leur compréhension, leur patience et leur encouragement.

Je tiens à remercier également les membres de juré qui ont accepté de juger ce modeste travail, sans oublier mon encadreur Mr Borsali pour ses valeureuses conseilles et sa patience.

Je tiens à remercier également mon petit frère Abde Rahmane qui n'a épargné aucun effort pour m'en arrivée à cet instant.

Je tiens à remercier tous qui m'ont aidé du près ou du loin.

Dédicace

*Je dédie ce travail à l'âme de mon
père, à ma chère maman, ma petite
famille ainsi que tous qui ont cru en
ma personne.*

Résumé:

L'utilisation de la fibre optique ne cesse de gagner du terrain notamment dans le domaine des télécommunications, seulement, avec l'évolution et l'extension des réseaux, des effets incontournables dites non linéaires et même hautement non linéaires sont induites et donnent naissance à des phénomènes dus à l'interaction entre la lumière et le matériau milieu de propagation qui affectent la qualité du signal à la réception dont il y a les effets Kerr qui donnent naissance à des phénomènes incontournables telles la modulation de phase croisée, l'auto modulation et le mélange à quatre ondes.

De nouvelles techniques ont été développées pour remédier à ces imperfections et réduire leurs impacts sur la qualité du signal, d'une part, d'autre part ces défauts ont été utilisés dans de nouvelles conceptions et réalisations en introduisant des composants de correction tels que les régénérateurs 3R et les filtres optiques.

Mots clés : Fibres non linéaires, fibres hautement non linéaires, effets non linéaires dans la fibre optique, modulation RZ et NRZ dans la fibre optique, modulation de phase croisée dans la fibre optique, auto modulation dans la fibre optique.

Abstract:

The use of fiber optics continues to gain ground, particularly in the field of telecommunications, only with the evolution and extension of networks, unviable effects called non-linear and even highly non-linear are induced and give rise to phenomena due to the interaction between light and propagation medium material which affect the quality of the signal on reception, including the Kerr effects which give rise to unviable phenomena such as cross-phase modulation, self-modulation and four wave mixing. New techniques have been developed to remedy these imperfections and reduce their impact on the quality of the signal, on the one hand, on the other hand these defects have been used in new designs and realizations by introducing correction components such as 3R regenerators and optical filters.

Keys world: non-linear optical fiber, highly non-linear optical fiber, XPM, SPM, RZ and NRZ modulation.

ملخص

يستمر استخدام الألياف البصرية في التزايد خاصة في مجال الاتصالات، مع تطور و توسيع الشبكات ظهرت تأثيرات تسمى التأثيرات غير الخطية و حتى غير الخطية للغاية أدت إلى ظهور ظواهر بسبب التفاعل بين الضوء و وسط الانتشار و التي تؤثر على جودة الإشارة عند الإستقبال مثل التشكيل عبر الطور المتعاكس وتشكيل الطور الذاتي و كذلك خط أربع أمواج. تم تطوير تقنيات جديدة لمعالجة هذه العيوب وتقليل تأثيرها على جودة الإشارة من ناحية أخرى إستغلالها إيجابيا في تصميمات و إنجازات جديدة من خلال إدراج مكونات للتعديل مثل المضخمات 3R والمرشحات الضوئية.

Liste des figures

- Figure 1.1 : Schéma descriptif de la chaîne de transmission par fibre optique (p.16).
- Figure 1.2 : Schéma général d'un émetteur optique (p.17).
- Figure 1.3 : Schéma synoptique d'un modulateur direct (p.18).
- Figure 1.4 : Schéma de principe d'une modulation externe (p.19).
- Figure 1.5 : Schéma de principe d'un récepteur optique (p.20).
- Figure 1.6 : Présentation de la fibre optique (p.21).
- Figure 1.7 : Schéma présentant l'approche de Snell-Descartes (p.21).
- Figure 1.8 : Propagation dans la fibre à saut d'indices (p.22).
- Figure 1.9 : Propagation dans une fibre à gradient d'indices (p.22).
- Figure 1.10 : Propagation dans une fibre monomode (p.22).
- Figure 1.11 : La dispersion dans la fibre optique (p.24).
- Figure 1.12 : Atténuation du signal numérique dans la fibre optique (p.26).
- Figure 1.13 : Différents types de pertes et leurs causes (p.26).
- Figure 1.14 : Atténuations intrinsèques des fibres en fonction de la longueur d'onde (p.27).
- Figure 1.15 : Principe de fonctionnement de la DCF (p.28).
- Figure 1.16 : Schéma de principe d'amplificateur optique (p.29).
- Figure 1.17 : Multiplexage / Démultiplexage TDM (p.30).
- Figure 1.18 : Multiplexage / Démultiplexage WDM (p.31).
- Figure 2.1 : Présentation de deux signaux modulés en RZ et NRZ (p.35).
- Figure 2.2 : Schéma de principe d'un régénérateur 2R (p.37).
- Figure 2.3 : Schéma de principe d'un régénérateur 3R (p.37).
- Figure 2.4 : Classification des effets non linéaires (p.38).
- Figure 3.1 : Exemple de diagramme de l'œil d'un signal NRZ (p.46).
- Figure 3.2.a : Exemple de formes de fibre microstructure (p.50).
- Figure 3.2.b : Fibre PCF de forme hexa (p.50).
- Figure 3.3.a : Schéma du système à étudier (p.52).
- Figure 3.3.b : Schéma synoptique du système à étudier (p.52).
- Figure 3.4.a : Représentation fréquentielle du signal origine (p.54).
- Figure 3.4.b : Représentation temporelle du signal origine (p.54).
- Figure 3.5.a : Représentations fréquentielle du signal après filtrage (p.55).
- Figure 3.5.b : Représentation temporelle après filtrage (p.55).
- Figure 3.6 : Représentation du signal transmis à l'entrée du premier bloc récepteur (p.55).
- Figure 3.7.a : Signal à la sortie après filtrage (représentation temporelle) (p.56).

Figure 3.7.b : Signal à la sortie après filtrage (représentation fréquentielle) (p.56).

Figure 3.8.a : Filtrage du signal à la sortie de la diode PIN (représentation fréquentielle) (p.56).

Figure 3.8.b : Filtrage du signal à la sortie de la diode PIN (représentation temporelle) (p.56).

Figure 3.9.a : Signal composite (en longueur d'onde) à la sortie du coupleur (p.57).

Figure 3.9.b : Représentation temporelle du signal composite (amplifié et régénéré) (p.57).

Figure 3.10.a et b : Représentation du signal à la sortie de la FHNL

$$(L = 1.007 \text{ km} ; n_2 = 35.462 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{w} \text{ et } G=13 \text{ dB}) \text{ (p.58).}$$

Figure 3.11.a et b : Représentation du signal à la sortie de la FHNL

$$(L = 10 \text{ km} ; n_2 = 35.462 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{w} \text{ et } G=10 \text{ dB}) \text{ (p.58).}$$

Figure 3.12.a et b : Représentation du signal à la sortie de la FHNL

$$(L=10\text{km}, n_2= 26.462 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{w} \text{ et } =17 \text{ dB}) \text{ (p.59).}$$

Figure 3.13.a et b : Allure du signal après filtrage (filtre passe bande) (p.59).

Figure 3.14 : Allure du signal après conversion Optique-électrique (p.59).

Figure 3.15 : Allure du signal après filtrage passe bas (p.59).

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Récapitulatif des caractéristiques des fenêtres de fibre homologuées (p.27).

Tableau 2 : Les caractéristiques des différents types de modulation WDM (p.31).

Tableau 3 : Exemples de fibres Chalcogénure ainsi que leurs caractéristiques (p.50).

Liste des acronymes :

CDMA : Code Division Modulation Acces.
C-WDM: Coarse Wave Division Modulation.
DCF: fibre compensatrice de dispersion.
D-WDM: Dense Wave Division Modulation.
EDFA: Erbium Dopped Fiber Amplifier.
ESA : Bruit Optique d'Emission Spontanée Amplifié.
FHNL : Fibre Hautement Non Linéaire.
FWM: Four Wave Modulation.
I-FWM: Intra channel FWM.
IUT: International Union Telecommunication.
I-XPM: Intra channel XPM.
LiFi: Light Fidelity.
NRZ: Non Retour à Zéro.
OOC: Codes Optiques Orthogonaux.
OOK: On-Of Keying.
OTDM: Optical Time-Division Multiplexing.
OTDR: Optical Temporal Domain Reflect meter.
PCF: Fibre à Cristal Photonique.
PEB : Taux d'erreur binaire.
QoS: Quality of Service.
SESA: Densité Spectral de Bruit
SM28:Single Fiber-28.
SPM: Self Phase Modulation.
TDM: Time Division Multiplexing.
VCSEL: Diode Laser à Cavité Verticale Emettant par Surface.
WDM: Wave Division Multiplexing.
XPM: Croised phase Modulation.

Table des matières

Introduction générale.....	12
Chapitre I étude d'une liaison par fibre optique.....	15
I.Introduction.....	16
II. Description de la ligne de transmission à fibre optique.....	17
II.1 Emetteur optique.....	17
II.1.1. Source optique.....	17
II.1.1.1. Diode électroluminescente LED.....	17
II.1.1.2. Diode laser LD.....	17
II.1.2. Modulateur optique.....	18
II.1.2.1. modulation directe.....	18
II.1.2.2. Modulation externe.....	18
II.1.2.3. Modulateur de Mach-Zehnder.....	19
II.1.3. Récepteur optique.....	19
II.1.3.1. Définition.....	19
II.1.3.2. Caractéristiques de la photodiode.....	20
II.2. Fibre optique.....	20
II.2.1. Présentation de la fibre optique.....	20
II.2.2. Différents types de la fibre optique.....	21
II.2.2.1. Fibre optique multimode.....	21
II.2.2.1.1. Fibre optique multimode à saut d'indice.....	22
II.2.2.1.2. Fibre optique multimode à gradient d'indice.....	22
II.2.2.2. Fibre monomode.....	22
II.2.3. Caractéristiques de la fibre optique.....	23
II.2.3.1. Débit.....	23
II.2.3.2. Bande passante.....	23
II.2.3.3. Dispersion.....	24
II.2.3.3.1. Dispersion chromatique.....	24
II.2.3.3.2. Dispersion intermodale.....	25
II.2.4. Atténuation.....	25
II.2. 5. Remèdes aux imperfections affectant la fibre optique.....	27
II.2.5.1. Fibre compensatrice de la dispersion DCF.....	28
II.2.5.2. Amplificateur optique.....	28
II.2.5. 2.1. Principe de fonctionnement d'un amplificateur optique.....	28
II.2.5.2.2. Amplificateur à fibre dopée à l'erbium EDFA.....	29
II.2.5.3. Augmentation du débit.....	29
II.2.5.4. Multiplexage.....	30
II.2.5.4.1. TDM Time Division Multiplex.....	30
II.2.5.4.2. WDM Wave Division Multiplex.....	30
II.2.5.4.3. CDMA.....	31
III. Avantages de la fibre optique.....	32
IV. Conclusion.....	32
Chapitre II : les non linéarités dans la fibre optique.....	34
I.Introduction.....	35
I.1. Modulation NRZ (Non Retour à Zéro).....	35
I.1.2. Modulation RZ (Retour à Zéro).....	35
II. Régénérateurs optiques.....	36
II.1. Régénérateur 1R.....	36
II.2. Bruit optique d'émission spontanée amplifié (ESA).....	36
II.3. Régénérateur 2R.....	37
II.4. Régénérateur 3R.....	37
III.5. Non linéarité.....	37

III.1. Effets non linéaires.....	38
III.1.1. Effets dus à la diffusion stimulée.....	38
III.1.1.1. Diffusion de Raman.....	38
III.1.1.2. Domaines d'application de la diffusion de Raman	39
III.1.1.3. Diffusion de Brillouin.....	39
III.1.2. Effets dus à l'indice de réfraction non linéaire.....	39
III.1.2.1 Effets Kerr.....	39
III.1.2.1.1. Auto modulation (Self Phase Modulation).....	40
III.1.2.1.2. Domaines d'application de l'auto modulation de phase.....	40
III.1.2.1.3. Mélange à quatre ondes FWM.....	40
III.1.2.1.4. Domaines d'application de la FWM.....	40
III.1.2.1.5. La modulation de phase croisée XPM	41
III.1.2.1.6. Caractéristiques de la modulation XPM.....	41
III.1.2.1.7. Défauts de la modulation XPM.....	41
III.1.2.1.8. Domaines d'application de la modulation XPM.....	41
IV. Conclusion.....	42
Chapitre III : Etude d'un signal modulé en XPM avec et sans régénération 3R.....	43
I. Introduction.....	44
II. logiciel de simulation OptiSystem.....	44
II.1. présentation.....	44
II.2. Caractéristiques de l'OptiSystem.....	44
II.3. Avantages du logiciel.....	44
II.4. Modes de simulation.....	45
II.5. OptiSystem version 17.1.....	45
III. Qualité de service.....	45
III.1. Définition.....	45
III.2. Paramètres de qualité de service.....	46
III.2.1. Taux d'erreur binaire.....	46
III.2.2. Diagramme de l'œil.....	46
III.2.3. La pénalité.....	47
IV. Simulation.....	47
IV.1. But de la simulation.....	47
IV.2. Fibres hautement non linéaires.....	47
IV.2.1. Présentation.....	47
IV.2.2. Caractéristiques de la fibre hautement non linéaire.....	48
IV.2.3. Domaines d'application de la fibre hautement non linéaire.....	48
IV.2.4. Défauts de la fibre hautement non linéaire.....	49
IV.2.5. Types des fibres hautement non linéaires.....	49
IV.2.5.1. Fibres Télécoms.....	49
IV.2.5.2. Tapers de fibre SMF28	49
IV.2.5.3. Fibre à base de verre non Silice.....	49
IV.2.5.4. Fibre Microstructurée aire-silice.....	50
IV.2.5.5. Caractéristiques de la fibre Microstructurée.....	50
IV.3. Filtrés optiques.....	51
IV.4. caractéristiques des filtres optiques.....	51
IV.5. Description du système.....	52
IV.5.1. Description du bloc émetteur	53
IV.5.2. Description du premier étage récepteur.....	53
IV.5.3. Description du deuxième étage récepteur.....	53
IV.6. Interprétation de la simulation.....	54
IV.6.1. Au niveau de l'émetteur.....	54
IV.6.2. Au niveau du premier étage récepteur (sans régénération).....	55
IV.6.3. Au niveau du deuxième étage récepteur (après régénération).....	57

IV.7. Conclusion.....	61
V. Conclusion générale.....	62
VI. Références bibliographie.....	64

Introduction générale

Introduction générale

Quel que soit le niveau de transmission ou la mission pour la quelle il a été conçu, un réseau de transmission est composé d'un émetteur, d'un récepteur et d'un support de transmission véhiculant l'information et les réseaux optiques font partie.

Depuis son apparition dans le XX^{ème} siècle, la fibre optique n'a cessé de conquérir tous les domaines notamment les transmissions de plus en plus vite son débit/s et sa bande passante qui peut atteindre les Téra Bit voir illimitée ; ces avantages capitaux ont permis son utilisation dans les domaines et secteurs gourmands en bande passante qui ne cesse de s'accroître avec les différentes applicatives tel que les séquences vidéo en temps réel et les multimédias...

La découverte de nouvelles techniques de traitement de la fibre optique tel que les différents types de modulation, de multiplexage, la découverte de nouveaux composants optoélectroniques notamment la DCF servant à la compensation de la dispersion un des inconvénient majeurs qui peut nuire à la transmission via la fibre optique, ainsi que les amplificateurs optiques et les régénérateurs permettant de parcourir de grandes distances ont fait de la fibre optique un support de transmission avec excellence.

Des phénomènes intrinsèques affectent les différentes composantes de lignes de transmission à fibre optique provoquant des non-linéarités dont elles limitent les performances de la fibre optique, à cet effet, des techniques sont et seront développées pour dresser ces non-linéarités pour profiter le maximum des réseaux à fibre optiques. La modulation de phase croisée est une des dites techniques.

Dans ce modeste travail intitulé « Etude d'une liaison optique avec générateur 3R basée sur XPM (modulation de phase croisée) pour un signal RZ » on va étudier une des techniques diverses des liaisons à fibres optiques, déterminer les irrégularités engendrées par la non linéarité qui affecte ces fibres et enfin d'exploiter positivement ces défauts telle que la modulation de phase croisée « XPM » dans le but de les utiliser pour la conception de diverses réalisations, applications, ou solutions. Mais avant d'entamer le sujet on va étudier dans le premier chapitre et d'une manière générale une liaison à fibre optique où on décrit les différentes étages (composantes) dans une telle liaison ainsi que leurs caractéristiques techniques notamment le débit et la bande passant, les phénomènes limitant leurs efficacités tel que l'atténuation et la dispersion, leurs causes et les remèdes pour amortir leurs impacts sur la qualité de la transmission; puis dans le deuxième chapitre on va présenter les effets non linéaires qui peuvent affecter les différentes composantes dans toute la ligne de transmission par fibre optique non linéaire et même hautement non linéaire, leurs causes et leurs impacts sur la génération d'autres phénomènes tel que l'effet Kerr et l'effet Raman qui peuvent induire à leurs tours d'autres phénomènes notamment l'auto modulation, la modulation de phase croisée et le mélange de quatre ondes, leurs causes et leurs avantages ainsi que leurs

défauts et on va étudier également les trois types de régénérateurs (1R, 2R et 3R), les solutions apportées par chaque type de ces régénérateurs en termes de correction des erreurs induites et on va terminer notre modeste travail par une simulation en utilisant l'outil de simulation OptiSystem.

Chapitre I

Etude d'une liaison par fibre optique

I / Introduction :

Dans un milieu de propagation, une onde électromagnétique est définie par son champ électrique \vec{E} et son champ magnétique \vec{H} perpendiculaire entre eux et perpendiculaire eux même à la direction de propagation, seulement en optique, les milieux de propagation isotrope sont non magnétiques et l'onde est définie par son champ électrique \vec{E} caractérisé par sa pulsation ω , sa fréquence ν et sa période T .

Dans le domaine optique l'information à transmettre va être codée convertie en un signal lumineux puis modulée dans une première étape au niveau du bloc émetteur, par la suite le signal résultant sera injectée dans la fibre optique suivant des règles bien strictes afin d'avoir le maximum d'énergie (informations) le signal en question va se propager dans la fibre optique quelque soit son type, monomode pour les grandes distances ou multimode pour les courtes distances néanmoins, durant sa propagation dans la fibre optique, le signal va subir de certaines atténuations et déformations affectant directement la portée et la qualité du signal à la sortie qui peuvent induire à leurs tours des erreurs à la réception ; des régénérateurs , amplificateurs et DCFs (fibres compensatrices de dispersions chromatique ou modale) sont installés le long de la ligne de transmission à des distances étudiées pour la correction des erreurs induites et l'amplification du signal porteur de l'informations ; à la réception s'est installé un filtre passe bande dont la fréquence de coupure est centrée au tour de fréquence du signal dans le but d'éliminer les signaux indésirables (bruits induits par différents sources) puis le signal sera converti en signal électrique pour extraire l'information d'origine ; le schéma de la figure 1.1 décrit les composant d'une ligne de transmission d'une manière générale.

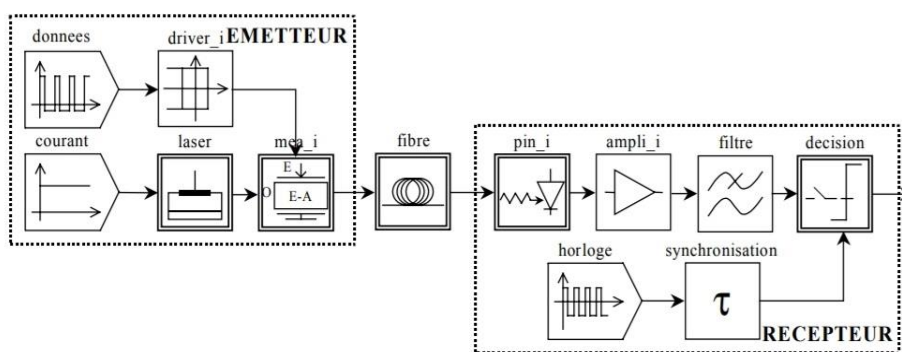


Figure : 1.1 Schéma descriptif de la chaîne de transmission par fibre optique.

La fibre optique est un support qui peut véhiculer un grand débit d'informations ou proprement dit un débit d'informations illimité et la tendance actuelle des efforts de recherches se penche vers la découverte de nouveaux équipements d'extrémité c.à.d. composants qui permettent une utilisation optimale de ce support.

II/ Description de la ligne de transmission à fibre optique :

II.1. Emetteur optique :

L'émetteur est la partie qui a pour mission de convertir le signal électrique en un signal optique (figure 1.2), il est constitué de la source optique qui est une diode électroluminescente (LED ou DL qu'on va les décrire par la suite) suivit d'un modulateur (direct ou externe) qui permet de graver le signal électrique (l'information) sur le signal optique, le coupleur sert à injecter le signal lumineux dans la fibre optique tout en respectant des critères et des conditions strictes de telle sorte que le maximum de puissance sera injecté à l'intérieur du cœur de la fibre.

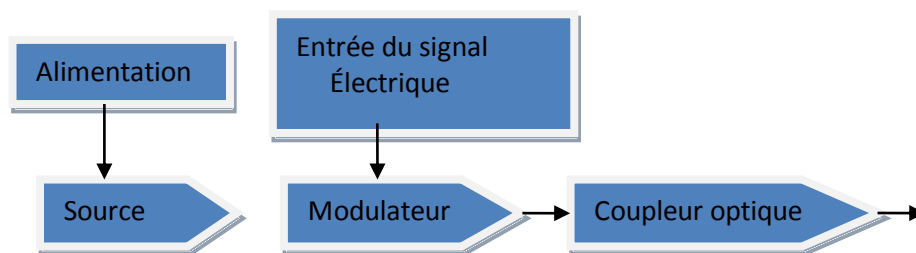


Figure 1.2 : Schéma général d'un émetteur optique

II.1.1. Sources optique :

Les sources optiques sont fabriquées à base de semi-conducteurs capables de convertir un signal électrique en une onde optique mais avec un rendement acceptable tout en assurant un bon couplage avec la fibre.

Dans le domaine des télécommunications, les sources optiques utilisées sont classées en deux catégories [1] suivant leurs caractéristiques qui déterminent par la suite leurs domaines d'emploi

- ❖ Longueur d'onde ;
- ❖ Bande passante ;
- ❖ L'élargissement de son spectre optique ;
- ❖ La puissance de sortie.

II.1.1.1 Diodes électroluminescentes LED :

Les diodes électroluminescentes LED sont des sources incohérentes caractérisées par leur spectre optique assez large, émettant autour des longueurs d'ondes de 850 nm et 1300nm, elles sont caractérisées également par une bande passante relativement amoindrie par rapport à la diode laser et un débit de l'ordre de dizaines de GBit/s, elles sont utilisées dans les réseaux de transmission à fibres optiques multimodes et à des courtes distances)[2]

II.1.1.2. Diodes Lasers DL :

Les diodes lasers sont les plus utilisées dans les télécommunications, elles sont caractérisées par leur très petite taille qui facilite leur couplage avec le cœur de la fibre, elles sont

caractérisées également par leur spectre optique relativement étroit (inférieur à 1 nm), leur faible consommation énergétique, une grande rapidité de commutation ainsi qu'une forte puissance d'émission autour des longueurs d'onde de 1300 nm et 1550 nm, elles sont utilisées dans les réseaux à fibres optiques monomodes ; il y a deux types qui sont les plus connus qui sont Fabry-Pérot (FP) et Distributed Feedback (DFB)[2]

Cependant les lasers génèrent des fréquences optiques imparfaites affectées par des bruits d'amplitude qui limitent leurs performances.

II.1.2. Modulateur optique :

Un modulateur optique est un dispositif qui sert à convertir le signal électrique en un signal optique autrement dit il modifie le signal lumineux par son amplitude, sa phase, sa fréquence en fonction d'un signal de commande ; cette modification est pilotée par le courant injecté dans la diode [3]; il y a deux techniques de modulation optique utilisées :

II.1.2.1. Modulation directe :

Dans ce type de modulation, le courant injecté en entrée de la diode (à l'intérieur de la source optique) va être directement modulé en amplitude, c'est la plus simple pour générer une onde optique modulée. Il est à noter que plus le courant reçu par la diode est important, plus l'intensité lumineuse qu'elle délivrera sera puissante. La diode VCSEL est l'une des diodes lasers les plus utilisées pour ce type de modulation vue sa faible consommation en énergie, sa grande vitesse de fonctionnement ainsi que son faible coût.

Le principe de fonctionnement de la modulation directe est décrit dans la figure 1.3 ; le driver sert à commander la puissance du faisceau émis par la source optique en fixant les valeurs du courant généré.

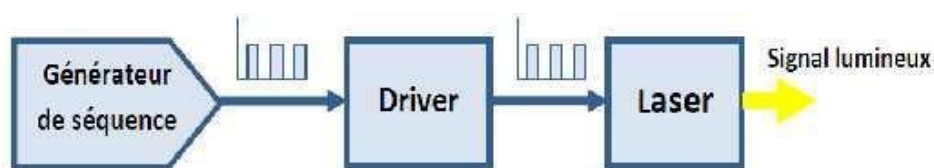


Figure 1.3 : schéma synoptique d'un modulateur direct

La modulation directe est souvent accompagnée d'une modulation parasite induite par la diode d'une part et d'autre part elle est mauvaise en terme des débits (ne peut pas atteindre des débits plus élevés au-delà de 5 GBit/s, à cet effet l'emploi de cette technique est réduit).[4]

II.1.2.2. Modulation externe :

Cette technique consiste à moduler directement le faisceau lumineux à la sortie de la diode laser et non pas à son entrée ce qui écarte les défauts engendrés par la dite diode de les graver sur

le signal lumineux, d'où le signal transmis dans la fibre est moins affecté par l'effet chirp, dans ce type de modulateur, dont le principe est décrit dans la figure 1.4.

Le driver dans cette configuration sert à fixer les niveaux de $v(t)$ qui représente l'information et par conséquent il commande le modulateur externe ; le modulateur Mach-Zehnder et le modulateur à électro-absorption sont deux types de modulateurs adaptés à cette technique.

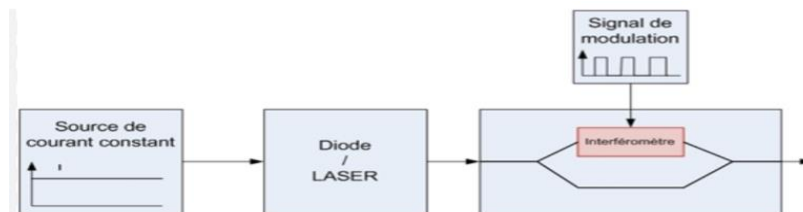


Figure 1.4 : Schéma de principe d'une modulation externe.

II.1.2.3. Modulateur de Mach-Zehnder :

Le modulateur Mach-Zehnder est un exemple de modulateur externe, c'est un interféromètre à deux ondes, il est constitué de deux bras recevant chacun la moitié de la puissance lumineuse à l'entrée. L'indice de réfraction de l'une des cellules placées sur l'un des bras, est modifié par l'application d'une tension, provoquant ainsi un déphasage entre les deux faisceaux. Ce déphasage est converti en variation d'intensité du signal optique par l'interférence entre les signaux déphasés issus des deux bras. Suivant leur différence de phase relative, les deux interfèrent de manière constructive, et ainsi la totalité de la puissance optique est disponible en sortie de l'interféromètre.[5].

A la réception c.à.d. la démodulation se fait par un démodulateur différentiel.

II.1.3. Récepteur optique :

II.1.3.1 Définition :

Le récepteur est un circuit capable d'extraire l'information d'origine du signal émis, c.à.d. de convertir le signal lumineux en un signal électrique puis le démoduler pour avoir par la suite l'information et c'est grâce à l'effet photovoltaïque quand la jonction P-N (photodiode) est exposée à un signal lumineux mais avant la restitution de l'information comme, il est impératif d'éliminer les signaux parasites en utilisant un filtre placé avant l'étage récepteur (figure 1.5) ; il existe plusieurs types de photodiodes destinées à une telle fonction dont on peut citer la Photodiodes PN, la photodiode PIN, la Photodiode Schottky et la photodiode à avalanche seulement le choix de la photodiode adéquate est soumis à des conditions telles que[6] :

- La sensibilité à la longueur d'onde du signal émis ;
- La rapidité de conversion ;
- Rendement quantique ;
- Le rapport signal sur bruit (SNR).

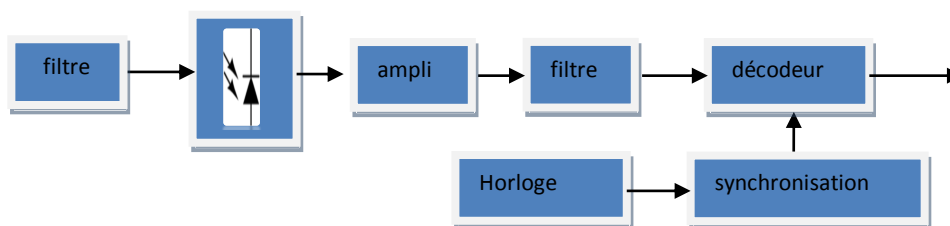


Figure 1.5: Schéma de principe d'un récepteur optique

II.1.3.2. Caractéristiques de la photodiode :

La photodiode est un composant à semi-conducteur (en silicium) polarisé en inverse pour produire du courant quand la diode est excitée par la lumière. La photodiode PIN et les photodiodes à avalanche sont les plus utilisées en télécommunication [7] vue leurs :

- Rapidité de détection des signaux très faibles ;
- Rendement quantique contrairement aux photodiodes PN ;
- Bande passante.

II.2. Fibre optique :

II.2.1. Présentation de la fibre optique:

La fibre optique telle qu'elle est présentée dans la (figure1.6),est un guide d'onde lumineux de géométrie simple , elle est constituée d'un cylindre de silice ou de plastique d'indice de réfraction n_1 appelé cœur et c'est le milieu de propagation, de diamètre de l'ordre de $9\ \mu\text{m}$ pour les fibres monomodes et de l'ordre de $50\ \mu\text{m}$ à $100\ \mu\text{m}$ pour les fibres multimodes, entouré par un autre cylindre d'indice de réfraction n_2 appelé gaine tel que $n_1 > n_2$, pour permettre de confiner la lumière dans le cœur tout en respectant les conditions de propagation à savoir :

➤ Les lois de Snell-Descartes donnée par la relation :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad 1.1$$

où : n_1 et n_2 représentent les indices de réfraction du Cœur et la gaine respectivement et sont donnés par la relation :

$$n = \sqrt{\epsilon \cdot \mu / \epsilon_0 \mu_0} \quad 1.2$$

i_1 et i_2 représentent les angles d'incidence et de réfraction tel s'est présenté sur (la figure 1.7).

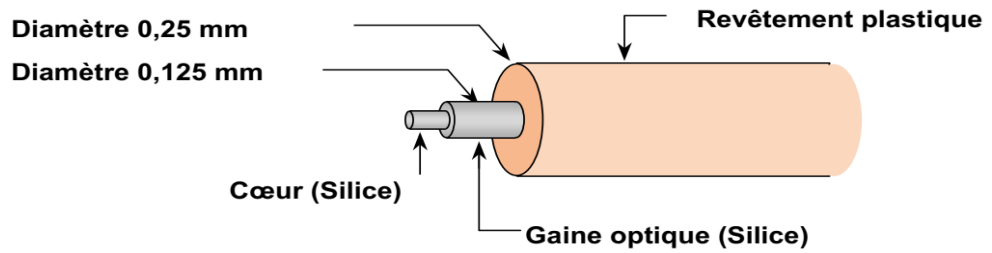


Figure 1.6 : présentation de la fibre optique.

L'ouverture numérique : définie l'angle maximum limite formé entre l'axe de la fibre et le rayon lumineux porteur de l'information généré par la source, elle est donnée par la relation :

$$ON = \sin \alpha_{\max} = n_1 \sin (\pi/2 - \theta_{1 \text{ lim}}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad 1.3$$

Le revêtement extérieur en plastique sert à assurer une meilleure couverture mécanique pour la fibre optique.

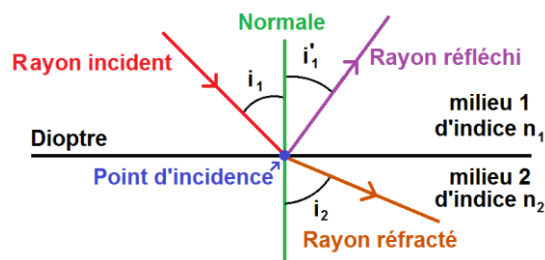


Figure 1.7 : schéma présentant l'approche de Snell-Descartes

II.2.2. Différents types de fibres optiques :

La fibre optique est classée en deux types dont chacun possède ses caractéristiques propres qui définissent par la suite son domaine d'utilisation à savoir le débit, la bande passante et la portée.

II.2.2.1. Fibre multimode:

La fibre multimode est la première mise en marché, elle est caractérisée par un diamètre du cœur plus large de l'ordre de $50 \mu\text{m}$ et $62.5 \mu\text{m}$ qui permet à plusieurs modes de se propager dans plusieurs trajets différents en même temps, elle est caractérisée également par une dispersion intermodale importante; ce type de fibre est utilisable dans les réseaux de transmission à faible débit, de l'ordre de 5Gbit/s et à des courtes distances ; la fibre multimode se présente en deux types :

II.2.2.1.1. Fibre multimode à saut d'indices :

Dans ce type de fibre optique l'indice de réfraction du cœur décroît d'une façon brusque à des pas discontinus du centre du cœur jusqu'à la limite gaine-cœur et puisque les rayons ayant la même longueur d'onde, ils empruntent des chemins différents (figure 1.7) avec une vitesse constante $V=C/n_{\text{cœur}}$, d'où les temps parcourus se diffèrent qui engendrent par la suite une dispersion qui est due à la multiplication des modes de propagation.

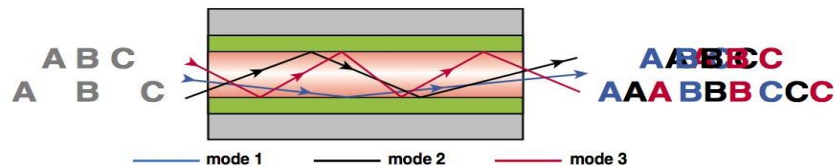


Figure 1.8: Propagation dans la fibre à saut d'indices.

II.2.2.1.2. Fibre multimode à gradient d'indices :

Contrairement à la fibre multimode à saut d'indice, dans la fibre à gradient d'indice l'indice de réfraction décroît graduellement du centre de la section du cœur jusqu'à la limite de la surface de séparation entre le cœur et la gaine (figure 1.8).

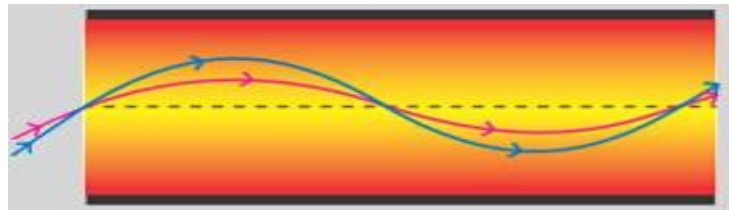


Figure 1.9 : Propagation dans une fibre à gradient d'indices.

II.2.2.2. Fibre monomode :

La fibre optique monomode est caractérisée principalement par un diamètre du cœur plus mince de l'ordre de $9 \mu\text{m}$ permettant la propagation qu'un seul mode (figure 1.9) donc le maximum de puissance pour un seul et unique mode (trajet) d'où une grande portée qui peut atteindre actuellement les 300 Km sans répéteurs et une bande passante de l'ordre de quelques Téra Hertz/km ; la tendance actuelle vise à réduire d'avantage le diamètre du cœur pour améliorer la portée ainsi que la bande passante.

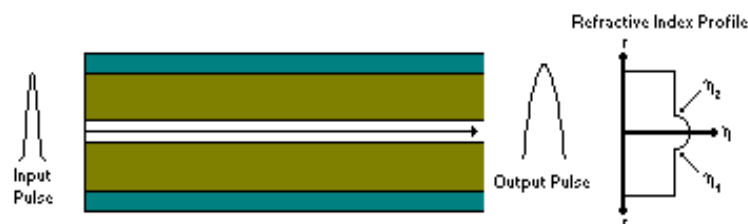


Figure 1.10: Propagation dans une fibre monomode.

II.2.3. Caractéristiques de la fibre optique :

II.2.3.1. Débit :

Le débit est la quantité d'informations que peut véhiculer le support de transmission par seconde. Dans la fibre optique le débit est limité par le temps de réponse des électrons dans la conversion optique/électrique/optique du signal ; le meilleur débit atteint actuellement est de 8 GBit/s et cela revient à des raisons d'infrastructure ainsi que commercial seulement il sera dépassé très bientôt, mais avoir arrivé à une totale exploitation de la fibre optique en terme de débit et d'en profiter de son potentiel total est encore plus loin.

II.2.3.2. Bande passante :

La bande passante est une caractéristique incontournable dans la définition du type d'une fibre optique à utiliser dans un réseau de transmission, c'est la quantité de données pouvant être envoyées sur une liaison à fibre optique, elle dépend des phénomènes de dispersions modale et chromatique.

La bande passante totale est définie par :

$$Bt = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Bm^2} + \frac{1}{Bc^2}}} \quad 1.4$$

La bande passante se diffère pour chaque type de fibre optique ; pour une fibre optique monomode la bande passante est donnée par la relation :

$$B = \frac{0.35}{D(\lambda)\Delta\lambda L} \quad 1.5$$

Où : D représente la dispersion chromatique,

$\Delta\lambda$ est l'écart spectral de la longueur de la fibre.

Alors que la bande passante pour fibre optique multimode à saut d'indice est donnée par la relation :

$$B = \frac{B0}{L\gamma} \quad 1.6$$

avec : B0 est données par le constructeur,

L est la longueur de la fibre optique,

γ est le facteur de concaténation des modes.

Et pour la fibre multimode à gradient d'indice la bande passante est donnée par la relation :

$$B = \frac{1}{\sqrt{\frac{L^2 \gamma}{B_0^2} + \frac{M^2 (\lambda) \Delta \lambda^2 L^2}{0.35^2}}} \quad 1.7$$

avec : B_0 est donnée par le constructeur ;

L est la longueur de la fibre optique ;

γ est le facteur de concaténation des modes ;

M est le nombre de modes.

On remarque que dans tout les cas la bande passante est inversement proportionnelle avec la longueur de la fibre.

II.2.3.3. Dispersion :

La dispersion est un paramètre à prendre en considération lors de la réalisation d'une liaison à fibre optique, c'est un effet qui affecte le signal en élargissant les impulsions (l'information) le long de la ligne de transmission (figure 1.10), ce qui rend la durée de l'impulsion à la sortie plus grande que celle à l'entrée de la fibre, cet effet limite le débit d'une part, d'autre part il limite la portée tel qu'il est montré dans la formule :

$$L_{\max} = \frac{1}{2BD\Delta\lambda} \quad 1.8$$

On remarque bien que la portée ainsi que le débit sont inversement proportionnels avec la dispersion.

On distingue plusieurs types de dispersions dont pour chacune d'elles sa source, son impact sur le signal mais également à chacune il y a les outils ou solutions pour réduire leurs effets.

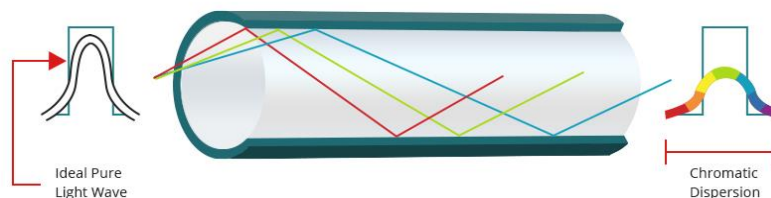


Figure 1.11 : la dispersion dans la fibre optique.

II.2.3.3.1 Dispersion chromatique :

La dispersion chromatique est une réponse du matériau milieu de propagation d'une onde lumineuse qui se traduit par un étalement des impulsions ; cet effet est dû à la dépendance de

l'indice de réfraction du milieu à la longueur d'onde du signal. La dispersion est donnée par la formule :

$$D = \frac{1}{2BL\Delta\lambda} \quad 1.9$$

avec : L est la longueur de la fibre ;

B est le débit et $\Delta\lambda$ est l'intervalle spectral libre.

La dispersion chromatique est très significative pour la fibre monomode seulement elle est pratiquement quasi-nulle au voisinage de 1300 nm de longueur d'onde et d'environ 17 ps/(nm.km) au voisinage de 1550 nm, et négligeable pour la fibre multimode.

II.2.3.3.2. Dispersion intermodale :

La dispersion intermodale correspond à l'existence de différentes vitesses possibles pour la propagation des ondes ; elle affecte principalement la fibre multimode et donnée par :

$$D = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} \quad 1.10$$

Où : t_{max} et t_{min} représentent les temps qu'ont parcouru les modes le plus lent et le plus rapide ;

L : représente la longueur de la fibre.

La dispersion intermodale est donnée également par la relation :

$$D = \frac{n_1 \Delta}{c} \quad 1.11$$

$$\text{avec : } \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad 1.12$$

Pour la fibre à saut d'indice sa valeur typique est d'environ 30 ps/km et pour la fibre à gradient d'indice sa valeur typique est de 60 ps/km alors que pour la fibre monomode n'a aucun effet vu qu'un seul mode qui se propage [8].

II.2.4. Atténuations :

Comme tout support de transmission, divers phénomènes affectent les systèmes de transmission à base de fibre optique en réduisant la puissance propagée et malheureusement ces effets sont incontournables quoi que leurs impacts soient plus faibles que dans le cuivre ou autres supports de transmission ; elles sont dues essentiellement à deux causes principales qui sont :

- **L'absorption du matériau :** elle est due à l'absorption de la lumière par la silice d'une part (absorption intrinsèque), et d'autre part elle est due aux impuretés dans la silice elle-même, ou les matériaux utilisés pour le dopage de la fibre (extrinsèque) elle est caractérisée par une forte absorption des rayons UV et IR.

➤ **La diffusion de Rayleigh:** elle représente l'effet prédominant des pertes au sein d'une fibre optique; elle concerne les ondes dont la longueur d'onde est beaucoup plus grande que le diamètre des particules diffusantes.[9]. La figure (1.11) ci-dessous montre l'impact de l'atténuation sur l'amplitude du signal.

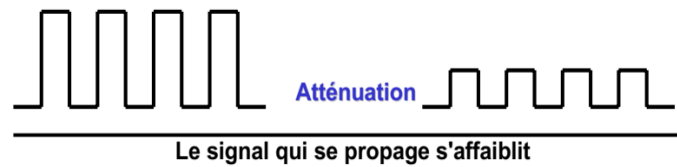


Figure 1.12: Atténuation du signal numérique dans la fibre optique.

En générale, les pertes totales sont la somme de différents types, intrinsèques et extrinsèques et pour chaque type ses causes, [10] telles que sont illustrées sur la figure 1.13 :

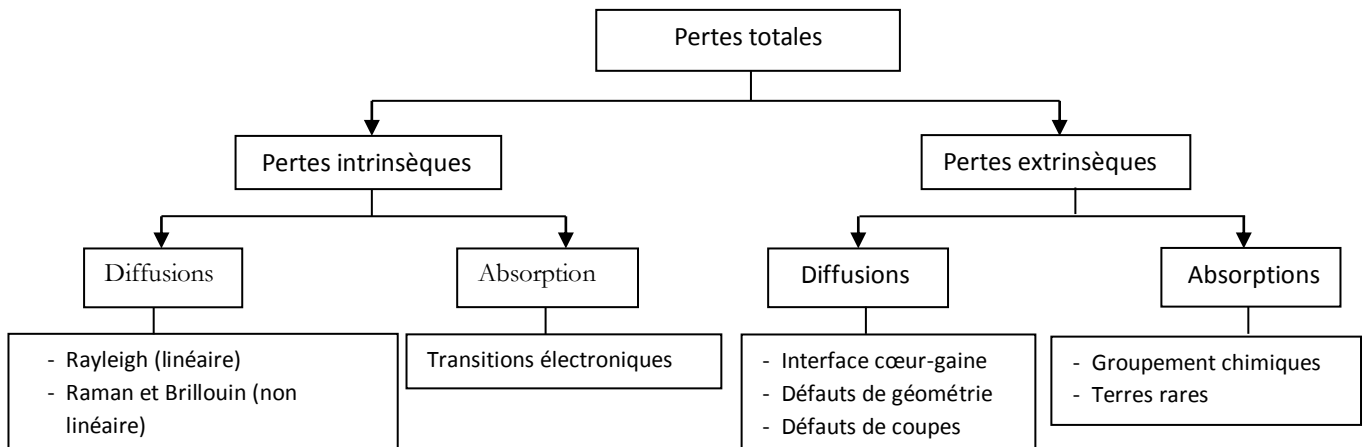


Figure 1.13: différents types de pertes et leurs causes.

La puissance de sortie décroît en fonction de la longueur de fibre et donnée par la formule:

$$P(l) = P_0 (e^{-\alpha l}) \tag{1.13}$$

Où : P_0 représente la puissance d'entrée et α est le coefficient de pertes linéique,

L'atténuation le long de distance à parcourir en dB est donnée par la formule :

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log(P_t/P_0) = 4.343 \alpha l \tag{1.14}$$

Et la puissance minimum reçue est donnée par :

$$P_{mr} = P_e - \alpha_{tot} \cdot M \tag{1.15}$$

$$\alpha_{tot} = \alpha_{ce} + \alpha_{ce} + \alpha_l \tag{1.16}$$

avec: M est une marge de sécurité prise généralement entre 5 et 10 dB.

La puissance minimale reçue d'un signal analogique au bout de la ligne de la transmission à fibre optique est en fonction du SNR rapport signal sur bruit, alors que dans une liaison numérique est fonction du débit et du taux d'erreur.

$$P_{mr} = Q.PEB. \sqrt{\Delta F} \quad 1.17$$

Néanmoins, il existe des longueurs d'onde où la valeur de cet affaiblissement est minimale, ces longueurs d'ondes appelées également fenêtres sont choisies et homologuées pour être utilisées dans la transmission optique. Sur la figure (1.14) on remarque bien que l'atténuation dans la silice est minimale dans les bandes centrées autour des longueurs d'onde 0.8 μm, 1.3μm et 1.5μm pour la fibre multimode alors que pour la fibre monomode sont centrées autour de 1.3μm et 1.5μm.

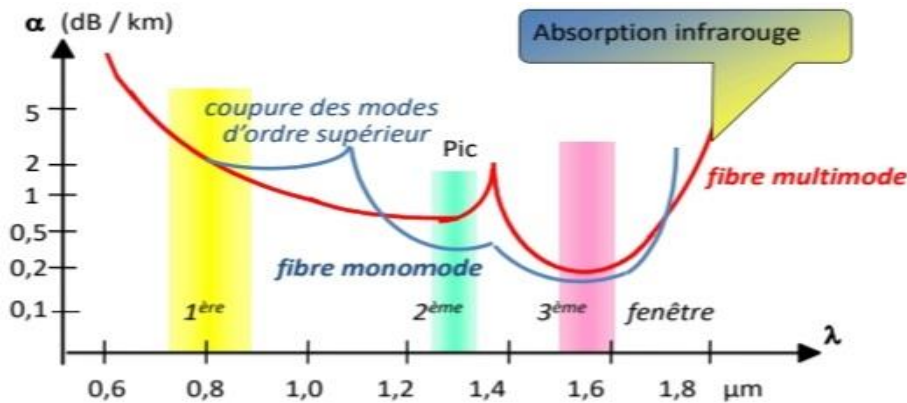


Figure 1.14 : atténuation intrinsèque des fibres en fonction de la longueur d'onde.

Un récapitulatif sur les caractéristiques techniques des fenêtres homologuées par l'UIT et utilisées pour chaque type de fibre, le niveau d'atténuation accompagnant ainsi que la dispersion chromatique est présenté dans le tableau suivant :

fenêtre / paramètres	Première	Deuxième	troisième
Longueur d'onde	0.78 à 0.9 μm	1.3 μm	1.5 à 1.6 μm
Type de fibre utilisée	multimode	Multimode monomode	monomode
Atténuation	Forte 2 à 4 dB/km	Faible 0.4 à 1 dB/km	Très faible 0.2 dB/km
Dispersion chromatique	forte	Quasi nulle	Faible, non nulle Très faible dans les fibres à dispersion décalée

Tableau 1.1 : récapitulatif des caractéristiques des fenêtres de fibre homologuées.

II.2.5. Remèdes aux imperfections affectant la fibre optique :

Afin de réduire l'impact des effets limitant les performances de la fibre optique telles que la dispersion et l'atténuation, des solutions techniques sont adoptées telles que l'installation des fibres compensatrices de dispersion (DCF) et des amplificateurs régénérateurs.

II.2.5.1. Fibre compensatrice de dispersion DCF :

La DCF est définie comme une fibre à indice de dispersion négatif à installer dans le but de la remise en forme des impulsions subies des déformations (élargissements) et afin d'optimiser, la DCF est installée dans la ligne de transmission à des distances bien étudiées soumises à la condition :

$$L_{\max} = \frac{1}{2BD\Delta\lambda} \quad 1.18$$

Le principe de fonctionnement de la DCF est décrit dans les figures(1.15).

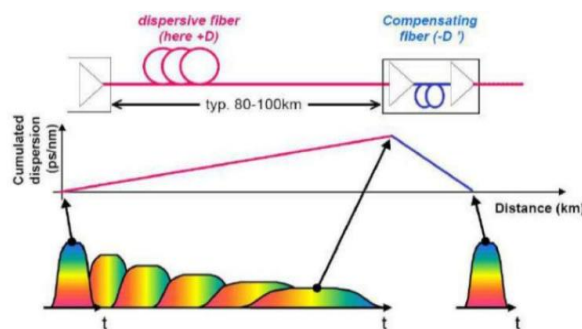


Figure 1.15 : principe de fonctionnement de la DCF.

II.2.5.2. Amplificateurs optiques:

Lors de sa propagation, le signal optique perd de la puissance par l'effet de l'atténuation ce qui réduit sa portée, à cet effet et pour couvrir le maximum de surface, l'installation des amplificateurs et à des distances bien étudiée est impérative.

Les amplificateurs à fibres optiques sont des dispositifs permettant la régénération du signal optique sans passer par la conversion et l'amplification électroniques [11] Ils sont caractérisés par :

- ❖ La puissance d'entrée et la puissance de sortie ;
- ❖ Le gain est exprimé en dB (= P_e/P_s) ;
- ❖ La largeur de bande des fréquences amplifiables ;
- ❖ Facteur de bruit (NF)

II.2.5.2.1. Principe de fonctionnement :

Un amplificateur optique est une portion de fibre optique dopée de terre rare et est pompée optiquement avec un laser afin de placer les ions de dopage dans un état excité et lorsque un signal lumineux passe par ce morceau de fibre optique (figure 1.16) il désexcite les ions par effet laser en produisant un photon en tout point identique au photon incident, le signal lumineux a donc été doublé et par effet d'avalanche, l'amplification du signal se fait jusqu'à la sortie de la section dopée de la fibre optique.

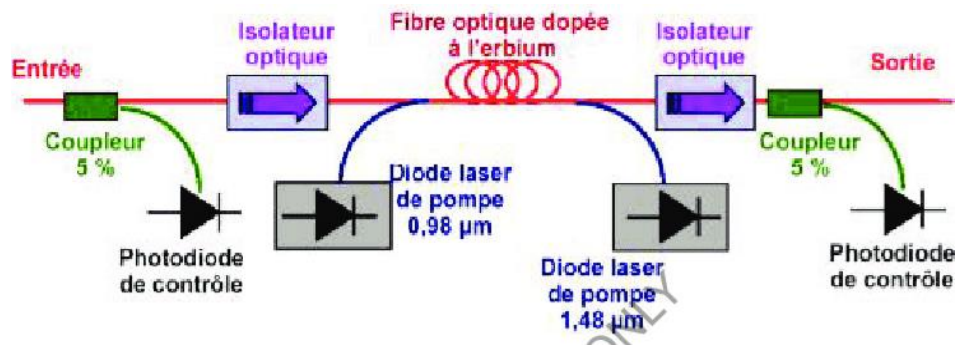


Figure 1.16 : schéma de principe d'amplificateur optique.

II.2.5.2.2. Amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) :

L'amplificateur à fibre dopée à l'erbium est le plus connu, il opère dans les bandes de fréquence (1525 à 1565 nm) et (1570 à 1610 nm) pour un courant de pompage dans les fenêtres 980 nm et 1480 nm.

Les amplificateurs optiques sont classés en trois catégories suivant leurs niveaux de correction à apporter; il y a:

- ❖ **Amplificateur 1R** : Il Régénère le signal uniquement (amplification simple) ;
- ❖ **Amplificateur 2R** : Outre la Régénération il Remet en forme les impulsions qui ont subi des dégradations, il permet également d'améliorer le taux d'extinction et de limiter les bruits d'amplitude;
- ❖ **Amplificateur 3R** : Ce type d'amplificateurs a pour fonction la Régénération, la Remise en forme et la synchronisation (**Retiming**) des impulsions afin pallier aux problèmes de gigue.

II.2.5.3. Augmentation du débit :

Pour répondre à l'accroissement de la capacité totale de transmission sur la fibre optique, il y a deux solutions possibles tout en gardant l'œil sur la bande passante des EDFA qui est limité à 5 THz.

- ❖ La première solution consiste à garder le débit par canal constant et augmenter le nombre de canaux (cas de la WDM);
- ❖ La deuxième solution consiste à garder le nombre de canaux fixe et d'augmenter le débit de chaque canal.

Une autre approche a été développée récemment à fin d'augmenter le débit, elle consiste à abriter plus de cœurs dans une même fibre; elle vise actuellement à loger jusqu'à 7 cœurs au lieu d'un seul cœur, cette technique permet d'atteindre un débit théorique de plusieurs centaines de GBit/s ; le traitement tout optique peut également augmenter le débit.

II.2.5.4. Multiplexage :

Le multiplexage est une technique qui permet d'investir d'avantage dans le domaine de la fibre optique, le principe est de transmettre plusieurs signaux à faibles débits sur un seul support à grand débit ; plusieurs types de multiplexages sont développés.

II.2.5.4.1. TDM (Time Division Multiplexing):

Dans cette technique, les signaux occupent la bande passante de la fibre optique à tour de rôle pendant des unités de temps appelées IT (Intervalle de temps). Cela permet donc à un émetteur de transmettre plusieurs signaux numériques élémentaires à faibles débits sur un même support de communication à plus haut débit ; le principe d'une telle technique est décrit dans la figure (1.17)

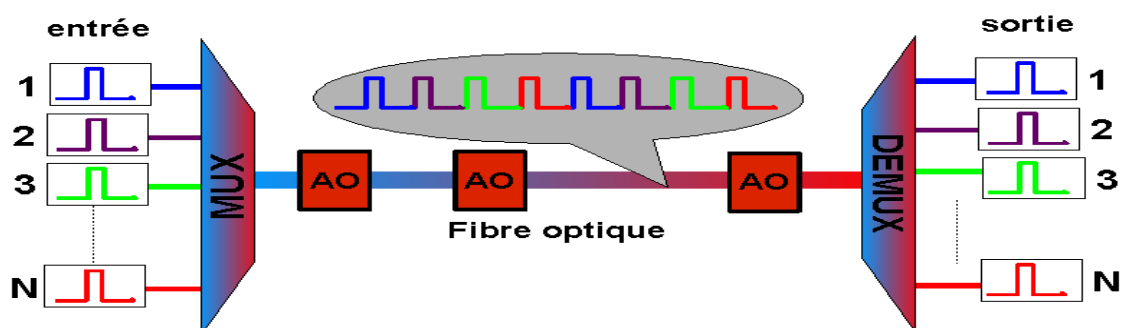


Figure 1.17 .Multiplexage / Démultiplexage TDM.

Cependant, ce type de multiplexage est limité en terme de débit ; il ne dépasse pas quelques dizaines de GBits voir 40 GBit/s d'où la nécessité d'en trouver une nouvelle technique qui permet d'offrir un débit plus grand pour satisfaire cette demande croissante qui ne cesse d'augmenter avec l'apparition de nouvelles applicatives notamment les multimédias.

II.2.5.4.2. WDM (Le multiplexage en longueur d'onde) :

La WDM est une technique qui permet d'augmenter le débit en donnant la possibilité de véhiculer plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes adjacentes et espacées de 0.8 nm dont il est un écart normalisé par l'UIT (Union International of Telecomimunications) sur une seule fibre pour avoir 32 canaux de faibles débits regroupés par un multiplexeur WDM, dans un seul support haut débit, pour les séparer on utilise un démultiplexeur de même nature. le principe de la modulation DWM est décrit dans la figure1.18.

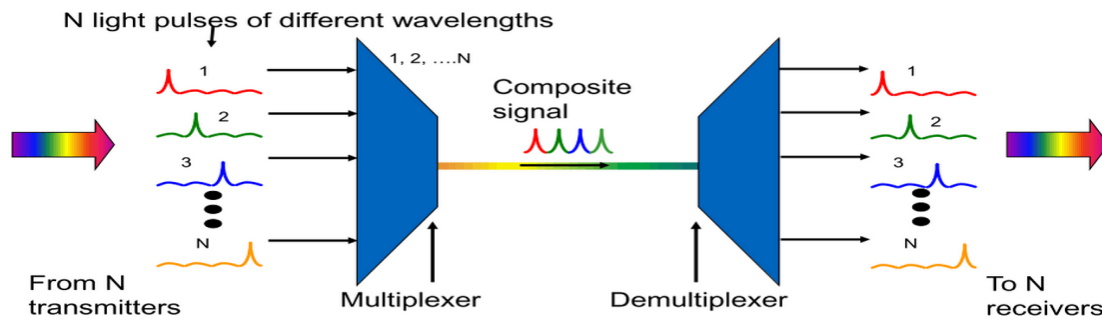


Figure 1.18. Multiplexage / Démultiplexage WDM.

Le multiplexage WDM est basé sur le principe de pouvoir multiplexer plusieurs sources optiques à faibles débits dans un seul signal à haut débit ; d'abord, il faut modifier leurs longueurs d'ondes en utilisant des transpondeurs (tranceivers) et chaque flux d'information est codé sur une porteuse par modulation d'amplitude ou de phase. A la réception, les équipements de démultiplexage agissent comme des filtres sélectifs.

Plusieurs dérivées de cette technique ont été développées en agissant sur l'écart entre les différentes longueurs d'ondes; le tableau ci-dessous [11] définit les types de modulations dérivées, l'espacement entre les canaux, la bande de fréquence ainsi que le nombre de canaux à multiplexer.

Type de modulation	Coarse (CDWM)	Dense WDM	Ultra Dense WDM
Caractéristiques			
Ecart entre les longueurs d'onde	0.8 à 1.6 nm	0.4 et 0.2 nm	0.08 nm
Bande de fréquence	1270 à 1610 nm	1460 à 1530 nm (s) 1530 à 1565 nm (c) 1525 à 1625 nm (L)	1460 à 1530 nm (s) 1530 à 1565 nm (c) 1525 à 1625 nm (L)
Nombre de canaux à multiplexer	16 canaux	80 à 160 canaux	400 canaux

Tableau 1.2 : les caractéristiques des différentes de modulation WDM.

II.2.5.4.3. Multiplexage codé CDMA

Le CDMA est une technique de la famille de multiplexage à étalement de spectre [12], elle est destinée en premier temps pour les transmissions cellulaires puis elle est adaptée à la transmission par fibre optique ; dans ce type de multiplexage on va associer à chaque signal une clé pour le coder avant d'être émit et à la réception on doit y avoir des récepteurs appropriés et ayant le même code pour le déchiffrer ; le CDMA présente de nombreuses avantages en termes de

- ❖ bandes passante ;
- ❖ capacité de transmission ;
- ❖ consommation énergétique ;
- ❖ sécurité contre toute intrusion ou actes malveillant.

On distingue deux types de multiplexage CDMA :

- ❖ **Code OOC (Optical Orthogonal Code)** : sert à améliorer l'efficacité spectrale et la sécurité de la transmission.
- ❖ **Code PC** : consiste à ajouter à chaque signal émit une séquence de bit pseudo-aléatoire générée par un générateur de codes PC connu uniquement par l'émetteur et le récepteur, il utilisé pour améliorer d'avantages le niveau de sécurité contre les intrusions malveillantes, et l'efficacité spectrale dans les réseaux étendus.

III. Avantages de la fibre optique :

Depuis son apparition, la fibre optique fut le support de transmission le plus utilisé vue les avantages qu'a apporté en termes de débit, bande passante dont on peut citer :

- ❖ L'atténuation est plus faible qu'autres supports de transmission classiques radio et câble en cuivre ;
- ❖ Débit ou flux d'informations que peut supporter les réseaux à fibre optique est plus consistant qui peut atteindre des Téra Bit/s.
- ❖ La vitesse de propagation est plus élevée.
- ❖ La fibre optique est caractérisée par une très large bande passante qui peut atteindre des dizaines de Téra Bit donne un bouffant d'air pour d'éventuelles applicatives dans la transmission de données.
- ❖ L'intrusion ou tout acte malveillant est quasiment nulle dans les réseaux à fibre optique.
- ❖ Tous parasites ou diaphonies extérieures qui peuvent nuire à la transmission sont pratiquement nuls.
- ❖ Ces avantages ont permet de concevoir de nouvelles architectures de réseaux avec de nouvelles configurations, avec de nouvelles applicatives notamment les multimédias.

IV. Conclusion :

dans ce chapitre on a présenté brièvement la fibre optique, les différents types et les caractéristiques techniques de chaque type telles que le débit et la bande passante qui sont des paramètres essentiels lors de la définition d'un tel ou tel type de fibre à choisir pour le conception des réseaux ainsi que le principe de la propagation d'un signal optique au sein de ce support de transmission dans le cas du comportement linéaire de son indice de réfraction ; on a évoqué par la suite les effets perturbateurs à la propagation de ce signal telles que la dispersion et l'atténuation,

comme on a présenté les solutions pour palier à ces défauts et à la fin on a conclu ce chapitre par l'énumération des avantages de l'utilisation de la fibre optique.

Chapitre II

Les non linéarités dans la fibre optique

I. Introduction :

La transmission d'un signal sur fibre optique consiste à transmettre des séquences binaires (« 0 » et « 1 ») modulées par un signal optique (lumière) où les « 0 » caractérisent l'absence de la lumière et les « 1 » représentent les fortes intensités de la lumière ; plusieurs techniques sont adoptées pour une telle fonction mais la première et la plus simple technique adoptée est la modulation OOK (On/Off Keying) qui est un type de modulation d'amplitude dont la modulation RZ (Retour à Zéro) et la modulation NRZ (Non Retour à Zéro) (figure 2.1) qu'on va décrire par la suite sont les plus utilisées.

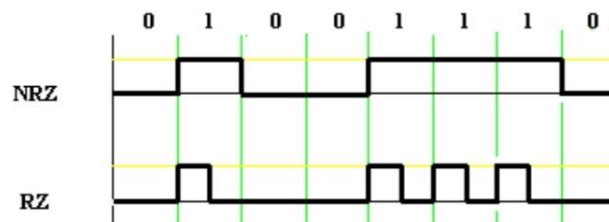


Figure 2.1 : Présentation de deux signaux modulés en RZ et NRZ.

I.1. Modulation NRZ (Non Retour à Zéro) :

La modulation NRZ est une technique utilisant deux niveaux de signal pour la représentation de l'information « 1 » signifie la présence d'une tension ou d'une intensité optique et « 0 » aucun signal n'est transmis, c'est la plus simple mais également la plus mauvaise en terme d'efficacité spectrale telle s'est sur la figure 2.1. [13]

I.2. Modulation RZ (Retour à Zéro)

La modulation RZ comme s'est illustré dans la figure 2.1 ; est un autre format OOK ; dans laquelle à chaque temps-bit il effectue un retour à zéro systématiquement ; le codage d'un « 0 » est similaire qu'au format NRZ mais le codage d'un « 1 » est de largeur à mi-hauteur dépendant de sa méthode de génération (33%, 50%, 67%) ; pour générer un signal RZ il suffit de faire suivre un signal NRZ par un modulateur Mach Zehnder (MZM).

Les performances d'un signal RZ aux termes de sensibilité et de tolérance aux effets non linéaires sont meilleurs qu'un signal NRZ.

D'autres formats de sur modulation RZ sont développés pour augmenter l'efficacité spectrale et pour augmenter la tolérance aux effets non linéaires ; on peut citer :

- ❖ CS-RZ Carrier Suppressed RZ ;
- ❖ SSB-RZ : Single Side Bande RZ ou modulation à bande latérale unique ;
- ❖ AP-RZ : Alternate Phase RZ ;
- ❖ C-RZ Chirped RZ ;
- ❖ Apo-RZ : Alternate Polarisation RZ.

II. Régénérateurs optiques :

Les régénérateurs sont des dispositifs tout optiques qui sont conçus afin de palier aux phénomènes d'atténuations (intrinsèques ou extrinsèques) et de corriger les erreurs que peuvent induisent. Contrairement aux régénérateurs optoélectroniques, les régénérateurs optiques représentent une alternative économique en termes d'énergie et coût ; ils sont classés en trois catégories suivant le niveau de correction qu'ils peuvent apporter.

II.1. Régénérateur 1R :

Lors de la transmission dans de longues distances, l'installation des amplificateurs est indispensable quoique l'atténuation est faible (de l'ordre de 0.2 dB/km dans la fenêtre 1550 nm).

Avant l'apparition des amplificateurs optiques, la solution pour régénérer le signal était les répéteurs électriques qui transforment le dit signal en un signal électrique, le traite (élimination des bruits et la remise en forme des impulsions), l'amplifie et le reconverti en un signal optique par la suite ce qui rend cette solution complexe et onéreuse et pour palier à ces contraintes, les amplificateurs optiques à semi-conducteur soient apparus, seulement les problèmes de diaphonie entre canaux ont limité leur utilisation. Les amplificateurs à fibre optique dopée erbium caractérisés par leurs forts gain (>30 dB) et leur puissance de saturation ainsi que leur large bande passante (>30 nm), outre leur insensibilité furent la solution parfaite ; néanmoins les pompes fixées à 980 nm ou 1480 nm, l'EDFA est limité à amplifier que dans les bandes C et L, ce qui constitue un obstacle avec la WDM ; enfin, les amplificateurs Raman caractérisés par un gain important sur une très large bande passante (>100 nm) ont résolu le problème.

La combinaison des EDFAs et RA (Amplificateur Raman) pour exploiter les points forts de chaque type ont donné des résultats spectaculaires pour la transmission dans de longues distances.

Cependant avec l'amplification il peut se produire un phénomène incontournable dit bruit optique d'émission spontanée amplifié (ESA)[14].

II.2. Bruit optique d'émission spontanée amplifié (ESA) :

Le bruit optique d'émission spontanée amplifié [10] est un phénomène qui peut nuire à l'amplification par l'EDFA, il est quantifié par un paramètre dit facteur de bruit ou NF (Noise Factor), il est donné par :

$$NF \text{ (dB)} = 2 \text{ nsp} (G-1)/G \approx 2 \text{ nsp} \quad 2.1$$

Le Bruit optique d'émission spontanée amplifié est accompagné par un autre paramètre dénommé densité spectrale de bruit ou Sesa qui est donné par la formule :

$$\text{Sesa} = (G-1)\text{nsp} \cdot h\nu \quad 2.2$$

Avec : G est le gain ; ν : fréquence d'émission.

N_{sp} : facteur d'émission spontanée ; h : constante de Planck ;

Si on augmente le nombre d'amplificateurs, le facteur de bruit s'accumule d'où le recours à une autre fonction dite la remise en forme est impérative.

II.3. Régénérateur 2R :

Un régénérateur 2R est un dispositif qui a été conçu pour accomplir deux fonctions, la première est la réamplification du signal et la deuxième est la remise en forme des impulsions, il est généralement constitué d'un amplificateur optique linéaire suivi de porte optique non linéaire, seulement la correction des fluctuations temporelles des symboles dites giges par ces types de régénérateurs est exclue.

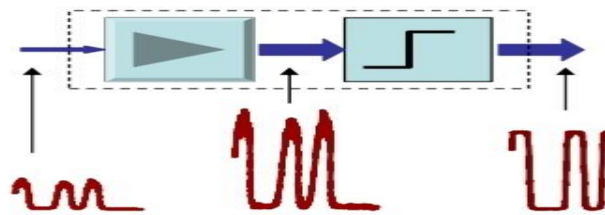


Figure2.2 : schéma de principe d'un régénérateur 2R.

II.4. Régénérateur 3R :

Un régénérateur 3R est un dispositif qui apporte une solution complète c.à.d. outre les fonctions de réamplification et la remise en forme des impulsions il y a la resynchronisation ou retiming pour corriger temporellement les décalages qu'ont subi les symboles [14].

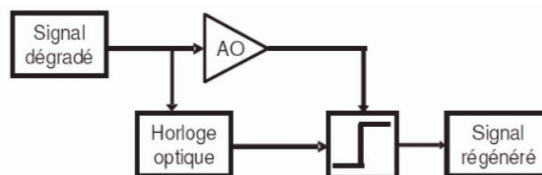


Figure 2.3 : schéma du principe d'un régénérateur 3R.

III. Non linéarité :

L'étude de la transmission par fibre optique faite dans le chapitre précédant est considérée comme exacte tant que la puissance émise est relativement faible et à de courtes distances et seules l'atténuation et la dispersion qui peuvent être des effets perturbateurs dans la transmission ; cependant lors de la transmission via des fibres optiques non linéaires dans de grandes distances avec des puissances plus élevées, sont apparus d'autres phénomènes perturbateurs dites effets non linéaires affectant le signal à transmettre et donnent naissance à des interférences qui peuvent affecter la capacité de transmission également dans les canaux de transmission à haut débit [1] ; cependant cette non-linéarité peut être utilisée pour la réalisation des fonctions optiques dans les

réseaux de transmission à haut débit. Les effets non linéaires qui affectent en particulier les réseaux DWM et dérivées sont classés en deux catégories (figure 2.4) suivant leurs causes :

- ❖ Effets dus à l'indice de réfraction non linéaire ;
- ❖ Effets dus à la diffusion stimulée.

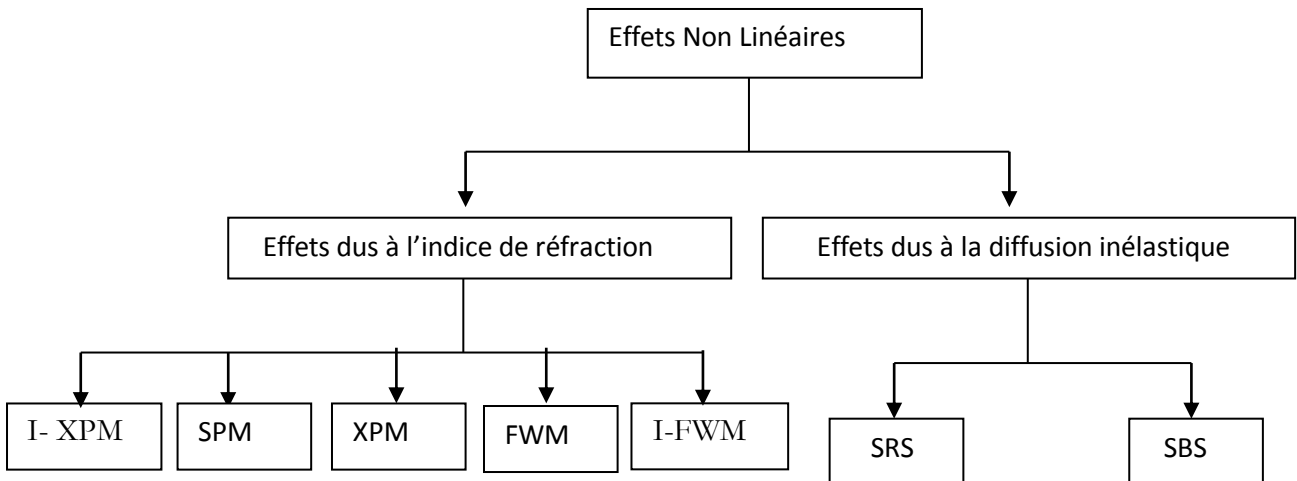


Figure 2.4 : Classification des effets non linéaires

La non-linéarité ouvre un large champ d'applications ; elle est donnée par la relation de polarisation d'ordre n ; on se contente dans notre cas de l'ordre 3.

$$P = \epsilon(\psi^{(1)} E + \psi^{(2)} EE + \psi^{(3)} EEE + \dots \psi^{(n)} E^n) \quad 2.3$$

III.1. Effets non linéaires :

III.1.1. Effets dus à la diffusion stimulée :

Contrairement à la diffusion de Rayleigh, l'interaction entre une onde et un milieu de propagation non linéaire induit un décalage de fréquence des photons, ce décalage est induit par l'effet Brillouin stimulé et les effets Raman stimulés.

III.1.1.1. Diffusion de Raman :

La diffusion Raman est un phénomène non linéaire qui consiste à un changement léger de longueur d'onde qui accompagne la diffusion de la lumière par le milieu de propagation, ce changement correspond à un échange d'énergie entre le rayon lumineux et le milieu de propagation.

Cet échange d'énergie peut être traduit par une perte d'énergie du matériau milieu de propagation dit « effet Raman anti-stock », ou un gain d'énergie connu par « diffusion Raman Stokes ». [15]

III.1.1.2. Domaines d'application de la Diffusion de Raman :

La diffusion de Raman est utilisée dans diverses applications telles que :

- **Amplificateur de Raman :** Type d'amplificateurs utilisés dans le domaine non linéaire.
- **Spectroscopie de Raman :** C'est une autre d'application basée sur principe de la diffusion de Raman ; elle permet d'étudier les caractéristiques moléculaires et la structure d'un matériau.

III.1.1.3. Diffusion de Brillouin :

La diffusion de Brillouin est un autre effet non linéaire, c'est un phénomène généré suite à une interaction entre une onde lumineuse lors de sa propagation et une onde acoustique qui est générée par conséquent. Le principe de la diffusion de Brillouin est utilisé dans la conception des amplificateurs à effet de Brillouin.

III.1.2. Effets dus à l'indice de réfraction non linéaire :

Dans cette catégorie l'effet Kerr est plus dominant qui est à son tour l'origine de nombreux effets qui peuvent induire des phénomènes qui affectent les paramètres du signal dont on trouve :

- ❖ SPM : Auto modulation ;
- ❖ XPM : Modulation de phase croisée ;
- ❖ FWM : Mélange à quatre ondes ;
- ❖ I-XPM : Intra channel XPM ;
- ❖ I-FWM: Intra channel FWM.

III.1.2.1. Effets Kerr :

L'effet Kerr est du à la variation de l'indice de réfraction qui est due à une augmentation importante de la puissance (champs électrique E appliqué) ; cette variation est proportionnelle au carré du champ électrique appliqué et elle est donnée par la relation :

$$n = n_0 + n_2 |E|^2 \quad 2.4$$

$$\text{avec : } n_2 = \frac{3 \psi^3}{840} \quad 2.5$$

où : n_0 est l'indice de réfraction linéaire ;

n_2 indice de réfraction non linéaire, pour le silice on a $2.6 \cdot 10^{-20} < n_2 < 3.2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{s}$ à 1550 nm ;

E : amplitude du champ électrique ;

ψ^3 : susceptibilité d'ordre 3.

La valeur de l'indice de réfraction non linéaire varie selon la quantité et la nature des dopants incorporés.

Les fortes intensités crêtes (Laser) ainsi que la faible section du cœur de la fibre optique rendent l'effet Kerr significatif.

III.1.2.1.1. Auto modulation (Self Phase Modulation):

Lors de la propagation du signal lumineux dans un milieu optique, gaz, solide et liquide, une interaction lumière (laser)-matière dans milieu de propagation induit une variation de l'indice de réfraction, combinée à la dispersion chromatique conduisent à un élargissement temporel des signaux propageant dans la fibre optique et par la suite la modification de son spectre (l'impulsion modifie son spectre en raison de sa propre intensité) d'où l'auto modulation de phase.

Une impulsion qui se propage dans un milieu non linéaire subit un changement de fréquence du à une auto modulation de phase.

Le décalage instantané de la phase est donné par la relation :

$$\Phi(t) = \omega_0 t - \frac{2\pi n(I)L}{\lambda_0} \quad 2.6$$

avec : ω_0 et λ_0 représentent la fréquence et la longueur d'onde dans le vide.

L : est la longueur de la fibre.

La fréquence instantanée est donnée par la relation :

$$\omega(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega_0 - \frac{2\pi L}{\lambda_0} \frac{dn(I)}{dt} \quad 2.7$$

III.1.2.1.2. Domaines d'application de l'auto modulation de phase :

L'auto modulation de phase a également des avantages, elle est applicable dans divers domaines tel que :

- ❖ La compression temporelle des impulsions ;
- ❖ L'élargissement spectral et Supercontinuum ; [16]
- ❖ La régénération optique, conversion de longueur d'onde ;
- ❖ Compression d'impulsion spectrale. [17]
- ❖ Utilisée dans la réalisation de la régénération 2R pour la remise en forme des impulsions.

III.1.2.1.3. Mélange à quatre ondes FWM :

La FWM est induite par l'effet Kerr et affecte le signal WDM, il consiste à une interaction non linéaire entre trois ondes de pulsations ω_1 , ω_2 et ω_3 pour produire une quatrième onde appelée produit d'intermodulation de pulsation $\omega_{1,2,3}$ [18]

$$\omega_{1,2,3} = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3 \quad 2.8$$

III.1.2.1.4. Domaines d'applications de la FWM :

- ❖ Utilisable dans les réseaux à très haut débits ;
- ❖ Utilisable dans le démultiplexage basé sur le principe de l'interaction non linéaire d'une pompe de signal basé sur la modulation en longueur d'onde.

III.1.2.1.5. La modulation de phase croisée XPM :

La modulation de phase croisée XPM est un phénomène non linéaire qui apparaît dans les systèmes WDM, elle est produite lors la propagation d'au moins deux ondes de longueurs d'ondes voisines ou même longueur d'onde, mais de polarisations différentes où la longueur d'onde d'un signal affecte la phase d'autre signal par l'effet Kerr.

III.1.2.1.6. Caractéristiques de la modulation XPM :

- ❖ Elle constitue le principal effet non linéaire limitant la qualité des transmissions des signaux WDM ;
- ❖ La XPM peut également changer l'état de polarisation instantanée d'un canal en créant une biréfringence ;
- ❖ Lors de la transmission des signaux modulés en phase peut entraîner des erreurs sur cette phase.

III.1.2.1.7. Défauts de la modulation de phase croisée :

Comme tous systèmes de transmission, La XPM présente des inconvénients tels que

- ❖ Une diaphonie inter canal induite dans les systèmes WDM et dérivées ;
- ❖ La XPM peut produire des gigues.

III.1.2.1.8. Domaines d'application de la modulation de phase croisée :

Comme la XPM est la source de plusieurs effets perturbateurs dans la transmission, elle est utilisable dans diverses applications dont on peut citer :

- ❖ Elle est couramment utilisée pour les mesures quantiques sans démolition ;
- ❖ Compression d'impulsions optiques sans non linéaires ultra courtes ;
- ❖ Modes de verrouillage passif ;
- ❖ Commutation optique ultra rapide ;
- ❖ Démultiplexage des canaux OTDM ;
- ❖ Conversion de longueur d'onde des canaux WDM ;
- ❖ Mesure des propriétés optiques non linéaires des milieux (indice non linéaire n_2 et temps de relaxation de la réponse non linéaire).

IV. Conclusion :

On a étudié dans ce chapitre, le comportement de la fibre optique dans le domaine non linéaire où la transmission est affectée par des effets qui sont dus à une interaction entre l'indice de réfraction et le signal de forte puissance en question. Ces effets limitent les performances de la fibre optique, mais elles peuvent être également utilisées dans diverses applications telles que la réalisation des amplificateurs optiques non linéaires notamment amplificateur de Raman ou

amplificateur de Brillouin ou les mesures quantiques ou la mesure des propriétés optiques non linéaires des milieux comme dans le cas de la modulation de phase croisée.

Chapitre 3
Etude d'un signal XPM
avec et sans régénération 3R

I. Introduction :

Dans le troisième chapitre, on va étudier le comportement d'un signal modulé en XPM (Modulation de Phase Croisée) après avoir traversé une fibre optique hautement non linéaire (FHNL) ; autrement dit, lors de la propagation d'un signal optique via une FHNL il subit des dégradations telles que l'atténuation, la dispersion et le déphasage qui affectent par la suite la qualité du signal à la réception ; ces effets sont dus essentiellement à la non-linéarité de la fibre ; l'introduction d'un amplificateur 3R permet d'apporter des corrections de ces erreurs induites.

L'étude sera faite en utilisant le logiciel OptiSystem 17.1.

II. Logiciel de simulation OptiSystem

II.1. Présentation du logiciel [19] :

OptiSystem est un outil de conception logiciel développé par la société canadienne « OptiWave » qui permet aux ingénieurs en télécom et développeurs spécialistes en optique de concevoir des plates formes réseaux dans le domaine optique et optoélectronique du plus simple au plus complexe et permet également de tester leurs faisabilités et de simuler n'importe quelle liaisons optiques, il est basé sur le principe de modélisation effective des systèmes de communication par fibre optique.

II.2. Caractéristiques de l'OptiSystem [19] :

- ❖ L'OptiSystem est ouvert aux personnels qualifiés et habilités d'apporter de nouvelles fonctionnalités et d'améliorations ainsi que des correctifs et d'introduire de nouveaux composants utiles pour de nouvelles conceptions et se qu'on appelle Release ou version.
- ❖ Pour accomplir sa mission, l'OptiSystem dispose d'une bibliothèque qui couvre un nombre très important de composants optiques et électriques paramétrables ; ces composants s'intègrent facilement aux équations de tests et de mesures pour tous les fabricants de ces composants.
- ❖ Les composants que dispose la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et les mêmes effets spécifiques en termes de fonction et de précision que les composants réels.
- ❖ L'OptiSystem dispose d'une définition hiérarchique de composants et systèmes ;

II.3. Avantages du logiciel [19] :

- ❖ L'OptiSystem est muni d'une interface graphique qui permet la visualisation avancée de tous les scénarios envisageables tels les signaux sonores, diagramme de l'œil, facteur Q/BER, puissance de signal/OSNR, diagramme de constellation, pénalités linéaires et non linéaires et l'état de polarisation.

- ❖ L'OptiSystem permet la visualisation du comportement du signal optique dans le domaine temporel que dans le domaine spectral quelque soit son type de modulation.
- ❖ L'OptiSystem permet de calculer les bilans des liaisons optiques ;
- ❖ L'OptiSystem permet d'obtenir un aperçu des performances des systèmes optiques ;
- ❖ L'OptiSystem permet de présenter virtuellement des options des conceptions.

II.4. Modes de simulation [19] :

L'OptiSystem dispose de trois modes de simulation suivant la nature des paramètres à introduire dont il y a :

- ❖ **Le mode normal** : dans ce cas il suffit d'entrer la valeur du paramètre désiré ;
- ❖ **Le mode de balayage (sweep)** : la valeur du paramètre varie suivant u courbes données ;
- ❖ **Le mode Scripte** : le paramètre est évolué suivant une expression arithmétique.

II.5. OptiSystem version 17.1 [19] :

C'est une nouvelle version de l'OptiSystem en date du Aout 2020, compatible avec Windows 8/10 (64 bits), elle apporte de nouveau composant incluant :

- ❖ Module GN ;
- ❖ Chaîne LiFi ;
- ❖ Fibre multicœur ;
- ❖ Rayon de courbure MCF XT ;
- ❖ Pas MCF XT-core ;
- ❖ OTDR.

III. Qualité de service :

III.1. Définition :

La qualité de service est un indicateur de satisfaction des clients pour juger l'utilité du réseau mise en place ainsi que les services offerts par les prestataires, elle est divisée en deux volets :

Le premier volet est concerné par services tel que le débit, les délais, les gigue et les pertes de paquets et c'est la QoS.

Le deuxième volet est concerné par la qualité perçue par les end-users, leurs attentes en termes de performances et applications.

En général, les services offerts se diffèrent du service idéal du fait des perturbations dues aux défauts des composants constituant toute la chaîne de transmission d'où le critère le plus utilisé

pour définir la qualité de transmission est le taux d'erreurs binaires ou BER ; la valeur acceptable est 10^{-9} .

III.2. Paramètres de qualités de service :

Des paramètres définissant les exigences techniques à vérifier et à respecter lors de la mise en place d'un réseau à fibre optique dont :

- ❖ **Débit** : la capacité maximale de transmission.
- ❖ **Délai de transit** : le délai de traversée du réseau.
- ❖ **Gigue** : désigne les variations de latence des paquets, elle dépend du volume de trafic et nombre d'équipements dans le réseau.
- ❖ **Taux d'erreurs binaires (BER)**.

III.2.1. Taux d'erreurs binaires :

Le taux d'erreur est un moyen quantitatif d'évaluer la qualité de service, il est défini par le rapport entre le nombre de bits erronés sur le nombre de bit émis, la valeur maximale est de 10^{-9} .

III.2.2. Diagramme de l'œil [20]:

Le diagramme de l'œil est une représentation graphique des signaux numériques qui permet d'étudier ces signaux. C'est une superposition de tous les symboles binaires émis c'est un indicateur de la qualité de transmission en termes de bruit d'amplitude, d'interférence entre symbole et giges. On peut déduire ces signaux sont trop lents, trop courts, synchronisés ou pas avec l'horloge du système, affectés ou pas par des bruits ; dans la figure 3.1, on a présenté un exemple de diagramme de l'œil d'un signal NRZ où on voit bien la concordance entre l'état du signal et le diagramme de l'œil.

Œil ouvert signifie que le signal est moins distordu et par la suite moins affecté alors que la fermeture de l'œil signifie que signal a subi d'interférences inter-symboles ou affecté par des bruits ; la largeur de l'œil présente l'efficacité de la synchronisation à l'effet de la gigue.

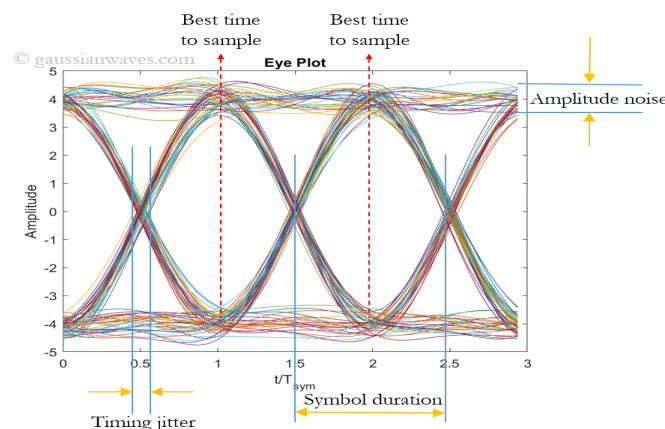


Figure 3.1 : exemple de diagramme de l'œil d'un signal NRZ.

III.2.3. La pénalité :

La pénalité est définie comme la différence en dB entre les puissances reçues par le récepteur pour un BER donné avant et après l'insertion du régénérateur, elle évalue le bruit et les déformations ajoutées ; pour un BER de 10^{-9} P est de 0.5 dB. [14]

IV. Simulation :

IV.1. But de la simulation :

La simulation consiste à étudier l'évolution d'un signal optique et les difficultés qu'il va rencontrer lors de sa propagation via une fibre optique FHNL; la simulation sera faite simultanément en deux phases ; on introduit un diviseur à deux à la sortie du bloc émetteur et chaque sortie du diviseur sera acheminée vers un des deux étages récepteurs. La première phase consiste à étudier le comportement du signal à chaque nœud de la chaîne de transmission sans installation d'aucun amplificateur et la deuxième phase consiste à étudier son comportement à chaque nœud de l'autre chaîne de transmission en utilisant une FHNL comme support de transmission avec l'introduction d'un amplificateur type 3R pour corriger les erreurs induites par la non linéarité de la fibre.

On modifie les paramètres de la fibre FHNL telles que la longueur de la fibre, l'atténuation, la dispersion ainsi que le facteur de la non linéarité et en supervisant l'évolution du signal à chaque point de test. Mais avant d'entamer la phase de simulation, on doit passer par la description et les caractéristiques des composants clés dans la conception du système sujet d'étude notamment la fibre hautement non linéaire et les filtres optiques.

IV.2. Fibres hautement non linéaires :

IV.2.1. Présentation :

Les fibres hautement non linéaires ou fibres de nouvelle génération par définition connues également par fibres à fort confinement sont des fibres non linéaires dont le coefficient de non linéarité γ peut atteindre des valeurs nettement très supérieures que celles dans une fibre non linéaire conventionnelle standard.[21]

$$\gamma = \frac{2\pi^2}{\lambda A_{eff}} \quad 3.1$$

Elles sont fabriquées industriellement en dopant la gaine par un matériau (comme le Bor) afin d'abaisser son indice de réfraction d'une part, d'autre part on dope le cœur par le tellure par exemple dans le but d'accroître d'avantage son indice de réfraction.

Cependant, l'accroissement du non linéarité est accompagné par un accroissement du coefficient de l'absorption. Elles permettent une forte interaction entre la lumière et le matériau milieu de propagation; cependant, elles présentent des défis de conception et de fabrication en

raison des propriétés non linéaire du matériau qui peuvent entraîner une distorsion du signal et la suite une perte de qualité de service. Plusieurs types de fibres hautement non linéaires sont conçus telles que:

- ❖ Fibres Microstructurées air-silice ;
- ❖ Les tapers de fibre ;
- ❖ Les fibres à base de verres non silice ;
- ❖ Fibres télécoms.

IV.2.2. Caractéristiques de la fibre hautement non linéaire:

- ❖ Les fibres hautement non linéaires sont de structures spécifiques telles que guides d'onde à confinement élevé, ou les fibres Microstructurées qui permettent un bon confinement de la lumière d'où une concentration maximale de la lumière sur dans une petite échelle spatiale ;
- ❖ Effets non linéaire plus fort en raison du confinement spatial élevé, les effets non linéaires s'amplifient et par la suite le taux de conversion sera élevé d'où les dispositifs basés sur la fibre hautement non linéaire nécessitent souvent des puissances faibles contrairement à ceux basés sur la fibre non linéaire conventionnelle.
- ❖ Longueur d'onde flexible : permet de réaliser des effets non linaires à des longueurs d'ondes personnalisées en ajustant les paramètres de la structure ;
- ❖ Bande passante très large.

IV.2.3. Domaines d'applications de la fibre hautement non linéaire :

L'apparition de la fibre hautement non linéaire a donné une nouvelle poussée dans divers domaines, vue les avantages qu'elle a apporté notamment :

- ❖ Télécommunication très haut débit : la fibre hautement non linéaire est utilisée pour augmenter la capacité et la portée des systèmes de transmission ;
- ❖ Utilisées dans les applications de traitement tout optique ;
- ❖ Génération des fréquences : génèrent des fréquences supplémentaires à partir d'une source laser unique, utilisées dans la spectroscopie, métrologie et la commutation optique ;
- ❖ Réalisation des mesures de précision telle que l'imagerie médicale ;
- ❖ Utilisée dans la fabrication des composants optiques non linéaires générateurs d'impulsions ultra-courte.
- ❖ Réalisation d'amplificateurs à gain élevé pour amplifier les signaux optiques à faible puissance ;
- ❖ Génération de signaux optiques à haute fréquence et la conversion de longueur d'onde ;
- ❖ Détecteurs optique et capteurs.

- ❖ Concevoir des dispositifs à de différentes longueurs d'ondes spécifiques adaptées aux dispositifs aux besoins spécifiques.

IV.2.4. Défauts de la fibre hautement non linéaire :

Comme tout support de transmission, la fibre hautement non linéaire présente quelques défauts à ne pas négliger lors de son utilisation, telles que :

- ❖ Atténuation accrue plus élevée que la non linéarité conventionnelle ;
- ❖ Sensibles aux fluctuations de température ;
- ❖ Complexité de fabrication ;
- ❖ Cout de fabrication élevé.

IV.2.5. Types des Fibres Hautement Non Linéaires

IV.2.5.1. Fibres Télécoms [18]:

Les fibres télécoms sont caractérisées par un coefficient d'absorption très faible, utilisables dans les systèmes de transmission à ultra-longue distance comme dans le cas des transmissions sous-marine, elles sont caractérisées également par une dispersion du second ordre relativement faible ; dans cette catégorie de fibres on trouve la DSF (Dispersion Shifted Fiber).

IV.2.5.2. Tapers de fibre SMF28 [18]:

Elles sont fabriquées à base de silice souple fuselée entourée d'une couche d'air, cette caractéristique permet de focaliser la lumière sur une petite aire effective et de modifier les propriétés dispersives de la fibre ainsi que ce type de fibres permet un coefficient de non linéarité très élevé que la PCF NL ; ces fibres sont utilisables pour l'ajustement des effets non linéaires destinés à générer des sources Super continuums dans la gamme de longueur de d'ondes visibles et proche Infra Rouge.

IV.2.5.3. Fibre à base de verres non silice :

C'est des fibres fabriquées à base de verres non silice telles que le Tellure (Te) ou le Chalcogénure (Arsenic, Sélénium...) qui disposent de forts indices de réfraction (une valeur approximative de 100 à 1000 fois que dans la silice) [22] leurs tours induisent des indices non linéaires très élevés permettant d'obtenir par la suite des coefficients de non linéarité très grand coefficient. Le tableau n°3.1, présente quelque exemple de fibres Chalcogénure ainsi que leurs caractéristiques. Les fibres de verres non silice sont à la base de réalisation des Super continuums dans le domaine des ondes Infra Rouge. Ainsi que les fibres à base de Tellure sont utilisables dans la réalisation des amplificateurs de Brillouin du fait qu'elles sont caractérisées par un fort potentiel pour la diffusion de Brillouin. Cependant, ces fibres présentes des inconvénients tels que :

- ❖ Leur fabrication qui demande un savoir-faire particulier ;
- ❖ Elles sont caractérisées par des pertes linéiques très élevées ;

- ❖ Elles sont fragiles mécaniquement ce qui rend leurs manipulations difficiles.

Type de verre de la fibre	Coefficient non linéaire γ ($w^{-1} km^{-1}$)	Perte de propagation ($dB.m^{-1}$)	Mode de guidage
GeSbSGa	120	>20	multimode
GeSbS	500	5	monomode
AsSe	1500	15	monomode
AsSe "taper"	93400	<1	monomode

Tableau 3.3 : exemples de fibres Chalcogénure ainsi que leurs caractéristiques.

IV.2.5.4. Fibres Microstructurées aire-silice [18] :

Les fibres Microstructurées air-silice qu'on va citer quelques de ses caractéristiques techniques comme exemple, sont des fibres de la catégorie des fibres à cristaux photoniques (PCF), elles sont caractérisées par des structures géométriques spécifiques figure3.2.a, une petite aire effective et un fort coefficient de non linéarité, une caractéristique importante pour le processus de la conversion des fréquences dont il est utilisable dans la réalisation :

- ❖ Des amplificateurs paramétriques optiques ;
- ❖ Des Super continnuums.

IV.2.5.5. Caractéristiques de la fibre Microstructurée [24]

- ❖ **Pertes :** les pertes dans les fibres Microstructurées dépendent non seulement des caractéristiques optiques du matériau mais aussi des structures des fibres elles-mêmes (elles sont généralement d'origine de Rayleigh), ces pertes diminuent lorsque le nombre de trous augmente et le rapport d/Λ augmente figure 3.2.a.
- ❖ **Dispersion :** la structure spécifique fournie une très grande gamme de valeurs de dispersion comme exemple $D=0$ pour une longueur d'onde de 800 nm alors que pour une longueur d'onde de 1550 nm D peut prendre des valeurs positives, ou négatives ou bien autour de zéro en agissant sur le rapport d/Λ .
- ❖ **Coefficient de non linéarité :** le coefficient de la non linéarité dans une fibre Microstructurées est 50 plus que celui dans une fibre monomode.

Dans cette catégorie on trouve la fibre NL-1550-POS1 de la société NKT Photonic.

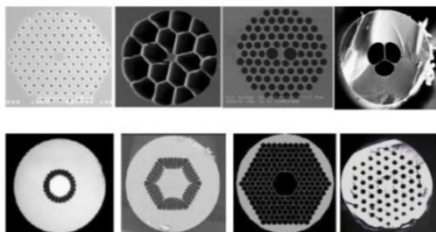


Figure 3.2.a. exemples de formes de fibres Microstructurées.

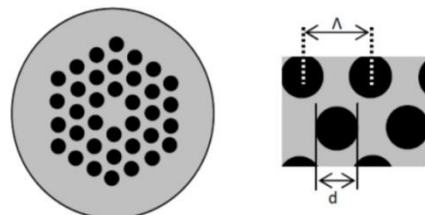


Figure 3.2.b. fibre PCF de forme hexa.

IV.3. Filtres optiques :

Les filtres optiques sont des dispositifs tout optique, ils sont conçus dans le but de faire passer certaines longueurs d'ondes de la lumière et en bloquant d'autres longueurs d'ondes, ils sont conçus pour s'intégrer dans un réseau optique ; ils peuvent être passe bas, autorisent uniquement le passage de courtes longueurs d'onde, passe haut pour les plus longues longueurs d'onde ou passe bande ou filtres étroits qui permettent le passage d'une bande bien déterminée de longueurs d'onde, sont caractérisés par[25] :

- ❖ Faibles pertes ;
- ❖ Isolation importante entre canaux.
- ❖ Plusieurs types de fibres optiques.

IV.4. Caractéristiques techniques des filtres optiques :

Les caractéristiques techniques d'un filtre optique L'utilisation d'un filtre optique dans une conception, elle est définie Comme tous composants,

La longueur d'onde : c'est la longueur d'onde centrale de la bande de fréquences autorisée par le dit filtre.

Largeur de la bande: définit la gamme de longueurs d'ondes autorisées à passer ;

Densité optique : désigne la quantité d'énergie bloquée, si cette est grande alors le niveau de transmission est faible et comme exemple :

Les filtres ayant une valeur de la densité optique égale à 6 sont utilisés pour des besoins en blocage extrême tel que la spectroscopie de Raman ;

Les filtres ayant une valeur de la densité optique égale de 2 sont parfaitement adaptés au tri des couleurs.

Longueur d'onde de coupure Cut-On : pour désigner la fréquence de coupure des filtres passe-haut ;

Longueur d'onde de coupure Cut-Off : pour désigner la fréquence des filtres passe-bas. [22]

IV.5. Description du système :

Le système (figure 3.3) est composé de trois étages, un bloc émetteur pour la génération du signal, suivi d'un diviseur à deux, et chaque branche est reliée à une des lignes de transmission dont une est sans régénérateur et l'autre avec régénérateur 3R.

Avant de décortiquer les différents étages du système à étudier, on va présenter quelques composantes clés de la réalisation.

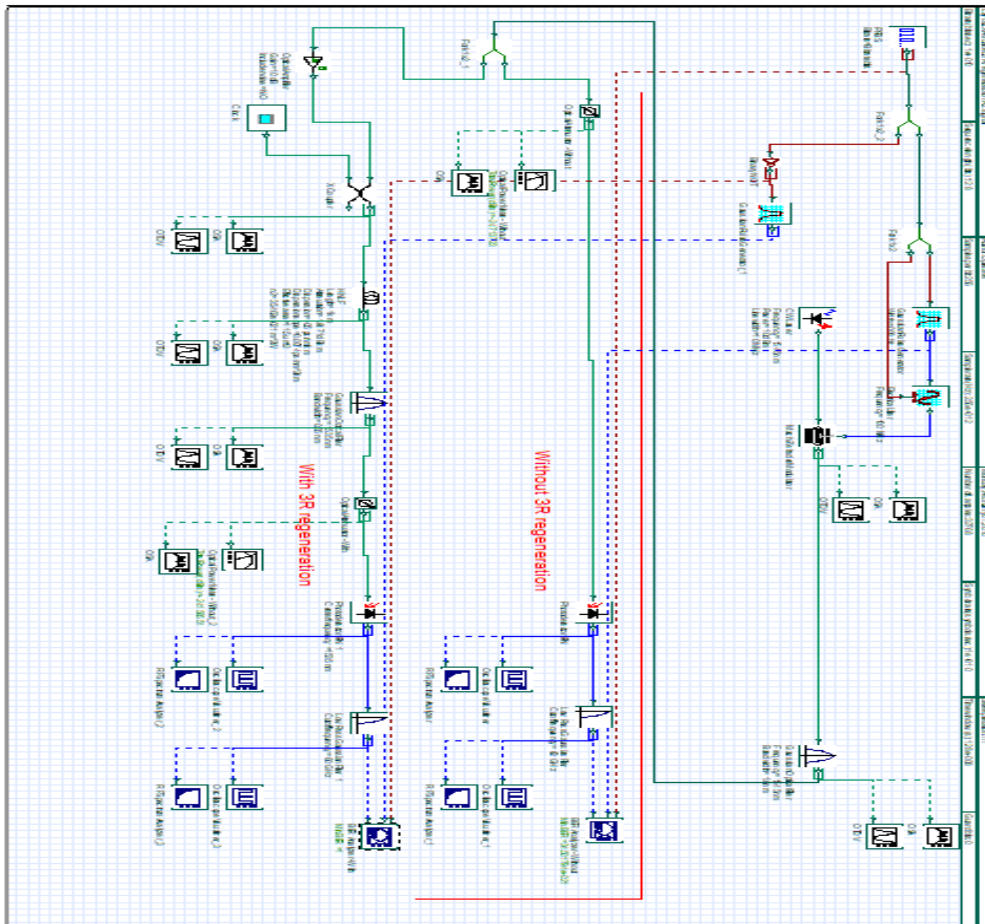


figure3.3.a : Schéma du système à étudier.

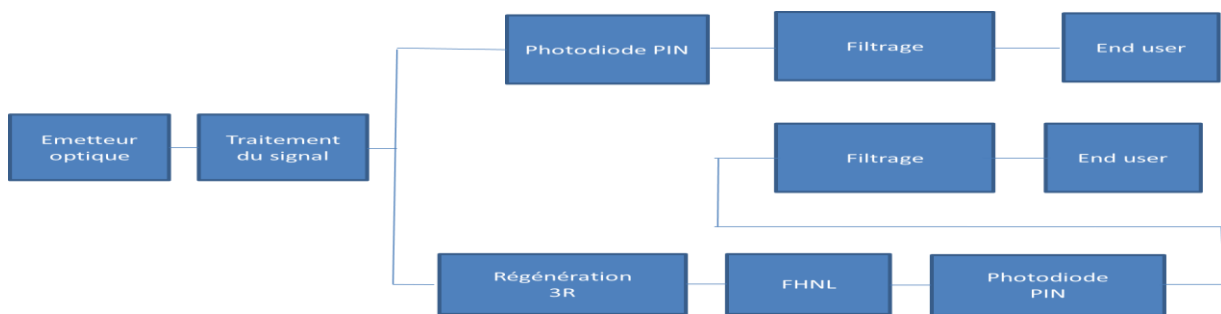


figure3.3.b : Schéma synoptique du système à étudier.

IV.5.1. Description du bloc émetteur :

Le bloc émetteur est composé d'une source d'onde optique de type CW Laser, le signal généré est modulé par des impulsions issues d'un générateur d'impulsions Gaussien, le type de modulation utilisée est externe avec un modulateur Mach Zehnder ; pour avoir une meilleure visibilité sur le processus de simulation. On introduit à la sortie du modulateur un analyseur de fréquences et un oscilloscope afin d'avoir un signal référence avant de subir une déformation et de le comparer aux signaux de sortie de chaque étage récepteur. On va effectuer des prélèvements du signal afin de garder toujours un œil sur le comportement du signal. Un filtre gaussien passe bande dont la fréquence de coupure est 1545 nm et la largeur de la bande est 1.6 nm est installé à la sortie du coupleur afin de faire passer uniquement le signal porteur d'information ; le signal de sortie sera divisé en deux signaux identiques et chaque partie sera orientée à son tour à un des deux étages récepteurs.

IV.5.2. Description du 1^{er} étage récepteur :

A l'entrée du premier étage récepteur on a introduit un atténuateur optique afin de diminuer le niveau d'intensité du signal, utilisé par la suite pour exciter la photodiode PIN pour la conversion optique-électrique, en utilisant un analyseur de fréquences et un oscilloscope pour visualiser l'évolution du signal au niveau de chaque nœud de cet étage. Au bout, du récepteur on a installé un filtre gaussien passe bas dont la fréquence de coupure est 60 GHz pour extraire des impulsions d'origine. Grâce à un analyseur, on en déduit le taux d'erreurs binaires, pour mesurer la dégradation subie par le signal lors de sa propagation dans la ligne de transmission et le facteur de qualité.

IV.5.3. Description du 2^{ème} étage récepteur :

A l'entrée de cet étage on a introduit un amplificateur caractérisé par un gain de 27 dB et afin de remédier aux défauts de synchronisation, le signal de sortie sera couplé à une horloge en utilisant un X-coupleur, le signal résultant va être injecté dans une fibre optique hautement non-linéaire qu'on va décrire par la suite; le signal de sortie sera filtré par un filtre gaussien passe bande ayant une fréquence de coupure de 1535 nm et une largeur de bande de 0.65 nm. L'introduction d'un atténuateur consiste à baisser l'intensité du signal optique avant d'être converti en un signal électrique et afin de récupérer le signal d'origine, on utilise un filtre passe bas ayant une fréquence de coupure de 60 GHz ; l'analyseur BER nous permet de lire le taux d'erreurs BER et le facteur de qualité.

IV.6. Résultats et interprétation :

IV.6.1. Au niveau de l'émetteur :

A la sortie du modulateur Mach-Zehnder, on remarque bien que le signal sujet d'étude est un signal RZ modulé en externe par un modulateur Mach-Zehnder, possédant les caractéristiques suivantes :

- ✚ Une puissance de -6.688 dBm ;
- ✚ La fréquence $f = 194.04$ THz, $\lambda = 1.545$ THz.

L'objectif est d'étudier son évolution au niveau de chaque point des deux étages récepteurs en jouant sur les paramètres de la fibre hautement non linéaire ainsi que le gain de l'amplificateur. Tout d'abord, on remarque qu'il est affecté par des signaux parasites qui sont introduites par la diode DL tel qu'il s'est présenté sur les figures 3.4.a et la figure 3.4.b (représentation fréquentielle et temporelle du signal origine) ;

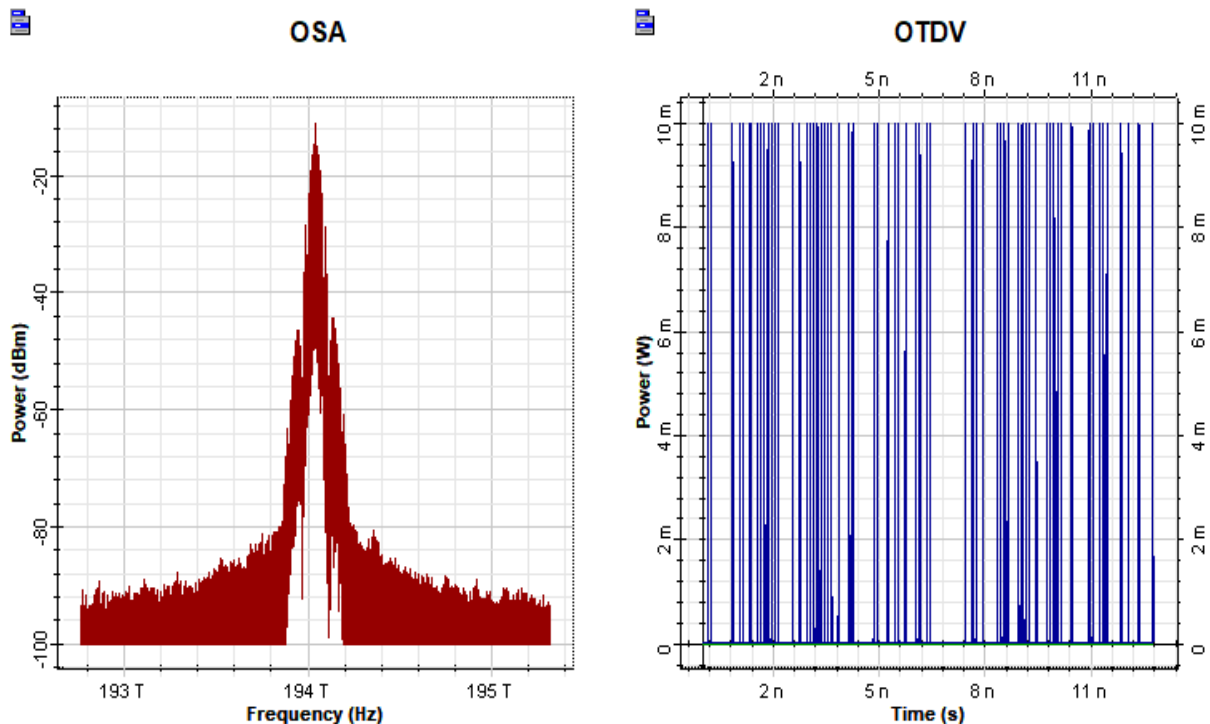
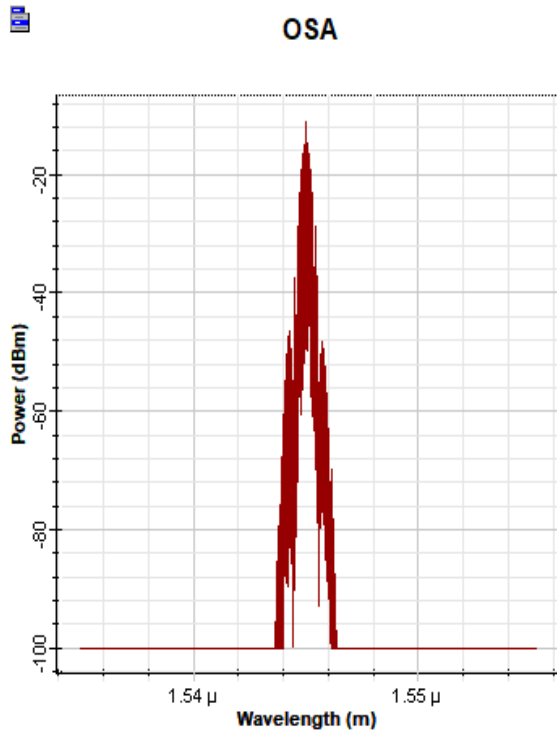


Figure 3.4.a : Représentation fréquentielle du signal origine Figure 3.4.b : Représentation temporelle du signal origine

La mise en place d'un filtre gaussien type passe bande centré autour de la fréquence 194.04 THz est primordiale afin d'éliminer les signaux inutiles tout en gardant les mêmes caractéristiques c.à.d. en termes de puissance et de fréquence pour préserver le signal d'origine tel s'est présenté sur les figures 3.5.a et 3.5.b.



Figures 3.5.a : Représentation fréquentielle du signal après filtrage

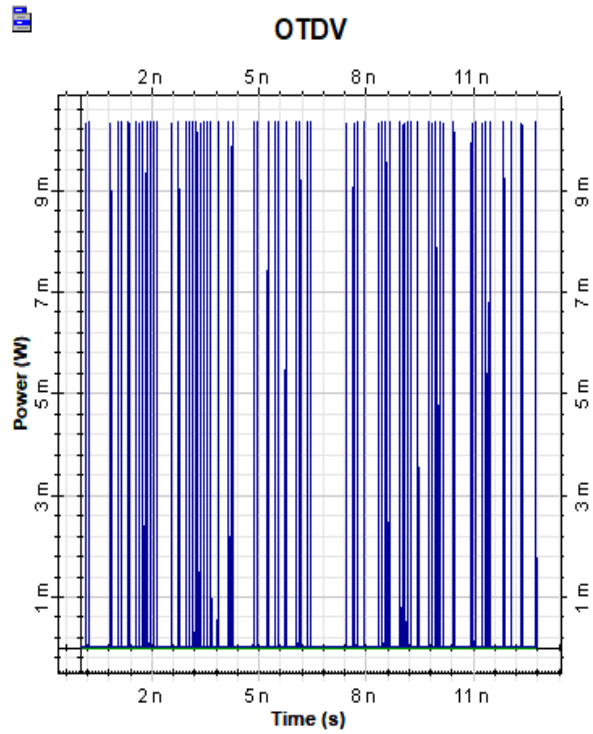
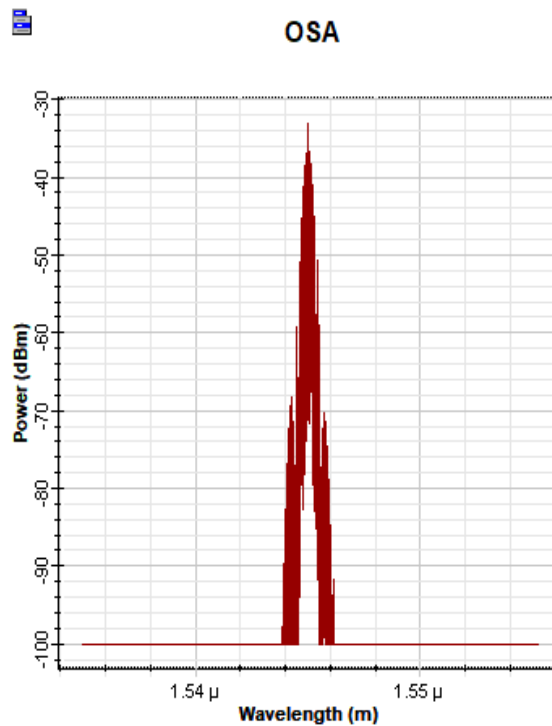


Figure 3.5.b : Représentation temporelle du signal après filtrage

IV.6.2. Au niveau du premier étage récepteur (sans régénération) :

A l'entrée du récepteur on a installé un atténuateur dans le but de diminuer la puissance à un niveau donné (-28.53 dBm) tout en gardant la même allure et la même fréquence pour pouvoir exciter la photodiode (figure 3.6).



Figures 3.6 : représentation du signal transmit à l'entrée du premier bloc récepteur

A la sortie de la photodiode, on remarque que le signal est affecté par des signaux parasites qui sont dus à la conversion optique-électrique par la diode PIN ainsi que sa puissance a diminué pour atteindre (-74.5 dBm) (figures 3.7.a et 3.7.b)

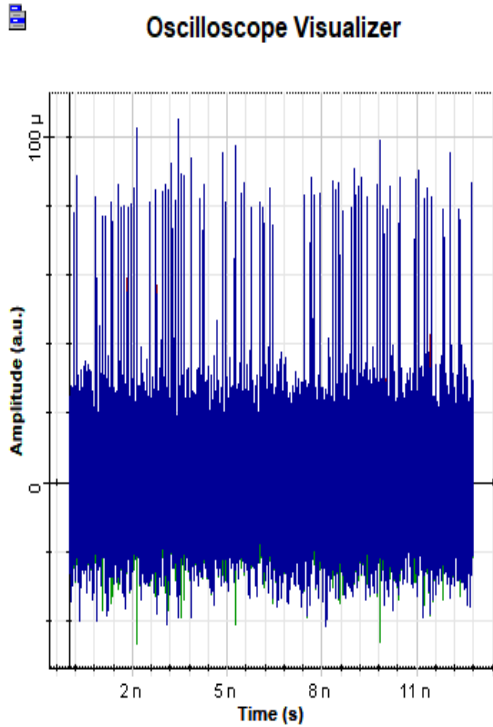


Figure 3.7.a : Signal à la sortie de la diode (représentation temporelle)

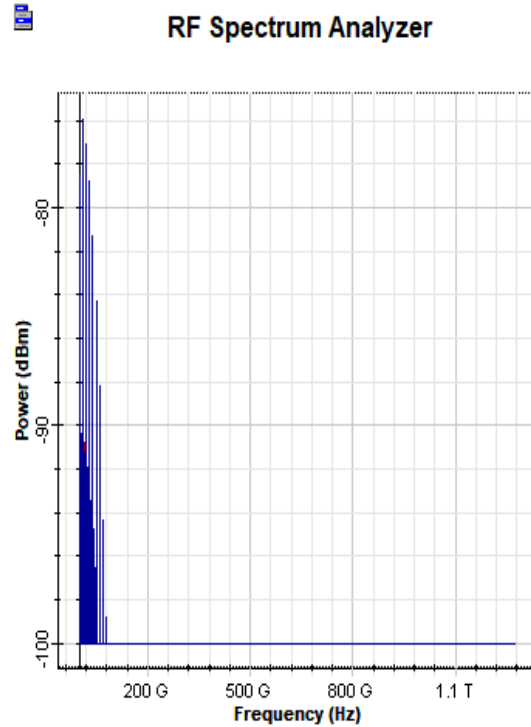


Figure 3.7.b : Signal à la sortie de la diode (représentation fréquentielle)

Le filtre passe bas sert à éliminer les dites signaux figures 3.8.a et 3.8.b.

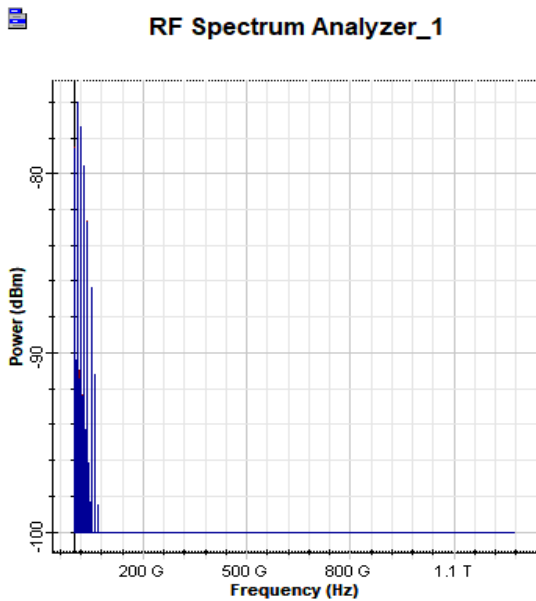


Figure 3.8.a : Filtrage du signal à la sortie de la diode PIN (représentation fréquentielle)

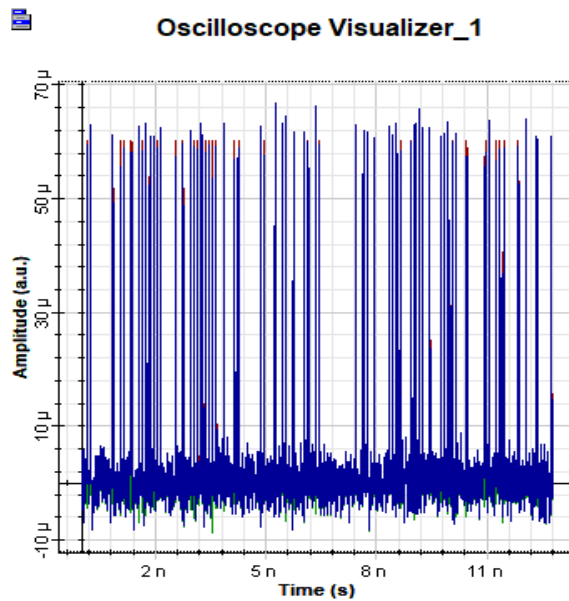


Figure 3.8.b : Filtrage du signal à la sortie de la diode PIN (représentation temporelle)

IV.6.3. Au niveau du deuxième étage de réception (après régénération) :

A l'entrée du récepteur on a introduit un amplificateur dont le gain est de 13 dB, associé avec une horloge (figure 3.9.a) caractérisée par une fréquence et une puissance proche du signal sujet d'étude à l'entrée d'un coupleur pour amplifier le signal utile pour atteindre la valeur de 1.91 dBm d'une part et d'autre part pour corriger les giges introduites lors de propagation du signal, l'association de l'amplificateur et de l'horloge amène à la fonction de régénération 3R ; la figure 3.9.b présente le signal composite à la sortie du coupleur.

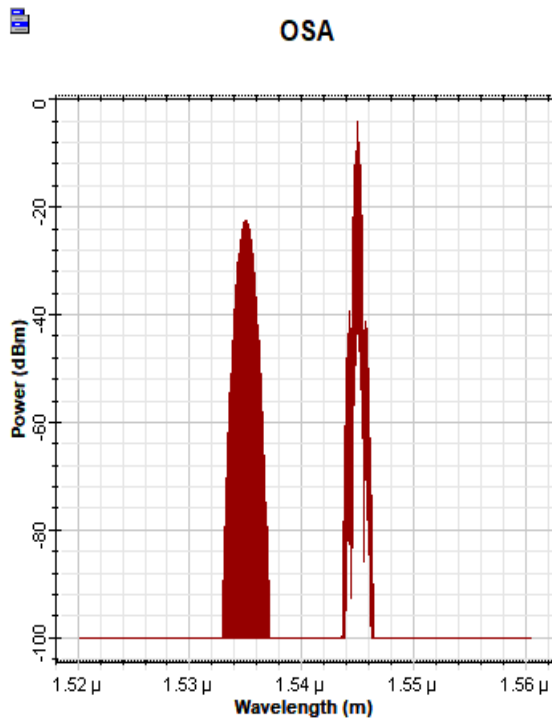


Figure 3.9.a : Signal composite (en longueur d'onde) à la sortie du coupleur.

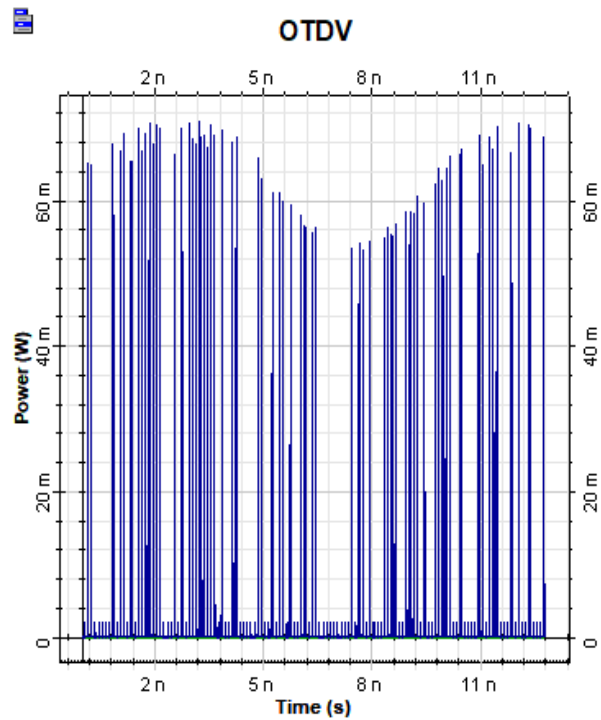


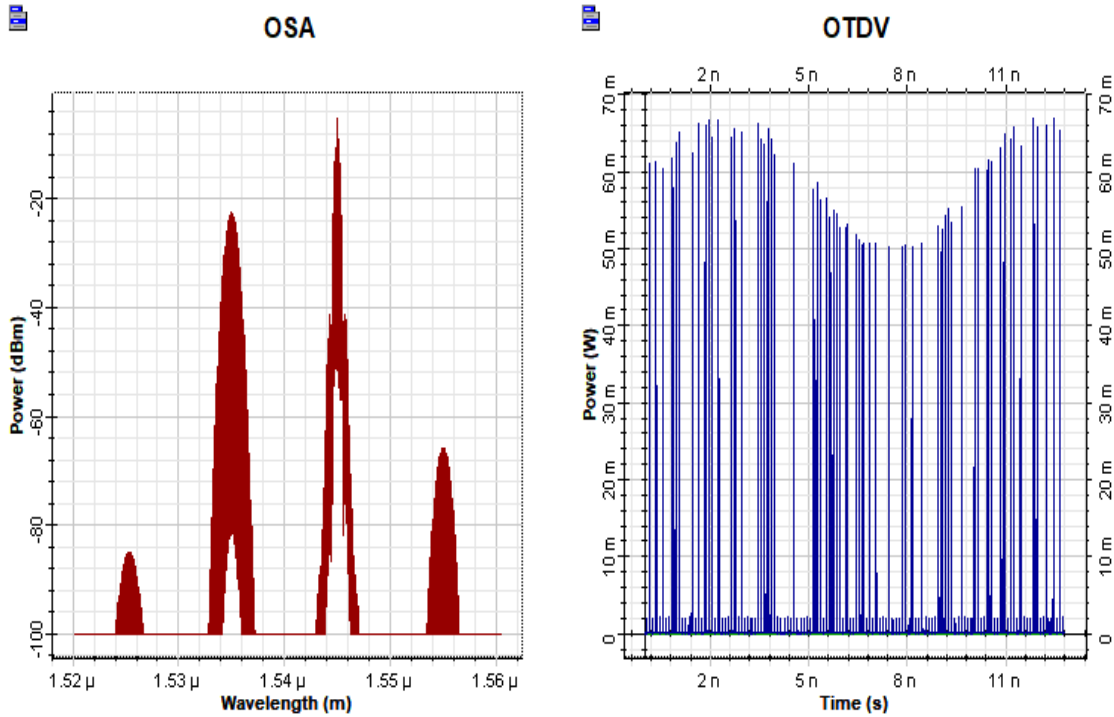
Figure 3.9.b : Représentation temporelle du signal composite (amplifié et régénéré).

A la sortie de la fibre hautement non linéaire dont les caractéristiques sont :

- ✚ longueur = 1.007 km,
- ✚ atténuation = 1.8471 dB/km,
- ✚ dispersion = -0.5 ps/nm² km,
- ✚ dispersion slop = 0.0074,
- ✚ aire effective = 11.5 μm²,
- ✚ $n_2 = 26.462 \text{ e-}021 \text{ m}^2/\text{w}$.

Le signal a gardé la même fréquence. Par contre, sa puissance a été diminuée pour atteindre la valeur de -0.2473 dBm et on remarque aussi l'apparition d'impulsions de faibles puissances et de fréquences (figures 3.10.a et 3.10.b) proches du signal sujet de transmission, ces phénomènes sont

due aux effets non linéaires induites suite à l'interaction entre la lumière et le matériau milieu de propagation.



Figures 3.10.a et b : Représentations du signal à la sortie de la FHNL ($L=1.007\text{km}$, $n_2=35.462 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{w}$ et $G=13 \text{ dB}$)

En variant la longueur de la fibre hautement non linéaire, ou même si on change l'indice de réfraction non linéaire n_2 l'apparition des impulsions induites par les effets non linéaires persiste toujours et elles s'atténuent de même que le signal utile (figure 3.11).

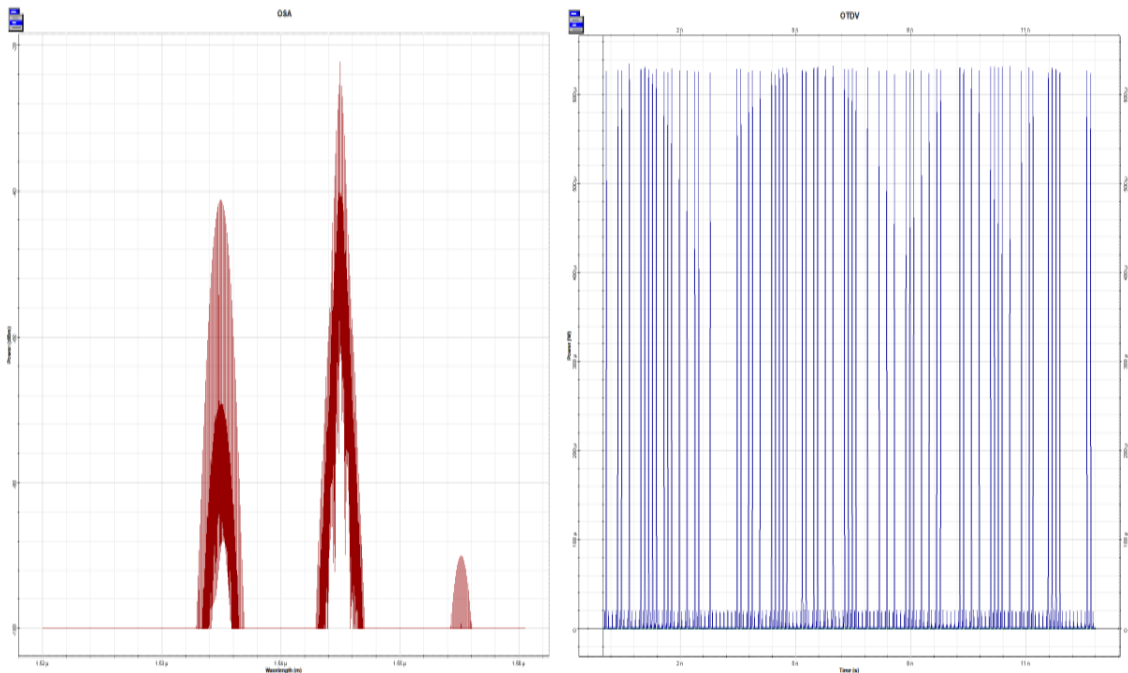


Figure 3.11.a et b : Représentations du signal à la sortie de FHNL ($L=10 \text{ km}$, $n_2=35.462 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{w}$ et $G=10 \text{ dB}$)

De même si on change le gain de l'amplificateur on remarque que le niveau de réception du signal au bout de la photodiode change aussi mais les impulsions non linéaires apparaissent toujours (figure 3.12.a et b).

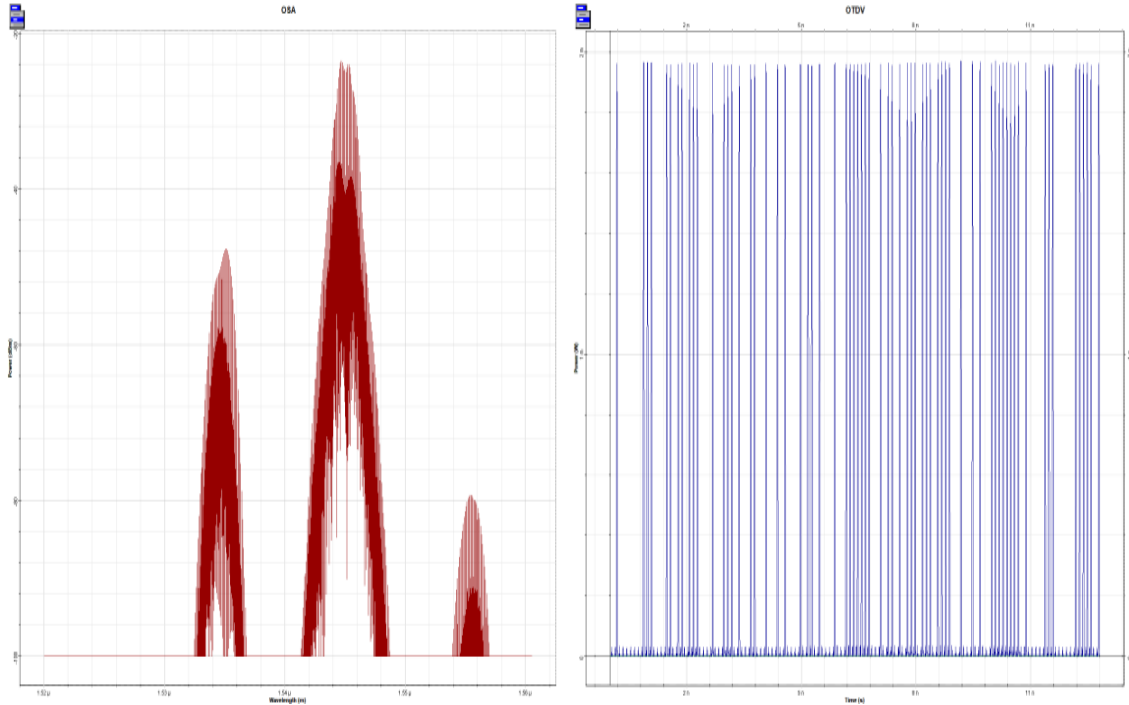
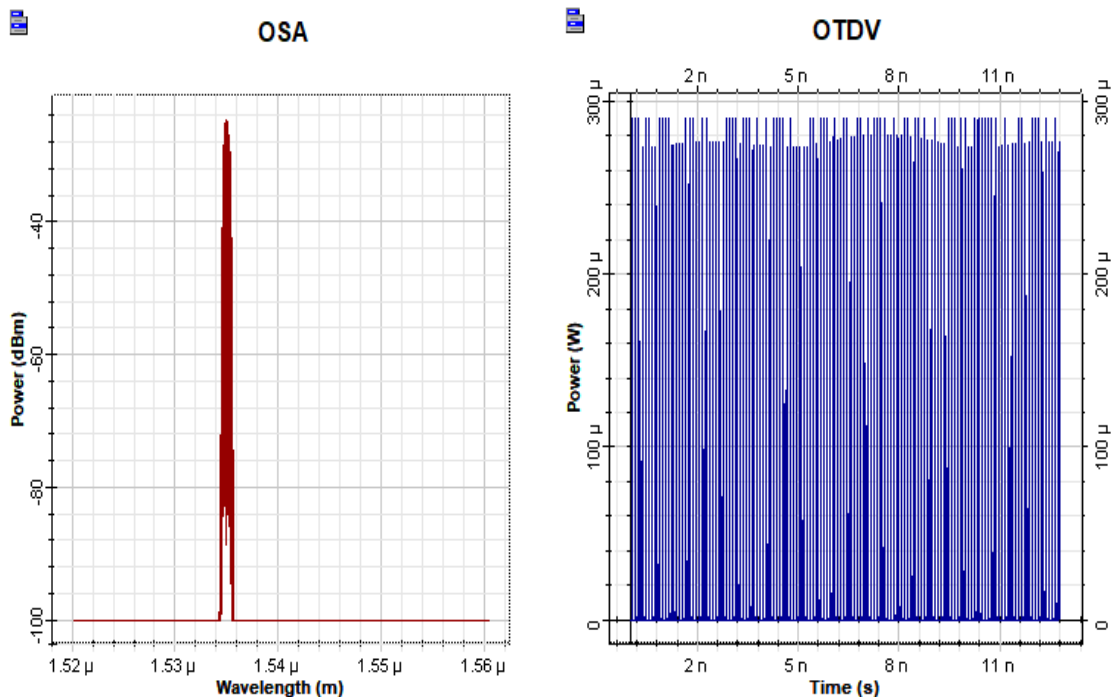


Figure 3.12 a et b : Représentation du signal à la sortie de FHNL ($L=10$ km, $n_2=26.462 \cdot 10^{-21} \text{m}^2/\text{w}$ et $G=17$ dB)

Le filtre passe bande centré autour de la fréquence du signal l'origine sert à éliminer les impulsions induites par les effets non linéaires (figures 3.13.a et 3.13.b).



Figures 3.13.a et 3.13.b : Allure du signal après filtrage (filtre passe bande).

Le filtre passe bas est inséré à la sortie de la photodiode, et sert à éliminer tous les signaux parasites induites (figures 3.14) après la conversion optique-électrique pour pouvoir à la sortie de la photodiode récupérer le signal d'origine, avec une puissance de -74.41 dBm (figure 3.15).

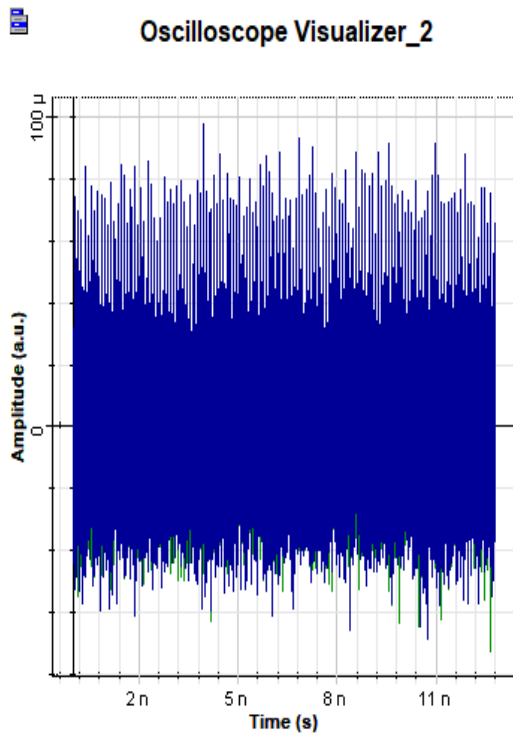


Figure 3.14: allure du signal après conversion Opt-élec

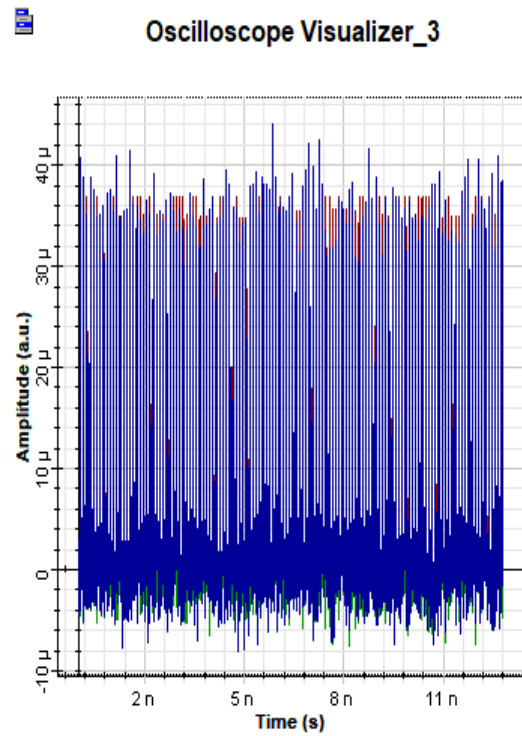


Figure 3.15 : allure du signal après filtrage passe bas.

IV.7. Conclusion :

Dans ce chapitre on a suivi l'évolution et le comportement d'un signal RZ en modulation externe dans les lignes de transmission. D'abord premièrement sans introduction de composant correcteur et deuxièmement en utilisant une fibre optique hautement non linéaire mais avec l'introduction d'un régénérateur 3R. On a remarqué que la fibre a génère des impulsions dû à l'interaction entre la lumière et le milieu de propagation en ayant des puissances ainsi que des fréquences proches du signal à transmettre, qui peut par la suite créer des interférences qui affectent la qualité de signal à la réception, la mise en place du régénérateur 3R permet de palier à ce défaut.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'évolution dans le domaine des télécommunications optiques est en constante croissance depuis son apparition. Cette évolution concerne toute la chaîne de transmission de bout en bout, elle concerne les composants utilisés dans la conversion électrique /optique/électrique, en termes de rendement quantique, de rapidité de conversion ; et de différentes techniques, notamment les techniques de multiplexage, la régénération qui permettent d'augmenter le débit, la bande passante et la portée et par la suite d'améliorer d'avantage la transmission par fibre optique ainsi que le traitement tout optique qui permet à son tour d'augmenter la vitesse de traitement des signaux optiques. Cette évolution concerne aussi la découverte de nouvelles techniques dans la fabrication de types spécifiques de fibres optiques utilisables dans diverses applications notamment la fibre hautement non linéaire.

Seulement cette évolution n'est pas seine, elle est toujours accompagnée par des défauts, qui ne sont autres que les effets non linéaires. Ces défauts peuvent affecter la qualité de service. Des techniques ont été développées en parallèles pour palier à ces défauts et d'en profiter des performances de la fibre optique.

En terme de ce travail, arrivée au bout des compétences de la fibre optique est encore plus loin ce qui laisse les portes ouvertes pour d'autres sujets de recherche en la matière; notamment le développement de nouvelles méthodes de calculs; le traitement du non linéarité d'ordres supérieurs; le développement ou la découverte d'autres méthodes de fabrication ou de dopage des fibres optiques ou même les doper par d'autres matériaux; la conception ou la réalisation d'autres composants d'extrémités ; permettront d'améliorer les performances de la fibre optique et de découvrir d'autres domaines d'application.

Références bibliographiques

- [1] Aziz BENDRIHEM « Etude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques » Université de Batna. Thèse de Magister en Electronique option micro-onde.
- [2] Fathia Samia. MADANI « Caractérisation et contribution des diodes LED pour la transmission par fibre optique dans un réseau local ». Thèse de Magister U.S.T.Oran 2011.
- [3] Charlet GABRIEL « Etude des formats de Démodulation et des méthodes de détection pour les transmissions multiplexées en longueur d'onde sur fibre optique de 40 GBit/s et 100 GBit/s » Thèse Doctorat. Université de Paris-Sud 2011.
- [4] J.L. VERNEUIL « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40Gbit/s ».Thèse de Doctorat. Université de LIMOGES. 2003.
- [5] Rachid RADOUI « Dérive dans les modulateurs optiques Mach-Zehnder. Analyse physique et résolution » Thèse Doctorat. Université P.V Metz. 2006.
- [6] Benoit-Luis BERUBE « Conception de matrices de diodes avalanche à photon unique sur circuits intégrés CMOS 3D » Thèse Doctorat. Université de Sherbrooke. Québec. 2014.
- [7] Frédéric JOURNET « Modélisation des photodiodes PIN pour un fonctionnement en hyperfréquence sous fortes puissance ». Thèse doctorat. Université de LILLE 1996.
- [8] Julien MAURY « Etude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique ».Thèse Doctorat .Université de LIMOGES 2003.
- [9] Isabelle PLANES « Performances des capteurs à fibre optique basés sur les diffusions Brillouin, Rayleigh et Raman en environnement sévère ». Thèse Doctorat. Université de LYON 2019
- [10] Caroline FORTIER « Génération de sources optiques fibrées très hautes cadence et caractérisations de fibres optiques Microstructurées en verre de Chalcogénure » .Thèse Doctorat 2011.
- [11] Attaouia BENTAHAR « Etude et évaluation de la contribution de l'amplification optique dans l'amélioration de performances d'un système de communication optique ». Thèse Doctorat Université Djillali LIABES Sidi Bel Abbes. 2007.
- [12] M. BOUREGAA « Etudes comparatives entre les codes CDMA optiques ».Thèse de Magister Université Abou bakr Belkaïd Tlemcen. 2011.
- [13] Jérémie PRADES « Conception d'un modulateur électro-optique Mach Zehnder 100 GBits/s NRZ sur silicium ». Thèse doctorat. Université de BORDEAUX 2016.
- [14] Thanh Nam Nguyen « Etudes des composants optiques à base de fibres optiques non linéaire » Thèse Doctorat. Université de RENNES1. 2008.

- [15] Victor LE NADER « Approche expérimentale et théorique de la diffusion Raman exaltée : résonance des plasmas de surface et effet de pointe ».Thèse Doctorat. Université de NANTES 2010).
- [16] Article rédigé par spectres (Parmigiani,F.;Finot,C.; Mukasa,K.;Ibsen,M.; R.; Petropoulos,P; Richardson, DJ)(2006). « Elargissement d'auto modulation de phase ultra-plats dans une fibre hautement non linéaire utilisant des impulsions paraboliques formées dans un réseau de Bragg à fibre ».
- [17] Article en ligne Schneider, T.2004. « Modulation de phase propre et croisée dans optique non linéaire dans les télécommunications textes avancés en physique ». Springer, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08996-5-6>.
- [18] Marcelle Nina ZAMBO ABOU'OU « Instabilité modulationnelle et concept de réservoir de photons dans les fibres optiques à très forte non linéarité » Thèse de Doctorat en physique Université de BOURGOGNE 2011.
- [19] Optisystem tutorials-volume 1 optical communication system design software version 13 copyright 2014 OptiWave.
- [20] Wassila BERROUANE. « Etude de conception d'une chaîne de transmission optique à très haut débit à base de semi-conducteur de type III-Nitrures. Thèse Doctorat Université Djilali LIABES 2018.
- [21] Bertrand KIBLER « Propagation non-linéaire d'impulsions ultracourtes dans les fibres optiques de nouvelle génération » Thèse Doctorat Université de FRANCHE-COMTE 2007.
- [22] Duc Minh Nguyen « Investigation et caractérisation de fibres et guides optiques très fortement non linéaires ». Thèse Doctorat Université de RENNES1. 2011.
- [23] Leila GRAINI « Applications des similarités dans les systèmes de télécom par fibre optique à très haut débit » ; THESE Doctorat. Université d'ANNABA 2017.
- [24] Article <https://www.edmundoptics.fr>.